



Konferenzband

Inhaltsverzeichnis

Begleitworte	<u>1</u>
[#1] Vorwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung Hassenbach, P. ¹ ¹ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin	2
[#2] So geht Zukunft: Biologisierung der Technik Erb, R. (V) ¹ ¹ BIOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V., Berlin	4
Präsentationen	<u>5</u>
[Adaptribo-2] Adaptive Strukturbildung unter tribologischer Belastung von Antriebskomponenten aus sortenreinen Kompositen Jaeger, R. (V) ¹ ; Licht, E. ² ; Steer, P. ³ ¹ Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg im Breisgau; ² Basell Sales & Marketing Company B.V., German branch, Frankfurt a. M.; ³ 2RPS Mechatronic GmbH, Ottobrunn	6
[BILLARD] Bioinspiriertes Polymer-basiertes Depot zur Verlängerung der Wirksamkeit von Medikamenten gegen Gefäßerkrankungen der Netzhaut Plura, J. (V) ¹ ; Vetyškova, V. (V) ² ; Bucher, F. ¹ ; Weber, W. ² ¹ Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg; ² Leibniz Institut für Neue Materialien, Saarbrücken	8
[BioTrans] Wissens- und Technologietransfer bioinspirierter Lösungsansätze in Industrie und Gesellschaft Erb, R. (V) ¹ ¹ BIOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V., Berlin	9
[CarBoMD] Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration Gryshchuk, O. (V) ¹ ; Thavathilakarajah, D. (V) ² ¹ Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen; ² Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen	11
[DeDrug-Bio] Abbau von Arzneimittelnrückständen in Abwässern durch autarke, biohybride Filtersysteme Specht, U. (V) ¹ ; Heusinger von Waldegge, T. ¹ ; Nguyen, V.D. ² ; Mutz, D. ³ ; Menzel, H.-L. ³ ; Stricker, B. ⁴ ; Kohlgrüber, V. ⁴ ¹ Fraunhofer IFAM, Bremen; ² SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz; ³ hanseWasser Bremen GmbH; ⁴ Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart	13
[HEAL-X Bioink] Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting Schmidt, I. ¹ ; Arefaine, E. ¹ ; Richthof, P. ² ; Thummaraj, T. ³ ; Blaeser, A. ² ; Gačanin, J. ³ ; Weil, T. ³ ; Hartmann, H. (V) ¹ ¹ NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut, Reutlingen; ² Technical University of Darmstadt; ³ Max Planck Institute, Mainz	15
[OSTEOFUNK] Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie Nolte, N. (V) ¹ ¹ Fraunhofer IFAM, Bremen	17
[PLackLoS] Pulverlack mit Lotus-Effekt - Selbstausbildend, Superhydrophob, Schmutzabweisend Sievers, E.-U. (V) ¹ ; Lautenschläger, D. ² ¹ eiffo eG, Aichtal; ² D.O.K. Chemie GmbH, Kierspe	19
[Pinguin 2] Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik Leubner, H. ¹ ; Binzer, J. ¹ ; Langner, M. ¹ ; Wehrspohn, R. ² ; Izidoro-Santos, M. ² ; Lelonek, M. ³ ; Schmelzer, C. ⁴ ; Hirsch, U. ⁴ ; Martins-Schalinski, J. ⁴ ; Friedmann, A. (V) ⁴ ¹ BinNova Microfiltration GmbH, Rudolstadt; ² Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale); ³ Smart Membranes GmbH, Halle (Saale); ⁴ Fraunhofer IMWS, Halle (Saale)	21
[ProBand] Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben Junior, V. (V) ¹ ¹ phoenix GmbH & Co. KG, Munich	23
[SATORIS] Superamphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme Friedrichs, J. (V) ¹ ¹ Leibniz Institute of Polymer Research Dresden	26

[SELF-X-FOR-IMPLANTS] Hydratisierte Polyelektrolyt-Multilayer-Architekturen mit Self-Healing Potential für die Implantologie	28
Witt, C. (V) ¹ ; Bader, R. ² ; Börke, J. ³ ; Grafahrend, D. ⁴ ; Hartmann, A. ¹ ; Henke, P. ² ; Hildebrand, G. ³ ; Liebelt, M. ¹ ; Liefeth, K. ³ ; Oberbach, T. ¹ ; Rothe, H. ³ ; Thiele, D. ² ; Wiemer, K. ⁴	
¹ Mathys Orthopädie GmbH, Mörsdorf; ² Orthopädische Klinik und Poliklinik, Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie, Universitätsmedizin Rostock (UMR), 18057 Rostock; ³ Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., 37308 Heilbad Heiligenstadt; ⁴ Hemoteq AG, 52146 Würselen	
Poster	<u>30</u>
[Adaptribo-2] Adaptive Strukturbildung unter tribologischer Belastung von Antriebskomponenten aus sortenreinen Kompositen	31
Jaeger, R. (V) ¹ ; Licht, E. ² ; Steer, P. ³	
¹ Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg im Breisgau; ² Basell Sales & Marketing Company B.V., German branch, Frankfurt a. M.; ³ 2RPS Mechatronik GmbH, Ottobrunn	
[BILLARD] Bioinspirierte flüssige Proteinmaterialien als selbstregulierendes Depot für anti-VEGF Medikamente	32
Bucher, F. ¹ ; Plura, J. ¹ ; Vetyškova, V. ² ; Weber, W. ²	
¹ Universitätsklinikum Freiburg; ² Leibniz Institut für Neue Materialien, Saarbrücken	
[BioTrans] Wissens- und Technologietransfer bioinspirierter Lösungsansätze in Industrie und Gesellschaft	33
Meyer, D. (V) ¹	
¹ Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V., Hilden	
[CarBoMD] Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration	34
Gryshchuk, O. (V) ¹	
¹ Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University	
[DeDrug-Bio] Abbau von Arzneimittelrückständen in Abwässern durch autarke, biohybride Filtersysteme	35
Specht, U. (V) ¹ ; Heusinger von Waldegge, T. ¹ ; Kohlgrüber, V. ² ; Menzel, H. ³ ; Micke, M. ⁴ ; Mutz, D. ³ ; Nguyen, V.D. ⁵ ; Stricker, B. ²	
¹ Fraunhofer IFAM, Bremen; ² Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg, Stuttgart; ³ hanseWasser Bremen GmbH; ⁴ MARTIN Membrane Systems AG, Dortmund; ⁵ SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz	
[HEAL-X Bioink] Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting	36
Richthof, P. (V) ¹ ; Schmidt, I. ² ; Arefaine, E. ² ; Thummaraj, T. ³ ; Gačanin, J. ³ ; Weil, T. ³ ; Hartmann, H. ² ; Blaeser, A. ¹	
¹ Technische Universität Darmstadt; ² NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen; ³ Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz	
[OSTEOFUNK] Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie	37
Nolte, N. (V) ¹ ; Sprecht, U. ¹ ; Gätjen, L. ¹ ; Grom, S. ² ; Braun, S. ² ; Klein, V. ² ; Hofzumahaus, N. ³ ; He, C. ³ ; Borchertding, K. ¹ ; Wolfram, T. ²	
¹ Fraunhofer IFAM, Bremen; ² KLS Martin SE & Co. KG, Mühlheim an der Donau; ³ cleanLASER, Herzogenrath	
[PLackLoS] Pulverlack mit Lotus-Effekt - Selbstausbildend, Superhydrophob, Schmutzabweisend	38
Sievers, E.-U. (V) ¹ ; Grigoriev, D. ²	
¹ eiffo eG, Aichtal; ² Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung, Potsdam	
[Pinguin2] Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik	39
Leubner, H. ¹ ; Binzer, J. ¹ ; Langner, M. ¹ ; Wehrspohn, R. ² ; Izidoro-Santos, M. ² ; Lelonek, M. ³ ; Schmelzer, C. ⁴ ; Hirsch, U. ⁴ ; Martins-Schalinski, J. ⁴ ; Friedmann, A. (V) ⁴	
¹ BinNova Microfiltration GmbH, Rudolstadt; ² Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale); ³ Smart Membranes GmbH, Halle (Saale); ⁴ Fraunhofer IMWS, Halle (Saale)	
[ProBand] Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben	40
Hübner, C. (V) ¹ ; Krohn, J. (V) ²	
¹ Fraunhofer ICT, Pfinztal; ² Fraunhofer LBF, Darmstadt	
[SATORIS] Superamphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme	41
Friedrichs, J. (V) ¹	
¹ Leibniz Institute of Polymer Research Dresden	

Börke, J.M. (V)¹; Witt, C. (V)²; Liebelt, M.²; Oberbach, T.²; Grafahrend, D.³; Thiele, D.⁴; Bader, R.⁴; Rothe, H.¹; Liefelth, K.¹

¹Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., Heilbad Heiligenstadt; ²Mathys Orthopädie GmbH, Mörsdorf; ³Hemoteq AG, Würselen;

⁴Orthopädische Klinik und Poliklinik, Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie, Universitätsmedizin Rostock (UMR)

Begleitworte

Vorwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Liebe Leserin, lieber Leser,

mit wenigen Bausteinen und minimalem Energieaufwand hat die Natur Unglaubliches geleistet - sie hat in einem Jahrmillionen dauernden Prozess, der Evolution, hocheffiziente und angepasste Strukturen und Funktionalitäten hervorgebracht. Sie dienen der Wissenschaft heute zunehmend als Ideengeber für innovative Materialsysteme. Diese systematische Anwendung biologischen Wissens auf technische Systeme verstehen wir als „Biologisierung der Technik“. Die „Bioinspiration“, als Teilgebiet der Biologisierung, bezeichnet einen Prinzipientransfer, der ein grundlegendes Verständnis der Vorgänge in biologischen Systemen erfordert und deren abstrahierende Übertragung auf technische Anwendungen beschreibt.

Die Vorteile bioinspirierter Ansätze liegen auf der Hand: Sie ermöglichen nicht nur die Verbesserung bestehender Materialien, sondern führen auch zu völlig neuen Lösungen, die den Anforderungen der modernen Gesellschaft an Leistungsfähigkeit, Effizienz und Nachhaltigkeit gerecht werden und traditionellen Ansätzen oft weit überlegen sind. Gerade in der Materialforschung eröffnen bioinspirierte Konzepte herausragende Innovationspotenziale. Von flexiblen und gleichzeitig stabilen Strukturen bis hin zu selbstheilenden Materialien - die Beispiele für bioinspirierte Entwicklungen sind vielfältig. So war der Farbwechsel des Chamäleons Inspirationsquelle für die Entwicklung von Strukturtinten für den 3D-Druck, deren Farbe dynamisch veränderbar ist, Muskeln und Tentakel dienen in der Softrobotik als Vorbild für Materialien, die durch Anlegen einer elektrischen Spannung eine mechanische Bewegung ausführen, und das Wissen über den Aufbau und die Struktur von Fischschuppen hat bereits zur Entwicklung widerstandsfähiger Schutzmaterialien beigetragen.

Neben der Möglichkeit, innovative Produkte auf den Markt zu bringen, können bioinspirierte Materialien und Technologien deutsche Unternehmen bei der Umstellung auf eine nachhaltigere Produktion unterstützen. Energieeffizientere Fertigungsmethoden, Materialeinsparungen, beschleunigte Prozesse - all dies führt zu Kostensenkungen und trägt dazu bei, die von Politik und Gesellschaft zunehmend geforderten Anforderungen in puncto Nachhaltigkeit zu erfüllen. In einem zunehmend globalen und wettbewerbsintensiven Umfeld ist dies entscheidend, um die Zukunftsfähigkeit unserer Wirtschaft zu sichern und sie gleichzeitig umweltverträglicher und widerstandsfähiger gegenüber Krisen zu gestalten. Damit kann sich Deutschland als Vorreiter im Bereich grüner Technologien positionieren.

Um die Potenziale der Biologisierung voll ausschöpfen zu können, ist eine gezielte Förderung entsprechender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten unerlässlich. Vor diesem Hintergrund hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Kontext einer langfristig angelegten Initiative im Oktober 2022 eine Förderrichtlinie zum Thema „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“ veröffentlicht. Im Rahmen dieser Ausschreibung werden 12 innovative und interdisziplinär aufgestellte Verbundprojekte mit Partnern aus Forschung und Industrie gefördert. Sie zielen darauf ab, biologische Prinzipien in abstrahierter Form für die Erforschung und Entwicklung neuer Lösungsansätze zu nutzen und deren Potenzial für die industrielle Umsetzung zu validieren.

Pinguinfasern, Bandscheiben, Schwämme oder die natürliche Knochenstruktur – das sind nur einige Beispiele für natürliche Vorbilder, die den Projekten als Blaupause für ihre materialwissenschaftliche Forschung dienen. Daraus abgeleitet werden neue Ansätze erforscht, bei denen superhydrophobe Oberflächen und hierarchische Strukturierungen ebenso im Fokus stehen wie selbstregulierende Materialien, zum Beispiel selbstheilende oder selbstreinigende Oberflächen, aber auch adaptive, programmierbare Dämpfungsmaterialien.

Der vorliegende Konferenzband zur 1. Statuskonferenz stellt die geförderten Projekte der Fördermaßnahme „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“ vor und präsentiert erste Ergebnisse. Lassen Sie sich inspirieren und überzeugen Sie sich selbst von der transformativen Kraft der Biologisierung der Technik für den Fortschritt unserer Gesellschaft und Wirtschaft!

Referatsleiter, Referat 523 - Werkstoffinnovationen; Hereon
Peter Hassenbach

So geht Zukunft: Biologisierung der Technik

Liebe Projektbeteiligte der Fördermaßnahme Biologisierung der Technik,
liebe Interessierte,

Biologisierung der Technik bedeutet, Materialien, Strukturen und Prinzipien der belebten Natur in der Technik zu nutzen, um eine nachhaltige Wertschöpfung zu erreichen. Durch das Zusammenbringen von Natur und Technik öffnet sich ein grenzenloser Raum für Innovationen, neue Materialien und Werkstoffe.

Wie können Unternehmen mit Hilfe biologisierter Technik zukunftsweisende Innovationspotenziale freisetzen, ihre Wertschöpfungsprozesse optimieren und gleichzeitig mit Nachhaltigkeitsperspektive aufladen? Wie können Forschende auf Basis von Prinzipien der Natur neue, kreative Innovationsgrundlagen schaffen? Die in diesem Band vorgestellten Projekte der BMBF-Fördermaßnahme „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“ geben Ihnen wertvolle Einblicke in mögliche Wege.

Im Zentrum aller geförderten Verbundprojekte steht die Material- und Werkstoffforschung, die auf eine Vielzahl bioinspirierter Ansätze setzt: von der Oberflächenfunktionalisierung mit superhydrophoben Eigenschaften über hierarchische Strukturen bis hin zur Integration selbstregulierender Prinzipien. Die adressierten Anwendungsfelder reichen dabei von der Medizin(technik), Implantologie und Pharmazie über Automobiltechnik und Automatisierung bis hin zu Optik, Abwasser- und Lackiertechnik.

Stellen Sie sich eine Welt vor, in der Materialien lernen, sich zu heilen, zu wachsen und sich an verändernde Bedingungen anzupassen – genau wie es die Natur seit Millionen von Jahren macht. Solche bioinspirierten Innovationen können nicht nur multifunktionale Lösungen bieten, sondern auch den Weg zu ressourcenschonenden Konzepten ebnen – in einer Zeit, in der Rohstoffe zunehmend knapp werden. Gemeinsam möchten wir eine Zukunft gestalten, in der technologische Innovation und Natur Hand in Hand gehen, um nachhaltige und zukunftsfähige Lösungen zu schaffen.

In den geförderten Projekten forschen und entwickeln interdisziplinäre Teams aus Wissenschaft und Wirtschaft gemeinsam. Diese Kooperationen aus verschiedenen natur- und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen bilden das Herzstück der Fördermaßnahme. BioTrans, das wissenschaftliche Begleitprojekt von BLOKON, DGM und DGO, organisiert und gestaltet aktiv den Wissens- und Technologietransfer, um den Erfolg dieser vielversprechenden Ansätze zu maximieren, damit aus den biologischen Vorbildern schlussendlich zukunftsweisende Technologien entstehen.

In dieser ersten Statuskonferenz der Fördermaßnahme haben Sie die Gelegenheit, die Fortschritte der Projekte zu reflektieren, sich mit anderen Projektbeteiligten auszutauschen, neue Partnerschaften zu knüpfen und Synergien zu entdecken, um gemeinsam die Vision einer nachhaltigen, biologisierten Zukunft voranzutreiben.

Wir von BioTrans freuen uns auf den intensiven Austausch und darauf, mit Ihnen gemeinsam die Brücke zwischen Natur und Technik weiter auszubauen und dabei nicht nur wissenschaftliche und wirtschaftliche, sondern auch gesellschaftliche Wirkung zu erzielen.

Im Namen des BioTrans-Projektteams
Dr. Rainer Erb
Geschäftsführer BLOKON

Präsentationen

Adaptribo-2: Adaptive Strukturbildung unter tribologischer Belastung von Antriebskomponenten aus sortenreinen Kompositen

R. Jaeger^{1*}, P. Steer², E. Licht³

¹Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, ²2RPS Mechatronic GmbH, ³Basell Sales & Marketing Company B.V., German Branch

*raimund.jaeger@iwf.fraunhofer.de

Kunststoffe spielen als Werkstoffe für Antriebssysteme eine zunehmend bedeutende Rolle. Hinsichtlich ihrer Einzeleigenschaften weisen sie gegenüber Metallen Vorteile auf: sie haben beispielsweise eine hohe Korrosionsbeständigkeit und wirken sich wegen ihrer Dämpfungseigenschaften positiv auf „noise, vibration, harshness“ aus. Ein wesentliches Argument für die Wahl von Kunststoffen als Werkstoffe der Antriebstechnik ist jedoch, dass diese potenziell nachhaltiger als andere Werkstoffe sind: wegen ihres geringen Gewichts tragen sie zu Leichtbaulösungen bei, die den Energiebedarf zur Beschleunigung von Komponenten reduzieren. Insbesondere Polyolefine sind „low carbon footprint materials“: sie können hoch energieeffizient hergestellt werden, der Energiebedarf und CO₂ – Fußabdruck ist verglichen mit Metallen oder Keramiken gering. Im Vergleich zu anderen Kunststoffen schneiden Polyethylen und Polypropylen in LCA-Analysen besser ab¹. Ein kritischer Punkt ist jedoch die Eignung von technischen Kunststoffen für eine zirkuläre Ökonomie. Für die zirkuläre Wirtschaft wird zum einen eine möglichst lange und intensive Nutzung von Gütern angestrebt – dies erfordert robuste und verschleißbeständige Komponenten mit einer langen Lebensdauer. Zum anderen sollen die Komponenten nach Ende der Lebensdauer des Produkts recycelt werden können. Für technische Kunststoffe stellt dies einen Zielkonflikt dar: Die für ihren Einsatz notwendige Festigkeit und Verschleißbeständigkeit der Kunststoffkomponenten wird in der Regel durch Zusatz von verstärkenden Partikeln oder Fasern erreicht. Komposite sind jedoch schwierig zu recyceln: hierzu müsste die Kunststoffmatrix von der verstärkenden Phase getrennt werden, was sehr aufwändig oder in vielen Fällen unmöglich ist. Dieser Zielkonflikt lässt sich lösen, wenn Matrix und verstärkende Phase des Komposits aus demselben Polymer bestehen, ein sogenannter „sortenreiner Komposit“: dann erübrigt sich die Trennung der Komponenten.

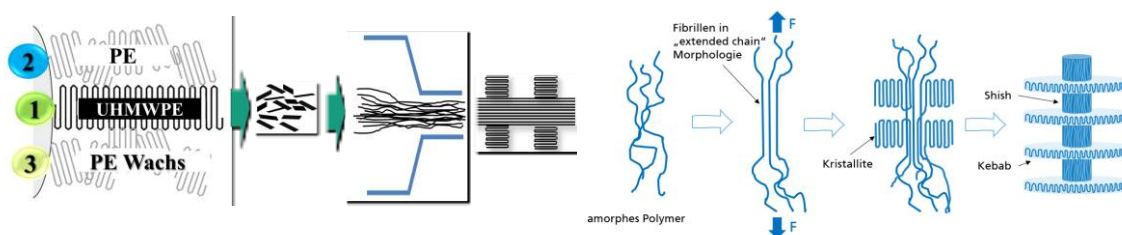


Abbildung 1: Links: Synthese von Reaktorblends durch einen Mehrzentren-Katalysator, rechts: Ausbildung von verstärkenden Shish-Kebab Strukturen

Die Entwicklung einer neuen Klasse von sortenreinen Polyolefinkompositen (all-hydrocarbon-composites, „all-HC“) durch das Freiburger Materialforschungszentrum und LyondellBasell bietet neue Perspektiven für die Entwicklung mechanisch robuster und gleichzeitig wiederverwertbarer Kunststoffbauteile^{2,3}. Durch eine Mehrzentrenkatalyse gelang es, sogenannte Reaktorblends mit einer breiten Molekulargewichtsverteilung von eher niedermolekularem PE über PE mittleren Molekulargewichts (HDPE) bis hin zu unverschlaufftem UHMWPE herzustellen. Diese sortenreinen Polyethylenkomposite können mit gängigen Verfahren (z.B. Spritzguss) verarbeitet werden und sind mehrfach ohne Qualitätseinbußen recycelfähig⁴. Treten während der Verarbeitung Scherströmungen auf, wird die ultrahochmolekulare Fraktion zu Fibrillen verstreckt, es bildet sich ein hochfester „molekularer Komposit“ (Abb. 1 rechts).

Diese Orientierung führt zu einer Selbstverstärkung: All-HC können mechanische und tribologische Kennwerte erreichen, die die Kennwerte von gewöhnlichem Polyethylen (HDPE) um ein Mehrfaches

übertreffen⁵. Im Projekt „AdapTribo“ des Ideenwettbewerbs „Biologisierung der Technik“ wurde vom Fraunhofer-IWM, 2RPS und LyondellBasell untersucht, ob sich diese verstärkenden Strukturen auch im Reibkontakt ausbilden können: ist es möglich, dass sich ein Kunststoff (ähnlich wie lebendiges Gewebe) Belastungen anpasst, um diesen besser widerstehen zu können? Dies konnte nachgewiesen werden: Im Reibkontakt bildeten sich im Stift-Scheibe-Tribometer die verstärkenden Fibrillen, die mit Rasterelektronenmikroskopie als Shish-Kebab-Strukturen sichtbar gemacht werden konnten.

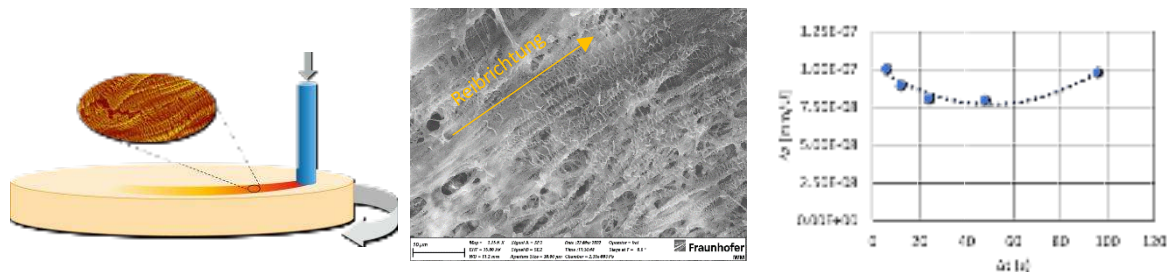


Abbildung 2: Links: Strukturbildung im Stift-Scheibe-Tribometer, Mitte: Shish-Kebab-Strukturen in Reibrichtung, rechts: minimaler Verschleiß durch optimierte alternierende Belastung im Ring-Scheibe-Tribometer

Die durch thermische und tribologische Belastungen induzierte Strukturbildung im Reibkontakt führt zu einer Erhöhung der Verschleißbeständigkeit – es tritt eine tribologisch induzierte Selbstregulierung des Polymers auf⁶.

Im Projekt AdapTribo-2 soll untersucht werden, wie diese Strukturbildung in realen technischen Systemen am Beispiel einer Verzahnung (Zahnrad-Zahnrad) initiiert und genutzt werden kann. Die tribologischen Belastungsbedingungen sind in realen technischen Systemen in der Regel komplexer als in den bisher durchgeführten tribologischen Modellexperimenten. Hinzu kommt, dass reale Systeme häufig geschmiert sind – daher muss die Schmierstoffverträglichkeit der Reibpartner berücksichtigt werden, und im Fall der tribologisch selbstregulierenden All-HC der Einfluss des Schmierstoffs auf die Strukturbildung. Hier bieten die Reaktorblends möglicherweise weitere Vorteile: Im Gegensatz zu Poly(amiden) und Poly(oxymethylen) ist der Einsatz von Poly(olefinen) in wässrigen Medien oder polaren Schmierstoffen unproblematisch: eine Quellung tritt nicht auf.

Lyondellbasell wird mittels der Entwicklung maßgeschneiderter Katalysatoren neue Reaktorblends mit verbesserten tribologischen Eigenschaften synthetisieren. Hierzu muss ein optimaler Kompromiss zwischen hohem UHMWPE-Anteil eines Reaktorblends und dessen Eignung für extrusionbasierte Verarbeitungsmethoden gefunden werden. Das Fraunhofer IWM wird in tribologischen Modellexperimenten den Belastungskorridor ermitteln, in dem sich die verstärkenden Strukturen ausbilden können, dies in Abhängigkeit verschiedener Reibpartner und Schmierungsbedingungen: welche Pressungen und Gleitgeschwindigkeiten sind nötig, um die verstärkenden Strukturen zu erzeugen, ab wann wird das System überlastet, so dass die Strukturen wieder zerstört werden? Wie wirken sich Spreitungsneigung und Viskosität des Schmierstoffs und Temperaturmanagement durch den Schmierstoff auf die Strukturbildung aus? 2RPS wird einen Komponentenprüfstand aufbauen, in dem die tribologische Belastungssituation einer Verzahnung – ein Linienkontakt mit definierter Pressung und Schlupf der Reibpartner – nachgestellt und unter verschiedenen thermischen und Schmierungsbedingungen untersucht werden kann.

Quellen

- [1] MD Tabone, JJ Cregg, EJ Beckman, AE Landis; Environ Sci Technol, **2010**, 44, 8264–8269.
- [2] F Zhong, J Schwabe, D Hofmann, J Meier, R Thomann, M Enders, R Mülhaupt; Polymer, **2018**, 140, 107–116.
- [3] M Stürzel, S Mihan, R Mülhaupt; Chemical reviews, **2016**, 116, 1398–1433.
- [4] T Hees, F Zhong, M Stürzel, R Mülhaupt; Macromolecular rapid communications, **2019**, 40, 1800608.
- [5] T Hees, F Zhong, C Koplin, R Jaeger, R Mülhaupt; Polymer, **2018**, 151, 47–55.
- [6] S Seif; Tribology of All-Hydrocarbon-Composites, MSc Thesis, Paris, **2023**.

BILLARD: Bioinspiriertes Polymer-basiertes Depot zur Verlängerung der Wirksamkeit von Medikamenten gegen Gefäßerkrankungen der Netzhaut

J. Plura¹, V.Vetýšková³, F. Bucher¹, W. Weber^{2,3,4}

¹Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg

²University of Freiburg, Faculty of Biology and Signalling Research Centres BIOSS and CIBSS

³INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien

⁴Department of Materials Science and Engineering, Saarland University, Campus D2 2

BILLARD adressiert die Therapie von Gefäßerkrankungen der Netzhaut - die Hauptursache für Sehverschlechterung in Industrieländern. Aktuell werden diese Erkrankungen durch die Injektion sogenannter VEGF Inhibitoren direkt in den Glaskörper des Auges behandelt. Diese Injektionen müssen alle 4-8 Wochen wiederholt werden, was einerseits eine hohe Belastung für die Patient:innen und andererseits ein wiederholtes Risiko für Komplikationen darstellt. Aus diesem Grund gibt es einen hohen Bedarf an therapeutischen Möglichkeiten, die längere Injektionsintervalle ermöglichen. Abhilfe könnte hier eine Depotformulierung schaffen, die über die Zeit das Medikament freisetzt. In BILLARD werden wir ein bioinspiriertes Depotkonzept für zugelassene VEGF Inhibitoren entwickeln. Das Konzept ist inspiriert von dem Mechanismus, mit dem in der Natur Proteine aus einem natürlichen, Polymer-basierten Depot über die Zeit freigesetzt werden und somit eine verlängerte Wirkungsdauer erreichen. Wir werden diese Depotformulierungen auf am Markt befindliche VEGF Inhibitoren anwenden und deren Wirksamkeit über die Zeit sowohl in Zellkultur als auch in Mausmodellen für retinale Gefäßerkrankungen evaluieren. Diese neue Formulierung hat einerseits das Potential, die Behandlung von Patient:innen mit Gefäßerkrankungen des Auges zu verbessern. Andererseits kann durch die neue Formulierung von Medikamenten mit abgelaufenem Patent wieder Patentschutz erlangt werden. Dies bietet sowohl Original- als auf Generika-Herstellern in Deutschland neue Möglichkeiten, in dem attraktiven Marktsegment der anti-VEGF Therapien ihre Marktposition zu verbessern.

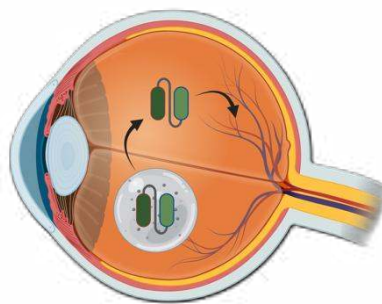


Abbildung 1. Verzögerte Freisetzung von anti-VEGF Wirkstoffen aus einem bioinspirierten Depot. Quellenangabe: Created with BioRender.com

BioTrans: Wissens- und Technologietransfer bioinspirierter Lösungsansätze in Industrie und Gesellschaft

Dr. Rainer Erb^{1*}, Jessica Rudolph¹, Dr. Stefan Klein², Andreas Abel², Dr. Daniel Meyer³, Sabine Groß³

¹ BLOKON – Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V., ² DGM – Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., ³ DGO – Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V.

*BioTrans@biologisierung-der-technik.de

Zukunft braucht technische Innovationen. Doch laut Innovationsindikator 2024 des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) hinkt Deutschlands Innovationskraft [1]. Eine Chance, diesen Trend umzukehren, liegt in der Biologisierung der Technik – ein Ansatz basierend auf Bioinspiration, der in den letzten Jahren von einer Vielzahl von Autor*innen beleuchtet wurde [2-5]. Denn die Natur liefert dazu einen nahezu grenzenlosen Pool an Vorbildern. Wie die Biologisierung der Technik funktioniert und bioinspirierte Lösungsansätze im Bereich der Material- und Werkstoffforschung den Forschungs- und Industriestandort Deutschland voranbringen, untersucht das wissenschaftliche Verbundprojekt „BioTrans“. Im besonderen Fokus stehen dabei der Wissens- und Technologietransfer im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“. Die BioTrans-Projektpartner BLOKON, DGM und DGO verfügen zusammen über eine hohe, gebündelte Sachkompetenz sowie ein großes industrielles und akademisches Netzwerk in den mit der Fördermaßnahme adressierten Themenfeldern.

Ziele der Begleitforschung sind das Herausarbeiten und Multiplizieren von Innovations- und Nachhaltigkeitspotenzialen einer biologisierten Technik. BioTrans vernetzt dazu die einzelnen Förderprojekte, unterstützt die Innovationsprozesse – zum Beispiel durch Aufbereiten und Bündeln der erzielten Forschungsergebnisse sowie Identifizieren neuer wissenschaftlicher Fragestellungen – und trägt dazu bei, die Forschungsergebnisse in eine nachhaltige Wertschöpfung zu überführen. Eine intensive Öffentlichkeitsarbeit für die Fördermaßnahme und die FuEul-Verbundprojekte unterstützt den Wissens- und Technologietransfer.



Abbildung 1. „Biologisierung der Technik“ als Treiber und Gestalter der Transformation: Durch das Zusammenbringen von Natur und Technik öffnet sich ein grenzenloser Raum für Innovationen, neue Materialien und Werkstoffe. (Quelle: Peach_iStock)

Durchgeführt werden dafür unter anderem drei Statuskonferenzen und es werden Themenkreise zu übergreifenden Themen angeboten. Jedes einzelne Projekt der Fördermaßnahme wird bei zwei bis drei Projektmeetings unterstützt, um den direkten Informationsabgleich mit den verschiedenen Projekten

zu befördern, Synergien zu anderen Projekten zu identifizieren und bezüglich eventueller Hürden bei der Umsetzung zu beraten. Zum Abschluss der Fördermaßnahme veranstaltet BioTrans einen großen, öffentlichkeitswirksamen Kongress, um die Projektergebnisse zu bioinspirierten Materialien und Werkstoffen sichtbar zu machen sowie den Kreis der an Biologisierung der Technik interessierten Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zu erweitern.

Die Transferaktivitäten zielen darauf ab, insbesondere für KMU und Start-ups inner- und außerhalb der Fördermaßnahme den Zugang zu den erzielten Projektergebnissen zu erleichtern. In umfangreichen Recherchen werden daher aktuelle Entwicklungen am Markt analysiert. BioTrans begeistert auch junge Menschen für die Biologisierung der Technik: dabei werden sowohl Doktorand*innen und Nachwuchswissenschaftler*innen als auch Schüler*innen und Studierende adressiert. In Veranstaltungen wie Future-Meetings, Summer Schools bis hin zu Nachwuchspreisen und - Wettbewerben werden die Fachkräfte der Zukunft motiviert.

Die Projektpartner analysieren die Entwicklung und Hebelwirkung der Projektergebnisse und schätzen den Impact der entwickelten Technologien beispielsweise hinsichtlich Umweltverträglichkeit oder Rezyklierbarkeit ab. Die Anwendungsbeispiele werden als Good Practices für die Kommunikation genutzt, um weitere Anwender vom Potenzial biologisierter Technik zu überzeugen.

Die Forschungsergebnisse werden für unterschiedliche Zielgruppen aufbereitet und in Bezug auf ihre Bedeutung für Industrie und Gesellschaft dargestellt. Mittels einer eigenen Website, zielgruppenspezifischen Informationsmaterialien und Veranstaltungen präsentiert und multipliziert BioTrans die Ergebnisse sowohl fördermaßnahmenintern als auch öffentlichkeitswirksam nach außen.

Quellen

- [1] Bundesverband der deutschen Industrie e.V., *Innovationsindikator*, **2024**, 1-60.
- [2] G. Bryne, D. Dimitrov, L. Monostori, R. Teti, F. van Houten, R. Wertheim *Biologicalisation: Biological Transformation in Manufacturing*, **2018**, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 21, 1-32.
- [3] P. Dieckhoff, R. Möhlmann, J. van Ackeren *Biologische Transformation und Bioökonomie*, **2018**, *Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.*, 1-68.
- [4] T. Marzi, V. Knappertsbusch, A. Marzi, S. Naumann, G. Deerberg, E. Weidner, *Fragen zu einer biologischen Technik*, **2018**, *UMSICHT-Diskurs* 2, 1-114.
- [5] P. Fratzl, K. Jacobs, M. Möller, T. Scheibel, K. Sternberg, *Materialforschung: Impulsgeber Natur, Innovationspotenzial biologisch inspirierter Materialien und Werkstoffe*, **2019**, *acatech DISKUSSION*, 1-140.

CarBoMD: Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration

O. Gryshchuk^{1*}, D. Thavathilakarjah², P. Shettigar², M. Y. Cervantes Gonzales³, B. Nalbant³, H. Jahr^{2,3}, C. Emonts¹

¹Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA), Aachen

²Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen (SLA), Aachen

³Institut für Anatomie und Zellbiologie der RWTH Aachen (ANATZ), Aachen

*oleksandr.gryshchuk@ita.rwth-aachen.de

Weltweit gehört Arthrose zu den häufigsten degenerativen Erkrankungen am Gelenk, die eine allmähliche Beschädigung des Gelenkknorpels initiieren und die subchondrale Knochenschicht beeinträchtigen. Neben Sportunfällen können Übergewicht, unverhältnismäßige körperliche Aktivität bzw. Inaktivität oder Fehlbelastungen der Gelenke bei genetisch verursachten Fehlstellungen mögliche Risikofaktoren für Arthrose sein. Zudem steigt mit zunehmendem Alter das Risiko zur Erkrankung durch Arthrose erheblich. In Deutschland leidet jeder fünfte Erwachsene, wobei ungefähr 50 % aller Frauen und ungefähr 30 % aller Männer ab 65 Jahren davon betroffen sind, an degenerativer Arthrose. Aufgrund des demografischen Wandels wird ein kontinuierlicher Anstieg der Arthroseprävalenz in Deutschland prognostiziert.[1]

Diese tiefen Knorpeldefekte, sogenannte osteochondrale Läsionen, betreffen die artikulierende Knorpel-Knochengrenze. Der Goldstandard besteht darin, die Läsionen mit autologen (körpereigenen) Knorpelknochentransplantaten zu behandeln. Hierzu werden aus einer weniger belasteten Stelle des Gelenks zylindrische Knochen-Knorpel-Stanzen entnommen und im Defektbereich eingesetzt. Die eingeschränkte Verfügbarkeit körpereigenen Materials, die unterschiedliche Dicke der Knorpelschicht zwischen Entnahme- und Implantationsstelle, sowie eine beträchtliche Morbidität an der Entnahmestelle, stellen aber große Nachteile dieser Behandlungsmethode dar.[2]

Um tiefe Knorpeldefekte (ICRS Grad 3-4) zu behandeln, soll im Rahmen dieses Verbundprojekts unter der Berücksichtigung der verschiedenen biologischen und mechanischen Eigenschaften von Knorpel (Cartilage) und Knochen (Bone) ein biphasisches, resorbierbares sowie poröses Medizinprodukt (Medical Device, MD) erforscht und evaluiert werden. Das Zwei-Phasen-Implantat soll die Knochenstruktur mit dem lasttragenden Bereich, die Übergangszone mit kalzifiziertem Knorpel sowie die Struktur mit fasrigem und glattem Knorpel nachbilden (siehe Abbildung 1). Hierbei liegt der Schwerpunkt in der biomimetischen Realisierung des Strukturaufbaus.[3]

Zur Nachbildung der Knochenstruktur werden poröse zylindrische Formen aus einer biokompatiblen und absorbierbaren Magnesiumlegierung additiv hergestellt. Für die Porosität der Metallstrukturen werden Gitterstrukturen aus vordefinierten Einheitszellen verwendet. Dazu werden verschiedene realisierbare Geometrien erforscht und anschließend die Metallstruktur des Implantats an den materialtechnischen Anforderungen des Knochens angepasst. Für eine biomimetische Auslegung des Implantats ist hierbei die Evaluierung des Degradationsverhaltens der Knochenphase von großer Relevanz.[4,5]

Als Knorpelersatzschicht werden Polycaprolacton (PCL) Nanofaservliesen mit Hydrogelen kombiniert und auf die Knochenphase beschichtet. Diesbezüglich werden im sogenannten Elektrospleinprozess aus einer Polymerlösung Nanofasern gesponnen und als Vlies auf die Metallstrukturen abgelegt. Darüber hinaus werden die Nanofaservliese geschichtet mit Hydrogelen versetzt, was die Struktur des Knorpels im Körper nachbildet und eine verbesserte Akzeptanz vom Körper gewährleistet. Der Einfluss der einzelnen Phasen auf die mechanischen Eigenschaften des Gesamtimplantats wird durch mechanische Tests und in präklinischen *ex-vivo* Versuchen evaluiert.

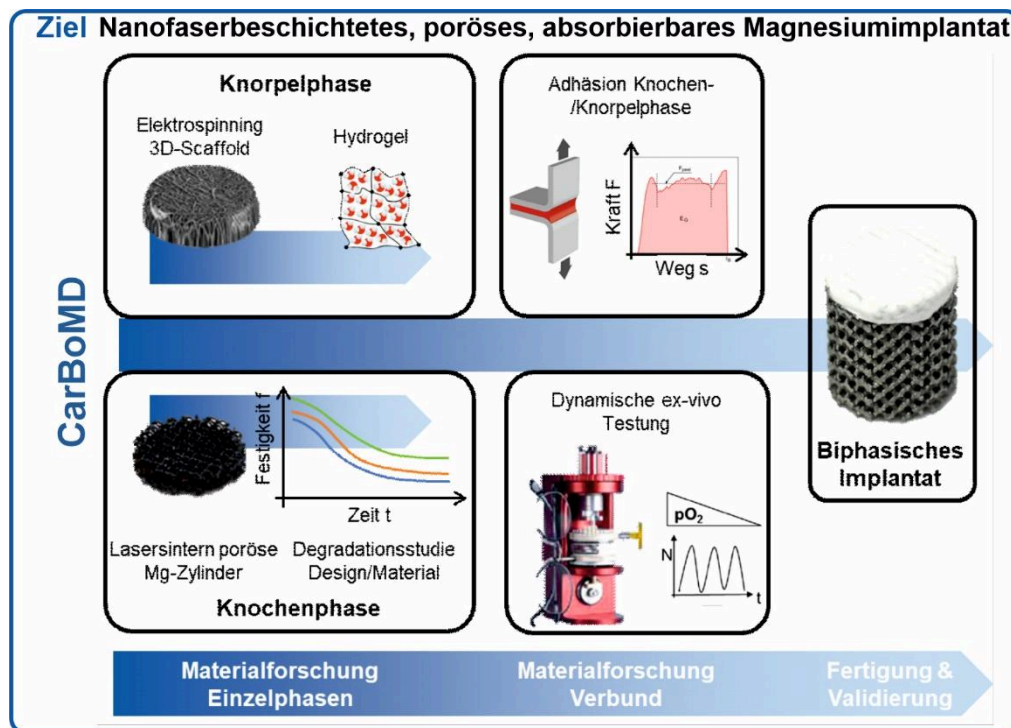


Abbildung 1. Übersichtsschema des CarBoMD-Projekts.

Für den Nachweis der mechanischen Integrität des Implantats sollen Kompressions- und Scherversuche durchgeführt und bewertet werden. Sowohl in den Einzelphasen als auch im Verbund sollen das Degradationsverhalten, die Biokompatibilität sowie die Zelldifferenzierung analysiert und evaluiert werden. Hierfür werden präklinische ex-vivo Untersuchungen unter Anwendung eines spezifisch entwickelten dynamischen Bioreaktors durchgeführt. Das neuartige, biphasische Implantat wird mittelfristig Folgeschäden und -operationen, und damit einhergehender Belastungen für Patienten und Kosten für das Gesundheitssystem, vermindern.[6]

Quellen

- [1] J. Fuchs, R. Kuhnert, C. Scheidt-Nave; 12-Monats-Prävalenz von Arthrose in Deutschland, *Journal of Health Monitoring*, **2017**, 2, 55-60.
- [2] Robert Koch-Institut; *Arthrose. Gesundheitsberichterstattung des Bundes*, **2013**, 54.
- [3] J. Verhaegen, S. Clockaerts, G.J.V.M. Van Osch, J. Somville, P. Verdonk, P. Mertens; *TruFit Plug for Repair of Osteochondral Defects-Where Is the Evidence? Systematic Review of Literature*, *Cartilage*, **2015**, 6, 12-19.
- [4] Y. Li, J. Zhou, P. Pavanram, M.A. Leeftang, L.I. Fockaert, B. Pouran, N. Tümer, K.-U. Schröder, J.M.C. Mol, H. Weinans, H. Jahr, A.A. Zadpoor; *Additively manufactured biodegradable porous magnesium*, *Acta Biomaterialia*, **2018**, 67, 378-392.
- [5] J. Bühring, M. Voshage, J.H. Schleifenbaum, H. Jahr, K.-U. Schröder; *Influence of Degradation Product Thickness on the Elastic Stiffness of Porous Absorbable Scaffolds Made from an Bioabsorbable Zn-Mg Alloy*, *Materials*, **2021**, 14, 1-14.
- [6] E.N. Yilmaz, D.I. Zeugolis; *Electrospun Polymers in Cartilage Engineering-State of Play*, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **2020**, 8, Artikel 77, 1-17.

DeDrug-Bio: Abbau von Arzneimittelrückständen in Abwässern durch autarke, biohybride Filtersysteme

V. D. Nguyen^{1*}, T. Heusinger von Waldegge², U. Specht², D. Mutz³, H.L. Menzel³, B. Stricker⁴, V. Kohlgrüber⁴, M. Micke⁵

¹SITEC Industrietechnologie GmbH; ²Fraunhofer IFAM; ³hanseWasser Bremen GmbH; ⁴Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS); ⁵Wilo SE

*duc.nguyen@sitec-technology.de

In Deutschland werden in der Humanmedizin über 2.300 Arzneimittelwirkstoffe mit geschätzten jährlichen Verbrauchsmengen von mehr als 30.000 Tonnen verkauft [1]. Die Arzneimittelwirkstoffe und deren Rückstände erreichen über Ausscheidungen die Kläranlagen. Dort werden sie jedoch nicht vollständig eliminiert und gelangen so in Gewässer, aber auch in das Grund- und Trinkwasser. Die Auswirkungen von Stoffen wie Diclofenac, Antiepileptika oder Röntgenkontrastmittel mit inhärentem (öko)toxikologischen Potenzial sind nicht vorhersehbar. Hormonähnliche Medikamente beeinflussen nachweislich das Verhältnis zwischen männlichen und weiblichen Fischpopulationen. Antibiotikarückstände führen zu antibiotikaresistenten Bakterien. Die Klimakrise verschärft den Druck auf die Ökosysteme und erhöht durch Trockenheit die Spurenstoffkonzentrationen. Die Trinkwasserqualität als ein zentraler, industrieller Standortfaktor, nicht bezifferbare Vorteile für die Wasserökologie und die Reaktion auf den „Besorgnisgrundsatz“ des Wasserhaushaltsgesetzes erfordern Lösungen. Daher hat sich die EU im Trilog im Januar 2024 für die Novellierung der Kommunalabwasserrichtlinie ausgesprochen. In der Neufassung ist eine verpflichtende Einführung einer vierten Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen (in Abhängigkeit der Einwohnerzahl) vorgesehen. Derzeit sind als vierte Reinigungsstufe überwiegend nachgeschaltete Verfahren mit Aktivkohle oder Ozon im Einsatz. Die Ozonerzeugung erfordert dabei einen hohen Energieeinsatz und die eingesetzte Aktivkohle wird meist aus fossilen Rohstoffen erzeugt, was die Verfahren insgesamt kostenintensiv macht und Fragen bezüglich der Nachhaltigkeit aufwirft.

Ziel des Projektes DeDrug-Bio ist daher, einen stabilen und selbstregenerierbaren Filter zu etablieren, der kostengünstig und emissionsarm einen selektiven Wirkstoffabbau ermöglicht. Bestimmte Mikroorganismen sind in der Lage, Spurenstoffe selektiv abzubauen. Inspiriert von den biologischen Filtern der Meere, den Schwämmen, sollen ausgewählte Mikroorganismen auf bioinspirierten Substraten fixiert werden (Abbildung 1.). Das Substratmaterial wird mittels Laser- und Oberflächentechnik funktionalisiert, um den Mikroorganismen einen stabilen Lebensraum zu bieten und sie vor einem Abtrag zu schützen. Ein selektiver Abbau von Spurenstoffen soll Rückhalteraten verbessern und Wirkungsgrade in den Kläranlagen erhöhen. Die Forschungsziele des Projektes umfassen die Auswahl und Nutzung von spezifischen Mikroorganismen (Fraunhofer IFAM), die Herstellung von Oberflächen zur Fixierung der Mikroorganismen (SITEC Industrietechnologie GmbH) und die Erweiterung bestehender Membranfilter in Kläranlagen zu biohybriden Filtern. Ein Versuchsdemonstrator wird gebaut, um das Konzept unter realen Anwendungsbedingungen in einer Kläranlage (hanseWasser Bremen GmbH) zu testen. Das interdisziplinäre Konsortium wird durch den assoziierten Filterhersteller Martin Systems GmbH und das Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg komplettiert.

Zunächst taxiert das Projekt einen exemplarischen Spurenstoff, um an diesem einen biohybriden Filter zu entwickeln. Dabei ist Diclofenac wegen der Persistenz und der hohen Umweltkonzentrationen eine besondere Herausforderung für Kläranlagen mit Zulaufkonzentrationen von ca. 2,8 µg/L und Abflusskonzentrationen von z.T. weiterhin über 2 µg/L [2,3]. Dabei sind ökotoxikologischen Schäden schon bei

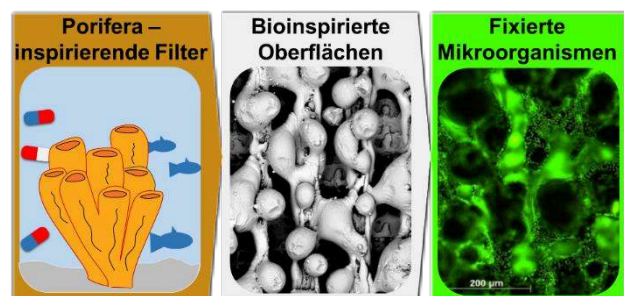


Abbildung 1. DeDrug-Bio: Selbstregenerierender, biohybrider Filter für Spurenstoffe, fixiert durch Mikroorganismen auf einem bioinspirierten technischen Substrat.

Konzentrationen von 0,4 µg/L evident [4], wobei die EU eine Umweltqualitätsnorm von 0,04 µg/L für die Oberflächengewässer diskutiert.

Die Abbaurrate für Diclofenac, in den zufällig arbeitenden Biozönosen, biologischer Reinigungsstufen der Kläranlagen beträgt nur etwa 30 % [2] und liegt für viele Medikamente deutlich niedriger (Abbildung 2.).

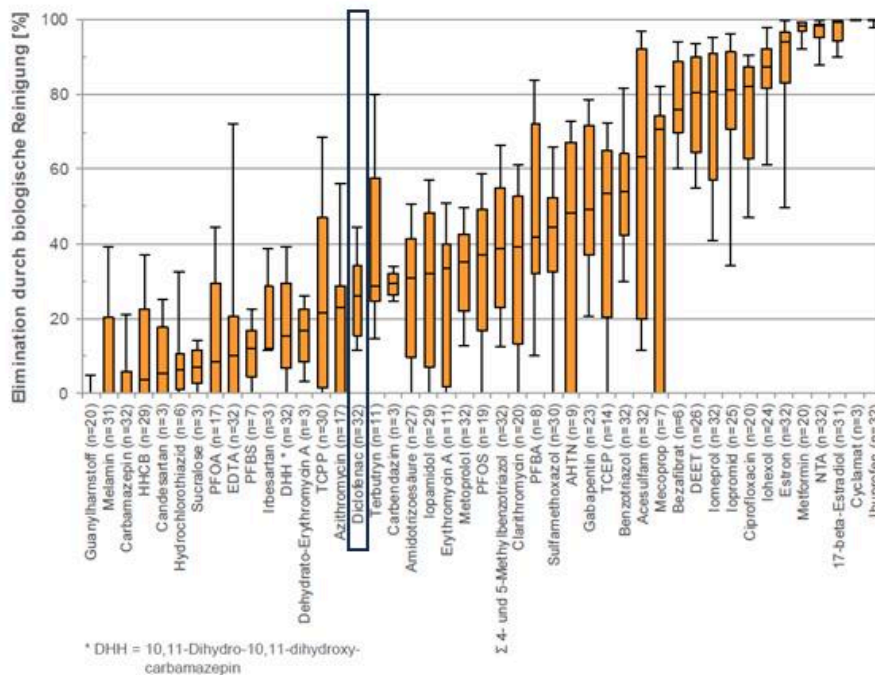


Abbildung 2. Elimination von Spurenstoffen durch biologische Reinigung in Kläranlagen (10 %- und 25 %-Quantil, Median, 75 %- und 90 %-Quantil); Diclofenac gekennzeichnet [2]

Gezielt Organismen auszuwählen, die bisher nur zufällig im Belebtschlamm vorkommen und einen Abbau – in dem Falle von Diclofenac – ermöglichen, sowie spezifische Filterhabitats zu kreieren sind die derzeitigen Herausforderungen des Projektes. Dabei sind spezifische Filterorganismen etwa *Achromobacter spanius* in der Lage Diclofenac vollständig abzubauen [5]. Um stabile Habitats zu entwickeln, werden geeignete Substratmaterialien mittels Oberflächentechnik modifiziert (Abbildung 3.).

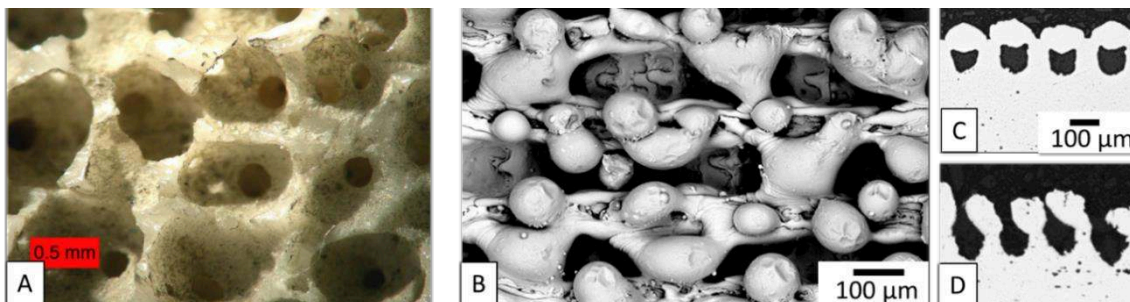


Abbildung 3. A: Von Schwämmen gebildetes, anorganisches, verzweigtes Netz von Poren und Kanälen, als stabiles Habitat für Mikroorganismen [1]; B: IFAM/ REM 2D-abstrahiertes laserinduziertes Netz von Poren und Kanälen, auf Metall, als stabiles Habitat für Organismen zur Wasserfiltration

Quellen

- [1] J. Werner, "Medikamente im Abwasser: Die Gefahr der „tickenden Zeitbombe“, WELT, **2018**.
- [2] A. Röbner, M. Launay: Abschlussbericht KomS: Vergleichsmessungen zur Spurenstoffelimination, **2019**.
- [3] A. Höber: Rückstände in Gewässern., tagesschau.de, Alexa Höber, **2023**.
- [4] S. Joachim, et al. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* **2021**
- [5] M. Mohamed, et al. Complete Biodegradation of Diclofenac by New Bacterial Strains: Postulated Pathways and Degrading Enzymes. In: *Microorganisms*, **2023**.
- [6] Wikipedia, Sponge. **2023**.

HEAL-X Bioink: Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting

I. Schmidt¹, E. Arefaine¹, P. Richthof², T. Thummaraj³, A. Blaeser², J. Gačanin³, T. Weil³, H. Hartmann^{1*}

¹ *NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen, Deutschland*

² *Technische Universität Darmstadt, vertreten durch das Fachgebiet für BioMedizinische Drucktechnologie, Darmstadt, Germany*

³ *Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz, Deutschland*

E-Mail: Hanna.Hartmann@nmi.de

Konsortium:

- 1) NMI: Die Gruppe Regenerative Biomaterialien am NMI forscht an der Schnittstelle von Bio- und Materialwissenschaften und beschäftigt sich u.a. mit der Kompatibilität und Interaktion zwischen Materialien und biologischen Komponenten. Zu den Kompetenzen gehört neben der biophysikalischen Analytik von Hydrogel-Systemen und der Entwicklung von Wirkstoff-Freisetzungssystemen auch das 3D-Biodrucken mit anschließender Zellanalytik.
- 2) TUDa: Die Gruppe bringt umfangreiche Erfahrungen mit in der Ergründung neuartiger Biodruck-Technologien zum Dispensieren von lebenden Zellen, der Synthese von Biomaterialien und Hydrogelen. Sie beschäftigt sich mit der rheologischen und mechanischen Charakterisierung von Hydrogelen und Biotinten, sowie der Entwicklung von vaskularisierten In-Vitro-Gewebemodellen und Organ-on-a-Chip Systemen.
- 3) MPI-P: Die Vision der Gruppe am MPI-P ist es, polymere Materialien zu entwickeln, die kontrolliert und adaptiv mit ihrer Umgebung wechselwirken, um so anspruchsvolle Aufgaben zu erfüllen, wie z.B. eine gerichtete Interaktion mit Zellen. Die entwickelten Materialien zeichnen sich aus durch einen hohen Grad an struktureller Präzision, synergistischen Eigenschaften durch Multifunktionalisierung, und adaptiven Merkmalen, die auf ihre Umgebung reagieren.

Motivation und Projektziel:

Aufgrund ihres hohen Wasseranteils und ihrer strukturellen Ähnlichkeit zur nativen Extrazellulärmatrix (EZM) bieten Hydrogele sehr gute Umgebungsbedingungen für die dreidimensionale Kultur von lebenden Zellen. Beim 3D-Biodruck werden sie mit lebenden Zellen zur sogenannten Biotinte vermischt und schichtweise verdrukt, um eine prä-definierte 3D-Struktur abzubilden.

Gerade in diesem Kontext weisen Hydrogele jedoch Schwachstellen auf, die den erfolgreichen Einsatz für den Biodruck limitieren. Die Erzielung einer hohen Biofunktionalität, z.B. eine hohe Mikroporosität, das Vorhandensein von Zelladhäsion-fördernden Peptid-Sequenzen oder die Ausbildung von Zellwachstum leitenden Fibrillen, steht in der Regel im Kontrast zu den für den 3D-Biodruck erforderlichen, physiko-mechanischen Eigenschaften. Gegenwärtig verwendete Hydrogele weisen zudem fast ausschließlich ein statisches quasi-kovalentes Vernetzungsverhalten auf. Diese Rigidität und eingeschränkte Funktionalität steht im starken Kontrast zur dynamischen Interaktion und Kommunikation von Peptiden, Zellen und der EZM, die in natürlichen Organismen beobachtet werden. Ziel dieses Projekts ist daher die Entwicklung einer selbstheilenden, bioinspirierten und funktionalen Hydrogel-Plattform für das 3D-Bioprinting der nächsten Generation. Das Vorhaben ist durch supramolekulare, biochemische Wechselwirkungen inspiriert, die in der Natur in verschiedensten Organismen und Geweben beobachtet werden (**Abb. 1A**). Die Integration dynamischer Schnittstellen schließt nicht nur die Lücken, die bisher verwendete, statische Hydrogel-Netzwerke für den 3D-Biodruck aufweisen (**Abb. 1B, C**), sondern erlaubt zusammen mit lokal wirksamen Wachstumsfaktoren auch die Nachahmung von biochemischen Wechselwirkungen in natürlich vorkommendem Gewebe (**Abb. 1D, E**). Im Vorhaben HEAL-X Bioink wird dieser bioinspirierte Ansatz verwirklicht, um eine möglichst realistische Zellumgebung zu schaffen.

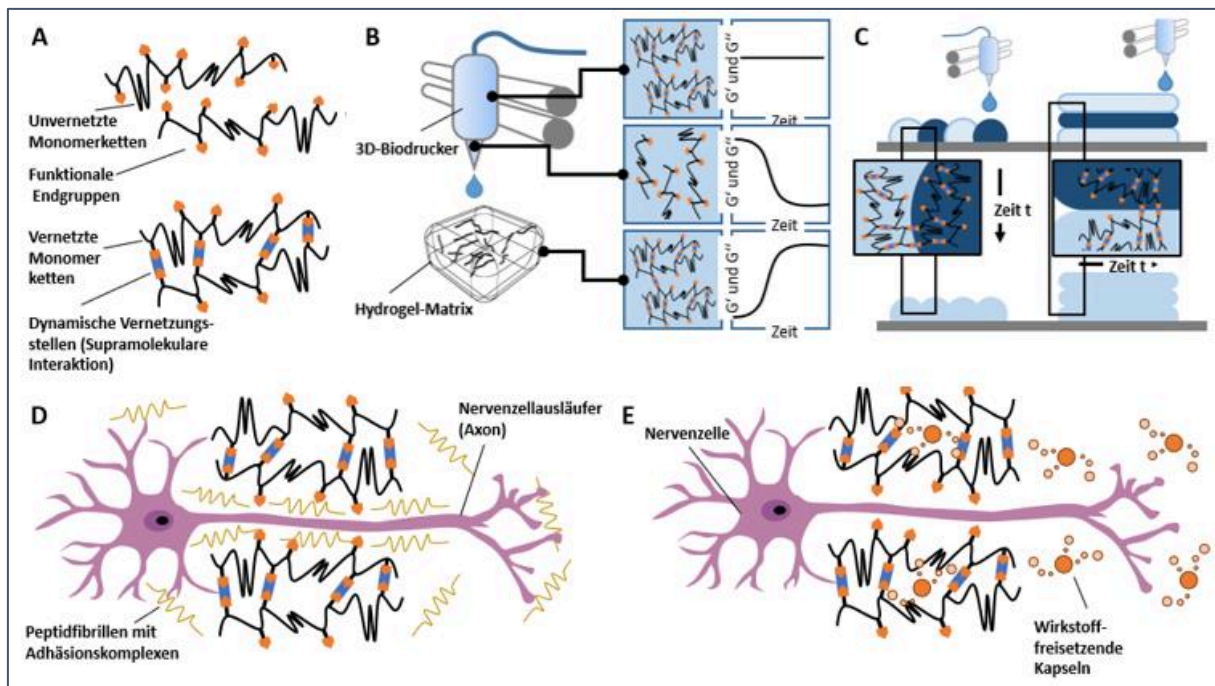


Abbildung 1. Schematische Darstellung des Projektziels HEAL-X Bioink

Im Rahmen des Vorhabens wird eine neue Klasse von selbstheilenden Hydrogelen erforscht, bei denen gezielt synthetisch eingebrachte supramolekulare Interaktionen eine dynamische Vernetzung von Biopolymerketten ermöglichen (A). Beim 3D-Biodruck bieten diese viele Vorteile (B). Durch Scherkräfte werden die Vernetzungsstellen beim Durchtreten der Düsen aufgebrochen, wodurch die Viskosität herabgesetzt wird. Nach dem Ausstoß aus der Düse erholt sich das Netzwerk aufgrund der supramolekularen Selbstheilungseffekte zügig und verleiht dem gedruckten Konstrukt eine hohe Formstabilität. Der dynamische Auf- und Abbau der Vernetzungsstellen fördert darüber hinaus die Fusion von bereits gedruckten Hydrogel-Strukturen oder Schichten (C). Zusätzlich zeichnet sich das Vorhaben durch zwei weitere Innovationen aus, die das gezielte Zellwachstum unterstützen. Hierzu zählen die Integration von Peptidnanofibrillen, die das Wachstum von z.B. Nervenzellen anregen (D). Darüber hinaus werden Wirkstoffe-freisetzende Mikrokapseln in die Matrix eingebaut, die eine gezielte und graduierte Freisetzung ermöglichen und damit die Ausrichtung des Zellwachstums steuern können (E).

Zwischenergebnisse und Ausblick:

Eine Vielzahl von selbst-assemblierenden Peptiden (SAP) mit variierenden Aminosäuresequenzen konnte bereits erfolgreich synthetisiert werden. Weiter können diese SAPs in geeigneten Puffern zu Peptidnanofibrillen (PNF) mit unterschiedlichen Eigenschaften assemblieren. Diese PNFs wurden in Lösung als auch als mittels Beschichtung auf die Zellverträglichkeit gegenüber PC12 Zellen (neuronalen Zelllinie) getestet und als nicht-zytotoxisch befunden. Zudem konnte gezeigt werden, dass eine zunehmende PNF-Konzentration in der Beschichtung die Adhäsion der PC12 Zellen erhöht. Ein weiterer Bestandteil des Projekts befasst sich mit der Wirkstoffverkapselung. Hierbei wurde zunächst FITC-BSA als Beispielmolekül erfolgreich in PLGA mittels der *W/O/W double emulsion solvent evaporation*-Methode verkapselt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich eine Variation der Partikelgröße sowohl durch die Drehzahl beim Emulgieren als auch durch die Polymerkonzentration erzielen lässt.

Die nächsten Schritte im Projekt werden sich auf die Untersuchung von PNFs hinsichtlich mechanischer und rheologischer Veränderungen sowie der Druckbarkeit sowohl für Drop-on-Demand als auch für μ -Extrusion konzentrieren. Darüber hinaus werden die Methoden zur Wirkstoffverkapselung hinsichtlich der Beladungskapazität sowie der Wirkstofffreisetzung in 2D und 3D über die Zeit bewertet. Anhand dieser Ergebnisse wollen wir ein selbstheilendes und druckbares Hydrogel entwickeln.

Danksagung:

Dieses Projekt wird vom BMBF finanziell unterstützt (13XP5207).

OSTEOFUNK: Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie

Dr. Nane Nolte², Dr. Uwe Specht², Linda Gaetjen², Stefanie Grom¹, Dr. Steffen Braun¹, Vanessa Klein¹, Norma Hofzumahaus³, Dr. Chao He³, Dr. Kai Borchering², Dr. Tobias Wolfram¹

¹KLS Martin SE & CO. KG, ²Fraunhofer IFAM, ³Clean-Lasersysteme GmbH

*tobias.wolfram@klsmartin.com

Die rekonstruktive Chirurgie ist in der Regel unumgänglich, wenn funktionelle und ästhetische Fehlbildungen oder Traumata wiederhergestellt werden sollen. Durch den Einsatz präoperativer, virtueller Planung sowie patientenspezifischer Implantate kann nahezu eine originalgetreue Kontur des Knochens erreicht werden. Hierfür gibt es aufeinander abgestimmte Lösungen für die computerbasierte Planung chirurgischer Eingriffe, das effiziente Design individualisierter Behandlungskonzepte und die Umsetzung dieser Konzepte im OP durch funktionalisierte Implantate. Die daraus resultierenden Vorteile für die Patientinnen und Patienten sind eine Reduktion der Komplikationsrate, verbesserte ästhetische und funktionale Ergebnisse, Verkürzung der Operationszeiten und eine schnellere Rehabilitation.

Bei der chirurgischen Versorgung mit metallischen Standardimplantaten aus Titan oder Edelstahl kommt es jedoch zu einigen Herausforderungen, darunter: 1.) zeit- und kostenintensive manuelle Anpassung metallischer Implantate an die geometrischen Bedürfnisse der jeweiligen Patientinnen und Patienten 2.) ineffiziente Aufnahme und Ableitung von Lasten, wodurch es bei Belastung zu Bewegung der Fragmente und Heilungsstörungen kommt, 3.) ästhetische und haptische Nachteile insbesondere an einer Implantationsstelle mit dünnem Weichgewebe sowie 4.) unerwünschte Wahrnehmung der Implantate bei Temperaturänderungen (Kältegefühl).

PEEK ist ein Polymermaterial, das Titanimplantate in der chirurgischen Therapie als Alternative dienen könnte. Der Grund dafür ist, dass die mechanischen Eigenschaften von PEEK denen von Knochen ähneln, es sehr elastisch, gleichzeitig aber sehr hart und widerstandsfähig ist, ein geringes Gewicht aufweist, keine thermische Sensibilität hervorruft und geringe Artefaktbildung auf Röntgenbildern erzeugt. Zudem hat PEEK, wenn auch erdölbasiert, derzeit eine bessere Verfügbarkeit als Titan, weil PEEK durch mehrere Hersteller auf verschiedenen Kontinenten produziert wird. Aufgrund des mangelhaften Benetzungsverhaltens des bioinerten Werkstoffs PEEK konnte bisher allerdings keine stabile Gewebs- und Knochenintegration in Gänze erreicht werden.

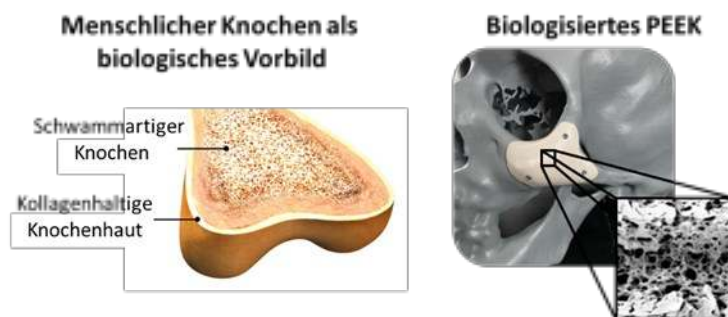


Abbildung 1. Links – Aufbau des menschlichen Knochens mit seiner schwammartigen, porösen Struktur und der kollagenhaltigen Knochenhaut [1]; Rechts – ein Ausführungsbeispiel des OSTEOFUNK Ansatzes: Laserinduzierte knochenartige PEEK-Oberfläche mit Calciumphosphat-Anreicherung und folgender Kollagenbeschichtung (Vorarbeit IFAM) [2].

Hier setzt das Projekt OSTEOFUNK an: inspiriert durch die schwammartige Morphologie des biologischen Vorbilds eines Knochens, ist das Ziel, eine poröse gut benetzbare Oberflächenstruktur auf die Oberfläche des PEEK-Implantates zu übertragen (**Abbildung 1**). Für eine effiziente Integration soll zusätzlich biphasisches Calciumphosphat in der Oberfläche angereichert und mit einer Schicht aus naturidentischem Kollagen eine natürliche Knochenoberfläche nachempfunden werden. Der Verbundkoordinator Karl Leibinger Medizintechnik bringt den klinischen Bedarf, die patientenindividuelle Auslegung, Herstellung von PEEK Implantaten und biomechanische Prüfungen des Einflusses der Strukturen mit ein. Das Fraunhofer IFAM ergänzt durch laserinduzierte Oberflächenstrukturierungen für eine gezielte Steuerung der Osteointegration, Funktionalisierung mit Kollagen und Messung der biologischen Zellantwort auf zellulärer- und genetischer Ebene. Die Firma cleanLASER entwickelt Systeme mit optimaler Laser-Substratwechselwirkung sowie Fokusführung für

dreidimensionale Implantatgeometrien. Die Ergebnisverwertung soll in eine Produktentwicklung münden und die Übertragbarkeit der Technologie auf Implantate der Wirbelsäulenchirurgie und weiteren Bereichen der Traumatologie evaluiert werden. Erste Ergebnisse zeigen bereits eine Verbesserung der humanen Zelladhäsion (Fibroblasten) auf laserstrukturiertem PEEK gegenüber den unbehandelten PEEK-Referenzoberflächen (**Abbildung 2**).

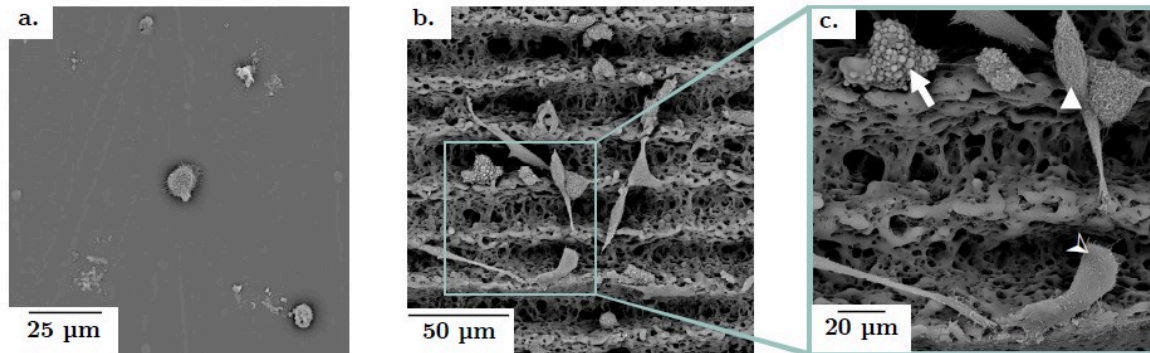


Abbildung 2. REM-Zellinteraktion von Fibroblasten auf PEEK: a) unstrukturiertes PEEK mit kugelförmigen, wenig adhären den Zellen; b) und c): Zelladhäsion, unter anderem sichtbar durch Filopodien der mit Pfeilen gekennzeichneten Zellen auf bioinspirierten und laserinduzierten Strukturen.

Quellen

- [1] <https://organe.de/knochen/>
- [2] KLS Martin SE & Co. KG

„PLackLoS – PULVERLACK MIT LOTUS-EFFEKT – SELBSTAUSBILDEND, SUPERHYDROPHOB, SCHMUTZABWEISEND“

MPL Metall-Pulver- Lackierung GmbH, D.O.K. Chemie GmbH, Ganzlin Beschichtungspulver GmbH, Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP)

Fast alle technischen Oberflächen sind heutzutage zur Optimierung der Oberflächenfunktionalitäten beschichtet, lackiert oder bedruckt. Pulverlacke weisen gegenüber Nasslacken erhebliche Vorteile auf, da keine umwelt- und gesundheitsgefährdenden Lösemittel emittiert werden und deutlich weniger Abfälle beim Lackierungsprozess anfallen. Im Gegensatz zu lösemittelbasierten Lacken ließen sich bislang allerdings mit Pulverlacken keine wirtschaftlich und technisch nutzbaren Beschichtungen für superhydrophobe Oberflächen mit Selbstreinigungseffekt herstellen.



Abbildung 1. Superhydrophobe Oberfläche eines Pflanzenblattes [Quelle:Adobe Stock/ Martin]

In Deutschland werden jährlich ca. 2 Mio. Tonnen Lacke für die Funktionalisierung technischer Oberflächen eingesetzt. Dabei sind superhydrophobe Oberflächen in vielen Branchen von hoher technischer und wirtschaftlicher Relevanz. Bei metallischen Substraten wird durch die wasserabweisende Wirkung die Diffusion von Wassermolekülen verringert und damit der Korrosionsschutz deutlich verbessert. Ebenso wird die Bildung von Biofilmen vermindert und der Selbstreinigungseffekt ermöglicht längere Reinigungsintervalle, was zu einer deutlichen Ressourceneinsparung und einer geringeren Belastung der Umwelt führt. Die Umsetzung superhydrophober Oberflächen auf Pulverlackbasis scheiterte bislang allerdings an geeigneten Additiven. Nur in hohen Konzentrationen lässt sich ein Selbstreinigungseffekt erzielen, wobei allerdings andere Lackeigenschaften wie Haftung, Glanz oder Verschleißfestigkeit beeinträchtigt werden. Bei niedrigen Konzentrationen hingegen gelangen zu wenig Additive an die Oberfläche, um die erforderliche Rauigkeit hervorzurufen. Bei Nasslack-basierten Superhydrophobie-lösungen besteht darüber hinaus das Problem, dass oftmals polyfluorierte Chemikalien eingesetzt werden, deren Verbot derzeit von der Europäischen Chemikalienagentur geprüft wird.

Bioinspirierter Lösungsansatz und mögliche Anwendungen

Im Projekt PLackLoS soll ein Beschichtungssystem erforscht werden, mit dem erstmals stabil und prozesssicher die industrielle Herstellung superhydrophober Pulverlackschichten möglich werden

soll. Zur Realisierung hat sich ein Verbund aus drei KMU, die entlang der Wertschöpfungskette der industriellen Pulverbeschichtung tätig sind, und ein Polymerforschungsinstitut zusammengefunden, um eine innovative Systemlösung für diese Aufgabenstellung zu untersuchen. Teilziele des Projektes sind die Entwicklung eines bioinspirierten Verfahrens zur Selbstausbildung superhydrophober Oberflächen mittels maßgeschneiderter Additive, die Erarbeitung einer innovativen Pulverlackformulierung, um diese Additive in die Lackschicht einzubinden, die chemische Vorbehandlung für eine haftfeste Beschichtung der Produkte sowie die Erarbeitung eines innovativen Beschichtungsprozesses, der die Selbstausbildung der superhydrophoben Oberflächeneigenschaften sicher ermöglicht.

Die Bioinspiration der Innovation liegt in der Nutzung eines besonderen Auftriebseffektes, der in der Natur bei einigen Wasserpflanzen beobachtet wird, deren Blätter oder Blüten damit an die Wasseroberfläche auftreiben. Dieser Effekt soll technisch nachgebildet werden, so dass sich ausgewählte Additive im Pulverlack spontan an der Oberfläche anordnen und diese mikrorau und superhydrophob funktionalisieren.

Damit entsteht ein besonders nachhaltiges und ressourcenschonendes Beschichtungssystem für selbstreinigende Oberflächen unter Vermeidung von Biofilmbildung und mit sehr hohem Korrosionsschutz, das ohne Verwendung von Lösemitteln bei der Herstellung oder im Lack auskommt. Aufgrund der deutlich besseren Umwelteigenschaften und der Kompatibilität mit regulatorischen Vorgaben bestehen für das innovative Beschichtungssystem hohe Substitutionspotenziale im Milliardenmarkt technischer Beschichtungen und dementsprechend gute wirtschaftliche Erfolgsaussichten.



Abbildung 2. Beispiel einer Pulverbeschichtungsanlage © MPL GmbH, Göppingen

Pinguin 2: Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik

H. Leubner^{1*}, J. Binzer¹, M. Langner¹, R. Wehrspohn², M. Izidoro-Santos², M. Lelonek³, C. Schmelzer⁴, U. Hirsch⁴, J. Martins-Schalinski⁴, A. Friedmann⁴

¹BinNova Microfiltration GmbH, ²Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ³Smart Membranes GmbH,

⁴Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

*holger.leubner@binnova.de

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung neuartiger Filtermedien zur Wasser- und Luftfiltration mit gegenüber aktuellen Filtermedien verbesserter Filtereffizienz bei gleichem oder geringerem Druckabfall. Dabei soll das Prinzip der Pinguinfasern angewendet werden, um den bisherigen Zielkonflikt der hohen Filtrationseffizienz bei niedrigem Druckabfall zu lösen: Das Filtermedium soll aus einer Struktur mit groben Trägerfasern und quer angeordneten Nanofasern bestehen, ähnlich wie sie in Pinguinfedern vorkommen. Ziel ist es, die durch die Trägerfasern gebildeten groben Poren auf $<1\ \mu\text{m}$ zu verkleinern, ohne dass sich die Faseroberfläche und der Druckabfall wesentlich vergrößern (Abb. 1). Dadurch sollen zukünftig Filteranlagen mit signifikant verringertem Druckabfall realisiert werden.

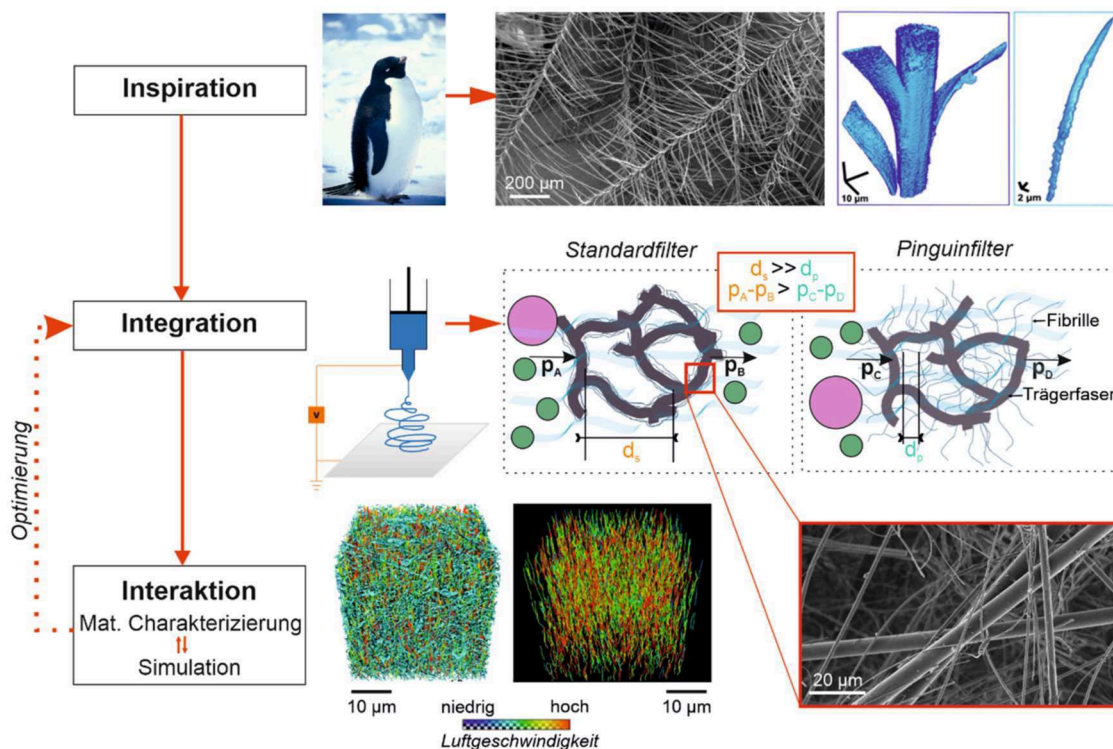


Abbildung 1. Projektkonzept. Oben: REM-Aufnahme von Pinguindaunenfedern (links), Nano-CT-Rekonstruktion einer Federbarbe (Mitte) und einer Barbenspitze (rechts). Mitte: Zielstruktur Pinguin-Filter im Vergleich zum Stand der Technik: grobe Poren, die durch Nanofasern als Porenteiler eine verringerte Porengröße erreichen, ohne die Faseroberfläche im Vlies wesentlich zu erhöhen. Unten: Nano-CT-Volumenbild von elektrogesponnenen Fasern mit farbkodierter Faserdickenverteilung, Simulation der Luftstromgeschwindigkeit durch ein Filtermedium.

Dem eleganten Konzept der Pinguinfedern folgend, konnten die Antragsteller bereits in einer publizierten Vorarbeit zeigen, dass tatsächlich eine sehr gute Filtereffizienz bei niedriger Druckdifferenz erreicht werden kann [1]. Leider war die gezeigte Lösung technisch nicht umsetzbar, weil Nanofasern in der benötigten Menge und Qualität noch nicht herstellbar waren und die korrespondierende Nassvliesstechnologie nicht vorhanden war. Hier wird im Projekt „Pinguin 2“ angesetzt, um die praktische Anwendung im technischen Maßstab zu realisieren. Neben dem Materialkonzept und dem Fertigungskonzept für die Faservliese mittels Elektrosponnen werden Scale-up-Konzepte der

Filtermaterialienherstellung im Technikums- und Produktionsmaßstab im Nasslegeverfahren entwickelt. Zum Projektende soll ein Proof-of-Concept-Demonstrator eines Luftfiltermaterials mit Nachweis der (DEHS)-Filtereffizienz für insbesondere Aerosole und Wasserfiltermaterialien für Mikroplastik mit deutlich verbesserten Qualitätskennzahlen (= Minimierung des Druckverlustes und verbesserte Energieeffizienz) vorliegen.

Dazu werden Vliese elektrogesponnener Fasern durch ein Nassvlies-Verfahren aus Dispersionen geschnittener elektrogesponnener Fasern hergestellt. Mittels Röntgen-Computertomografie werden die komplexen Hohlräume der Fasermaterialien mit hierarchischer Struktur charakterisiert und daraus dreidimensionale Modelle erstellt. Diese ermöglichen die Charakterisierung des komplexen porösen Raumes und die Beschreibung von Stofftransportphänomenen durch die Abschätzung von Porosität und Tortuosität [2]. Um die Zuverlässigkeit und physische Haltbarkeit der Filtermedien zu gewährleisten, sind die Aufklärung und Optimierung der Antifouling-Eigenschaften der Filtermaterialien und der daraus resultierenden Degradation der mechanischen Eigenschaften von zentraler Bedeutung. Um ggf. notwendige Optimierungen am Materialdesign vornehmen zu können, werden die Filtermaterialien in anwendungsnahen Tests unter Verwendung typischer Wassermikroorganismen und Luftkeime analysiert [3].

Quellen

- [1] M. Burgard, D. Weiss, K. Kreger, H. Schmalz, S. Agarwal, H.W. Schmidt, A. Greiner *Adv. Funct. Mater.*, **2019**, 29, 1903166.
- [2] C. Santos de Oliveira, A. T. González, T. Hedtke, T. Kürbitz, A. Heilmann, C.E.H. Schmelzer, J. Martins *Materials Science and Engineering: C*, 2020, 115, 111045.
- [3] U.M. Hirsch, M. Rühl, N. Teuscher, A. Heilmann *Applied Surface Science*, **2018**, 436, 207-216.
- [4] P.-T. Miclea, S. Richter, C. Hagendorf *Applied Research*, **2023**, 2, 202200094.

ProBand – Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben

Volker Junior^{1*}, Dr. Christof Hübner², Daniel Bren³; Dr. Max Mylo⁴

¹phoenix GmbH&Co. KG, ²Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM, ³Festo SE & Co. KG, ⁴Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK

*vjunior@phoenix-innovation.de

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von programmierbaren Materialien für den Einsatz als Stoßdämpfer in technischen Anwendungen. Die Lösungen sollen von Wirkmechanismen inspiriert werden, die die menschliche Bandscheibe nutzt. Zielapplikation sind Stoßdämpfer wie sie heute beispielsweise in der Automatisierungstechnik eingesetzt werden.

Partner und Aufbau des Projektes

Für das Projekt arbeiten die Festo SE & Co. KG, der Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM (repräsentiert durch die Institute IWM, LBF, ICT und IAP), das Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK der Universität Freiburg und die phoenix GmbH&Co. KG zusammen. Dabei bringt Festo das Anwendungswissen zur Dämpfungsapplikation und das Knowhow um Anforderungen und Objektivierung der Dämpfungsleistung in das Projekt ein. Die Universität Freiburg ist der Knowhow-Partner für die bionische Inspiration und den Hintergrund und die Funktionsweise der menschlichen Bandscheibe. Der Fraunhofer CPM ist der Spezialist für programmierbare Materialien, die Formulierung der „zu programmierenden Funktion“, das Wissen zu Einheitszellen, dem Basiswissen zu den Polymeren, die als Lösungswerkstoff zum Einsatz kommen und zur Fertigungstechnologie. phoenix bringt seine Erfahrung mit bionisch inspirierten Protektoren, der Entwicklung selbststeuernder makroskopischer Mechanismen und zur Innovationsmethodik in das Projekt ein.

Im Projekt werden zunächst gebräuchliche Stoßdämpfer hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise analysiert. Die Anforderungen an die Lösung hinsichtlich ihrer Kernfunktion und den Anforderungen aus den Rahmenbedingungen werden definiert. Schließlich wird die Wunschliste an einen idealen Dämpfer aus Sicht der Anwendung formuliert.

Ebenso werden der Aufbau der Bandscheibe und ihre Funktionsweise im Hinblick auf die Stoß-Dämpfungsfunktion analysiert und die auftretenden Wirkmechanismen beschrieben.

Das ideale Dämpfungsverhalten wird im Sinne einer Zielfunktion für das Verhalten des Dämpfers beschrieben. Außerdem wird der Lösungsraum für die mögliche Einstellbarkeit bzw. Selbstregulierung auf Basis der analytischen Beschreibung des Dämpfungsvorganges aufgespannt.

Ausgehend von den identifizierten Wirkmechanismen und Grundlagen werden zunächst Ideen und Konzepte für Teilfunktionen der Aufgabenstellung erarbeitet, prototypisch realisiert und bewertet. Anschließend werden zueinander passende Teilfunktionen zu einem Gesamtsystem integriert und bewertet. Schließlich wird dieses Gesamtsystem in die Anwendungsumgebung integriert und getestet. Parallel werden die Einzelfunktionslösungen und das Gesamtsystem kontinuierlich im Hinblick auf ihre potenziell großtechnische Produzierbarkeit hin geprüft.

Problemstellung

Dämpfungslösungen in der Automatisierungstechnik arbeiten häufig hydraulisch. Öl wird mit Hilfe eines Kolbens durch einen schmalen Spalt gepresst. Mit dem Widerstand wird die zu „dämpfende Masse“ abgebremst, die Bremsenergie wird in Form von Wärme dissipiert. Dabei werden die Dämpfer in der Regel nach der zu dissipierenden Energie und der Festlegung einer maximalen Bremskraft ausgelegt. Der Dämpfer ist nicht in der Lage, sein Dämpfungsverhalten an unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten oder veränderliche Massen anzupassen.

Aufgabe des zu entwickelnden programmierbaren Materials ist es, möglichst große Spektren an zu dissipierender Energie abzubilden und sich dabei selbstständig darauf einzustellen, ob diese Energie eher von einer größeren Masse oder einer größeren Anfangsgeschwindigkeit herrührt.

Lösungsansatz und Bioinspirationskonzept

Dämpfungsverhalten, Aufbau und Wirkmechanismen der menschlichen Bandscheibe dienen als Inspiration für die Lösung. Die Bandscheibe, beziehungsweise der Verbund von Bandscheiben und Wirbelkörpern in der Wirbelsäule als Gesamtsystem, ist in der Lage, den unterschiedlichsten Lastsituationen gerecht zu werden - von der asymmetrischen langanhaltenden Belastung beim einarmigen Tragen bis zur Impactsituation bei der Landung nach einem Sprung.

Dabei nutzt sie, anders als heutige hydraulische Dämpfer, auch die Deformation des Grundkörpers. Diese kann zum Beispiel zur Veränderung der Fließwege eines Fluids genutzt werden. Der gradierte Aufbau der Bandscheibe - die Materialzusammensetzung, der Wassergehalt und die Struktur ändern sich von innen nach außen - dient als Inspiration für Aufbau und Elemente einer selbstregulierenden Lösung.

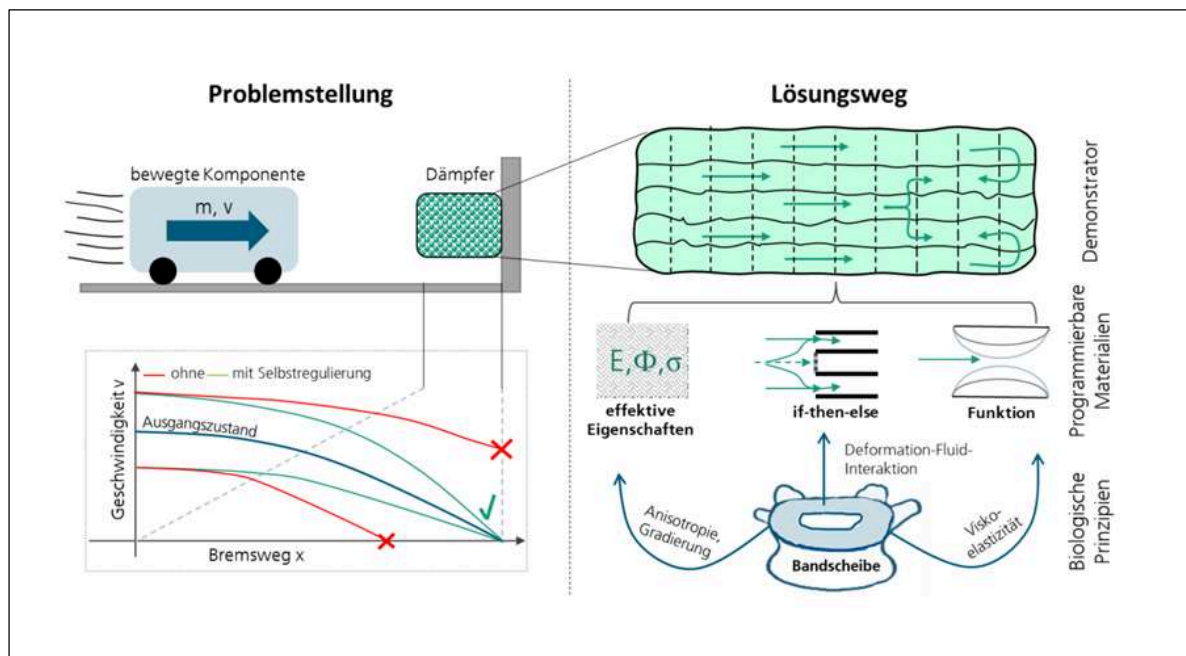


Abbildung 1. Problemstellung und Lösungsweg für eine selbstregulierende Dämpfung für optimales Bremsverhalten. Links: Lastfall und gewünschtes Zielverhalten. Rechts: Vorgehen im Projekt. Biologische Prinzipien (Wirkmechanismen) werden in programmierbare Materialien übertragen und in einem fluidgefüllten Demonstrator umgesetzt.

Stand des Projektes und erste Ergebnisse

Die Funktionsanalyse der bestehenden Lösung mit Erarbeitung des Anforderungsprofils an die Lösung ist abgeschlossen. Dabei wurde der Begriff Dämpfung in dem Sinne spezifiziert, dass das eher allgemeinsprachliche Verständnis für die Projektaufgabe verwendet wird. Während Dämpfung im technischen Sinne die Dissipation von Energie beispielsweise durch Flüssigkeitsreibung oder die Reduktion der Amplitude eines schwingenden Systems beschreibt, wird im allgemein-sprachlichen Gebrauch, gerade bei Schutzausrüstung, eher das Abbremsen eines Aufprallvorganges zur Vermeidung von Verletzungen, also die Zerstörung durch Überlastung einer Struktur, verstanden.

In diesem Sinne soll der „Dämpfer“ neben der geschwindigkeitsabhängigen Dissipation auch eine Federwirkung des Systems zur Realisierung eines idealen Systemverhaltens nutzen dürfen. Vermutlich wäre „Bremsen“ der treffendere Begriff.

Die Aufgabe besteht konkretisiert darin, einen Körper mit der Masse m , der mit der Geschwindigkeit v auf den „Bremsen“ auftrifft, im verfügbaren Bremsweg s auf die Geschwindigkeit $v=0$ abzubremesen, und zwar idealerweise so, dass er den Bremsvorgang so regelt, dass die Bremszeit minimiert und eine definierte maximale Bremskraft nicht überschritten wird. Dabei stellt sich der Bremsen selbstständig auf unterschiedliche Massen und Anfangsgeschwindigkeiten ein.

Für das ideale Verhalten wurde eine Zielfunktion im Sinne einer If-Then-Else Funktion definiert:

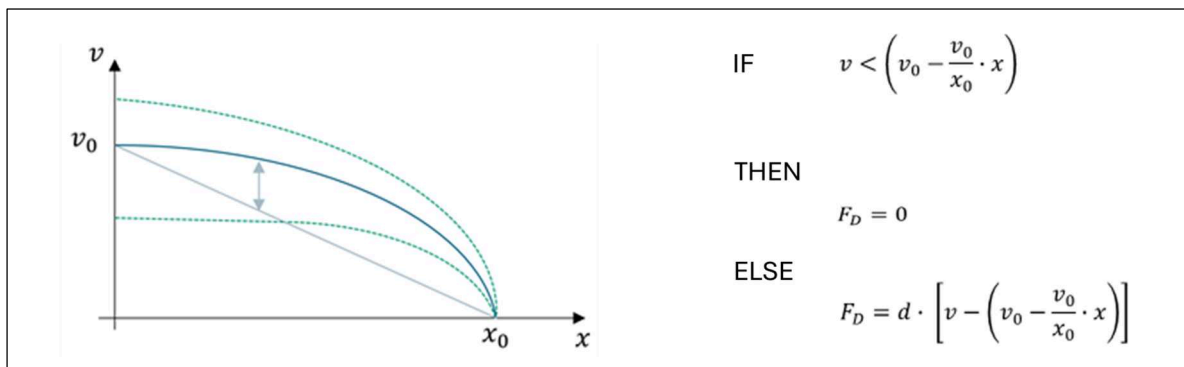


Abbildung 2. Idealisiertes Dämpfungsverhalten; Zielfunktion der programmierbaren Dämpfung. Die Dämpferkraft F_D ist abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit und einer wegababhängigen Sollkennlinie, die als Gerade zwischen aktueller Aufprallgeschwindigkeit v_0 und idealem Abbremsweg (Endlage) x_0 definiert ist. Die Dämpferkraft ist proportional zur aktuellen Geschwindigkeitsdifferenz zu dieser Sollkennlinie, allerdings nur, solange die Geschwindigkeit über der Sollgeschwindigkeit liegt.

Für die in den Funktionsanalysen von Bandscheibe und technischem Dämpfer gefundenen Teilfunktionen wurden Ideen erarbeitet, in einem Morphologischen Kasten gegliedert und ihr Potential geschätzt. Zehn Basiselemente wurden ausgewählt, die jetzt zu Funktionsmustern ausgearbeitet und dann gefertigt und qualitativ geprüft werden. Einige Teilfunktionen wurden mit Handmustern erfolgreich abgebildet.

SATORIS: Superamphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme

C. Werner^{1*}, J. Friedrichs¹, K. Wicker², A. Voigt³

¹Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V., ²Carl Zeiss AG, ³Technische Universität Dresden, Institut für Wiss. Rechnen

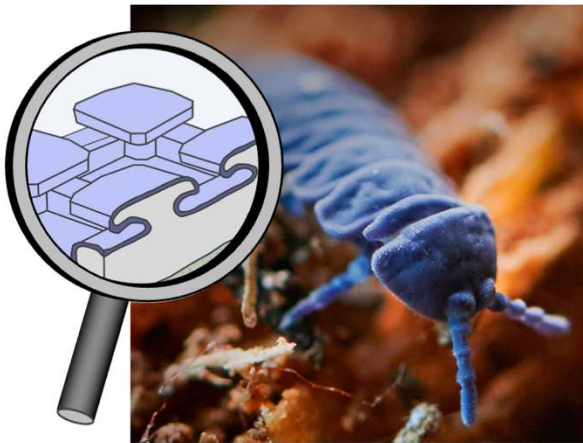
*werner@ipfdd.de

Die Effizienz optischer Oberflächen kann durch bioorganische und fetthaltige Beläge erheblich beeinträchtigt werden. Herkömmliche mechanische Reinigungsverfahren, die oft umweltschädliche Substanzen einsetzen, können die Oberflächen beschädigen. Gängige Schutzbeschichtungen gegen Verschmutzungen sind robust, doch ihre Transparenz ist oftmals unzureichend. Zudem sind sie höchstens superhydrophob (wasserabweisend), aber nicht superamphiphob (wasser- und fettabweisend). Superamphiphobe Eigenschaften können durch Nanostrukturierung der Oberfläche erzielt werden, aber bestehende Nanostrukturen sind nicht dauerhaft widerstandsfähig und können nicht ohne Beschädigung gereinigt werden. Eine innovative Beschichtung, die sowohl wasser- und fettabweisend als auch robust und transparent ist, könnte die Leistungsfähigkeit optischer Geräte daher erheblich steigern.

Die drei Partner in diesem Projekt setzen an diesem Punkt an und erforschen mittels theoretischer und experimenteller Methoden neue Oberflächenbeschichtungen, die von natürlich vorkommenden Oberflächenstrukturen inspiriert sind. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Haut von Collembolen, kleinen Gliederfüßern mit einer Größe zwischen 0,1 und 9 mm und mehr als 8000 bekannten Arten (Abbildung 1). Collembolen atmen über ihre gesamte Körperoberfläche, die stets trocken und sauber bleiben muss, um ein Erstickten der Tiere zu verhindern. Ihre Körperoberfläche weist eine nanoskalige „Wabenstruktur“ auf, die im Gegensatz zu den häufig untersuchten wasserabweisenden Pflanzenoberflächen mechanisch stabil ist. Diese Wabenstrukturen besitzen pilzförmige überhängende Querschnitte, die eine ausgeprägte Beständigkeit gegen Benetzung durch verschiedene Lösungsmittel und ölige Substanzen bieten (Abbildung 1). Experimentelle und theoretische Studien haben die vielversprechende Übertragbarkeit dieser Überhangstrukturen gezeigt, sowohl hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit der Oberfläche als auch ihrer Resistenz gegen vollständige Benetzung.

Die Umsetzung des biologischen Funktionsprinzips in ein anwendungsorientiertes technisches Konzept erfordert mehrere Forschungsphasen. Zunächst konzentriert sich der Prozess auf die numerische Co-Optimierung der Benetzungs- und optischen Eigenschaften von nanostrukturierten Oberflächen. Dies umfasst die Entwicklung eines umfangreichen Simulationswerkzeugs zur Vorhersage dieser Eigenschaften. Danach erfolgt die Herstellung von robusten, superamphiphoben und transparenten Oberflächen im Modellmaßstab, basierend auf den Simulationsergebnissen und unter Verwendung lithographischer Methoden. Nach der Herstellung werden die Proben umfassend charakterisiert, wobei die topographischen, mechanischen, schmutzabweisenden und optischen Eigenschaften von nanoskaligen Überhangstrukturen analysiert werden. Der finale Schritt beinhaltet die Untersuchung von Übersetzungsoptionen, um die optimale Nanostruktur mit ihren vorteilhaften Benetzungs- und optischen Eigenschaften auf größere Flächen zu übertragen. Hierbei werden verschiedene Herstellungsverfahren in Betracht gezogen und lithographische Verfahren zu diesem Zweck verglichen und getestet.

Biologie



Technik

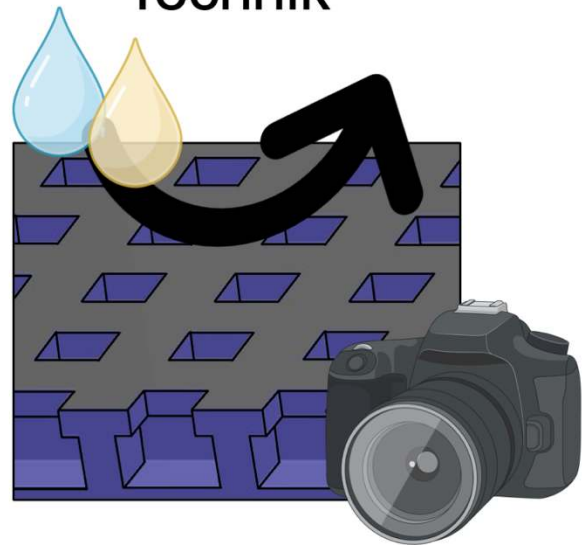


Abbildung 1. Die Oberflächenstruktur winziger Tiere (Collembolen, links) dient als Vorbild für die Entwicklung wasser- und fettresistenter Beschichtungen für optische Geräte wie Objektive oder Mikroskope. (Quelle: IPF Dresden)

Das Projekt zielt darauf ab, superamphiphobe Oberflächen für Konsumeroptiken zu entwickeln, insbesondere für Brillengläser, die neben funktionellen Vorteilen auch zusätzlichen Marktwert schaffen könnten. Darüber hinaus könnten auch andere Produktbereiche, wie Immersionsobjektive, lithografische optische Systeme und medizintechnische Geräte, von diesen superamphiphoben Oberflächen profitieren.

SELF-X-FOR-IMPLANTS: Hydratisierte Polyelektrolyt-Multilayer-Architekturen mit Self-Healing Potential für die Implantologie

C. Witt^{1*}, A. Hartmann¹, M. Liebelt¹, Th. Oberbach¹, J. Börke², H. Rothe², Dr. G. Hildebrand², Prof. Dr. K. Liefeth², Dr. D. Grafarend³, K. Wiemer³, D. Thiele⁴, P. Henke⁴, Prof. Dr. R. Bader⁴

¹ Mathys Orthopädie GmbH, An den Trillers Büschen 2, 07646 Mörsdorf

² Institut für Bioprozess- und Analysemesstechnik e.V., Rosenhof, 37308 Heilbad Heiligenstadt

³ Hemoteq AG, Adenauerstr. 15, 5246 Würselen

⁴ Orthopädische Klinik und Poliklinik, Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie, Universitätsmedizin Rostock (UMR), Doberaner Straße 142, 18057 Rostock

*carolin.witt@mathysmedical.com

Die Implantation von Hüftprothesen macht mit rund 227.000 Eingriffen den größten Anteil der jährlich in Deutschland implantierten Endoprothesen aus. Hauptursache für Revisionen sind partikelinduzierte Lockerungen. Die Hauptziele bei der Entwicklung neuer Hüftprothesen sind daher die Verbesserung der reibungstechnischen Eigenschaften und die Reduzierung des Abriebs.

Hyaliner Knorpel, eine Form des Knorpelgewebes, die vor allem im Gelenkknorpel vorkommt, besitzt hervorragende Reibungs- und Abriebeigenschaften. Diese Eigenschaften beruhen auf einer durch Wasser vermittelten Schmierung der Gleitfläche. Inspiriert von diesem natürlichen Prinzip der Reibungsminimierung in hyalinem Knorpel ist es das Ziel des Projektes SELF-X-FOR-IMPLANTS, eine Plattformtechnologie zu erforschen, die es ermöglicht, „maßgeschneiderte“ Schichtsysteme für die Implantologie zu etablieren. Die über verschiedene Selbstorganisationsmechanismen funktionalisierten Implantate sollen mit einer technologisch bisher nicht erreichten Leistungsfähigkeit mit dem biologischen Gewebe interagieren und sich durch ein Selbstheilungspotenzial auszeichnen. Die adressierten primären Anwendungen sind eine reibungsminimierende Funktionsschicht auf Endoprothesen, ein antithrombogenes Schichtsystem für Implantate im Blutkontakt (hier: periphere Stents) sowie Schichtsysteme mit definierter Wirkstofffreisetzung zur Infektionsprophylaxe zum Beispiel bei Patienten mit akutem Gefäßverschluss.

Das Konsortium besteht aus Forschungseinrichtungen mit den Schwerpunkten Schichtforschung, Schicht- und Funktionsanalytik sowie Industriepartnern aus den Bereichen Medizinprodukteherstellung und Medizinproduktebeschichtung. Die am Projekt beteiligten Partner bilden somit die gesamte Wertschöpfungskette ab, was für die spätere Umsetzung der erzielten Ergebnisse in die klinische Anwendung von entscheidender Bedeutung ist. Im Erfolgsfall, das heißt, wenn die beschichteten Implantate deutlich verbesserte Eigenschaften gegenüber unbeschichteten Referenzsystemen aufweisen, können sowohl Belastungen des Gesundheitssystems reduziert als auch ein Mehrwert für den einzelnen Patienten durch ein verringertes Infektionsrisiko geschaffen werden.

Im Vortrag werden die geplanten Tätigkeiten, sowie der aktuelle Stand im Projekt SELF-X-FOR-IMPLANTS aller Projektpartner vorgestellt.

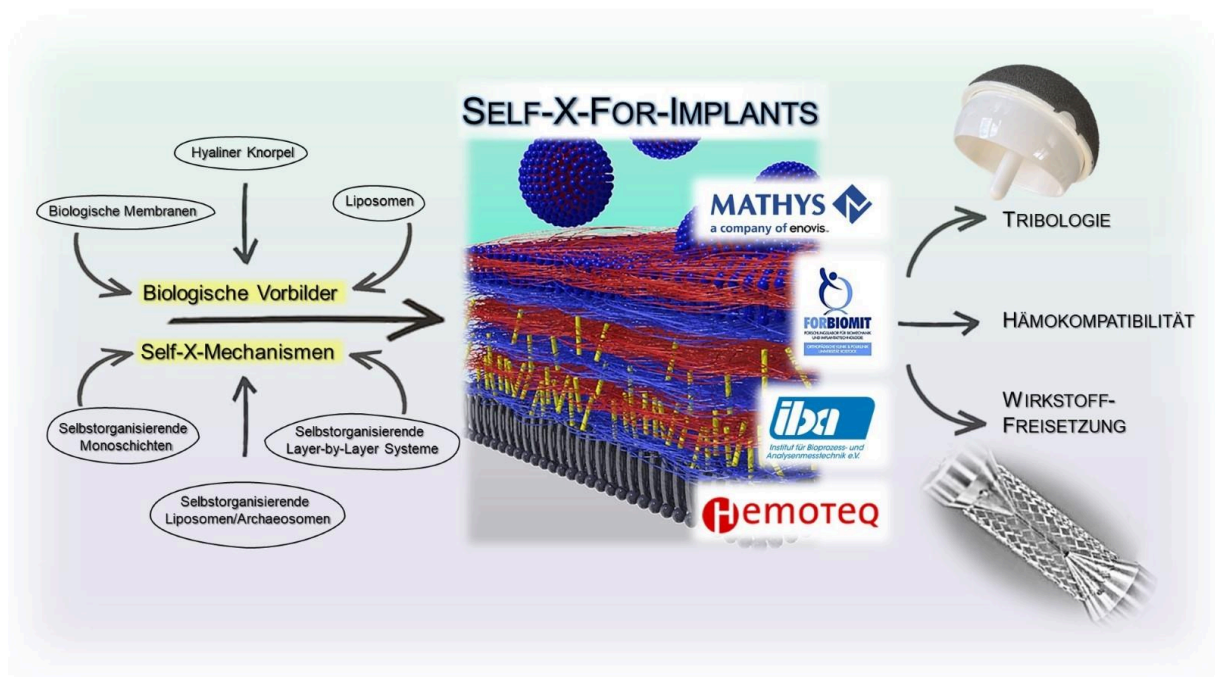


Abbildung 1. Schema des Verbundprojektes; Copyright: iba e.V.

Poster

AdapTribo-2: Adaptive Struktur- bildung bei sortenreinen Kompositen unter tribologischer Belastung

Raimund Jaeger¹, Erik Licht², Peter Steer³

1: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Mikrotribologiezentrum μ TC, Freiburg

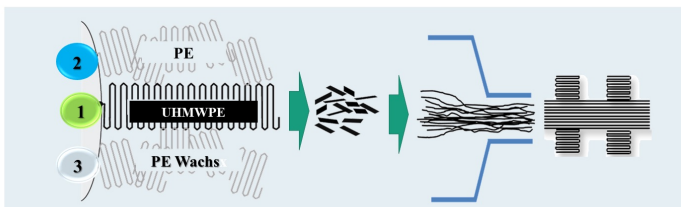
2: Basell Sales & Marketing Company B.V., German Branch, Frankfurt a. M.

3: 2RPS Mechatronik GmbH, Ottobrunn

Kunststoffe spielen als Leichtbauwerkstoffe für Antriebssysteme eine zunehmend bedeutende Rolle: sie weisen eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, wirken sich positive auf »noise, vibration, harshness« aus und gelten als »low carbon footprint materials«. Technische Kunststoffe sind in der Regel Komposite. Diese sind schwierig zu recyceln, da Polymermatrix und verstärkende Phase getrennt werden müssen. Bei sortenreinen Kompositen bestehen Matrix und verstärkende Phase aus demselben Material – eine Trennung der Komponenten ist daher nicht nötig. Bei einer neuen Klasse von sortenreinen Polyolefinkompositen (All Hydrocarbon Composites, »All-HC«) bildet sich die verstärkende Phase während der Verarbeitung oder – unter geeigneten Belastungen – während des Betriebs: All-HC passen ihre Widerstandsfähigkeit, ähnlich wie lebendiges Gewebe, den externen Belastungen an.

Sortenreine Polyethylenkomposite

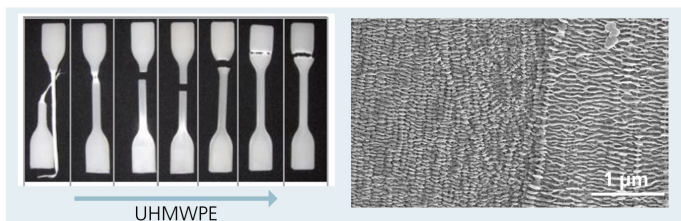
Durch eine Mehrzentrenkatalyse können All-HC mit einer breiten Molekulargewichtsverteilung von niedermolekularem PE über HDPE bis zu unverschautem UHMWPE synthetisiert werden. Diese Reaktorblends sind mit gängigen extrusionsbasierten Fertigungsverfahren verarbeitbar und sind mehrfach ohne Qualitätseinbußen recycelfähig¹.



Synthese eines Reaktorblends durch einen Mehrzentren-Katalysator. Die verstärkenden Shish-Kebab Strukturen bilden sich durch Scherströmungen bei der Verarbeitung aus.

Selbstverstärkung durch Orientierung

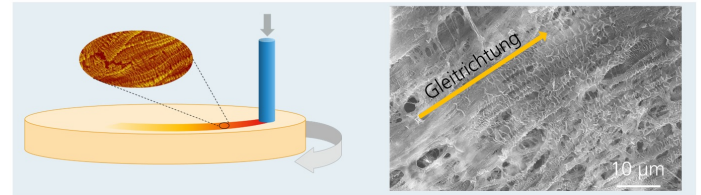
Treten während der Verarbeitung Scherströmungen auf, wird das UHMWPE zu Fibrillen verstreckt, es bildet sich ein »molekularer Komposit« mit deutlich verbesserten mechanischen Eigenschaften. E-Modul, Zugfestigkeit und Kerbschlagzähigkeit nehmen verglichen mit HDPE um einen Faktor 4-8 zu², für geeignete Reaktorblends wird eine deutliche Zunahme der Abriebbeständigkeit beobachtet³.



Links: In der Prüflänge wird die UHMWPE-Fraktion während des Spritzgusses orientiert. Die hieraus resultierende Verstärkung führt zum Versagen des Prüfstabs an der Schulter. Rechts: Orientierte Shish-Kebab Strukturen in der Prüflänge.

Selbstverstärkung durch tribologische Belastung

Im Projekt »AdapTribo« des Ideenwettbewerbs »Biologisierung der Technik« wurde untersucht, ob sich diese Selbstverstärkung auch durch Reibwärme und Scherspannungen im Reibkontakt einstellen können. Kann sich ein Kunststoff tribologischen Belastungen anpassen, um diesen besser widerstehen zu können?



Links: Strukturbildung im Reibkontakt eines Stift-Scheibe-Tribometers.

Rechts: In Reibrichtung orientierte Fibrillen (Shish-Kebab-Strukturen) in der Reibspur.

Dies ist der Fall: für geeignete Belastungen konnten in der Reibspur Fibrillen beobachtet werden, die in Reibrichtung orientiert wurden. Aus dieser Reibspur entnommene Proben zeigten in geschmierten Stift-Scheibe-Versuchen eine erhöhte Abriebbeständigkeit. Ebenso konnte durch geeignete tribologische Belastungen in Ring-Scheibe-Versuchen ein »Einlaufen« des Materials hervorgerufen werden, das zu einer erhöhten Abriebbeständigkeit führte⁴.

AdapTribo-2: Anwendung auf Komponenten für Antriebssysteme

In »AdapTribo-2« soll die adaptive Strukturbildung ausgenutzt werden, um All-HC als Werkstoff für Komponenten von Antriebssystemen verfügbar zu machen. Hierzu soll die Strukturbildung unter den Belastungsbedingungen einer Verzahnung untersucht werden, trocken als auch für einen geschmierten Reibkontakt.

- LyondellBasell wird mit neuen Katalysatoren Reaktorblends mit erhöhtem UHMWPE-Anteil für tribologische Anwendungen entwickeln.
- Das Fraunhofer IWM wird in tribologischen Modelltests den Belastungskorridor der Strukturbildung für geschmierte und ungeschmierte Systeme ermitteln
- 2RPS wird einen Komponentenprüfstand entwickeln, mit dem die tribologischen und thermischen Belastungen einer geschmierten Polymer-Verzahnung untersucht werden kann.

Das Wechselspiel zwischen tribologisch / thermischer Belastung, Schmierstoff und Strukturbildung bietet einen interessanten Ansatz, die Einzeleigenschaften von All-HC Komponenten zu optimieren, insbesondere wegen der hohen Schmierstoffverträglichkeit von Polyolefinen.

Kontakt

Dr. Raimund Jaeger
Geschäftsfeld Tribologie
Tel. +49 761 5142-284
Fax +49 761 5142-510
Raimund.jaeger@fraunhofer.de
Fraunhofer IWM
Wöhlerstr. 11
79108 Freiburg
www.fraunhofer.de

¹ T. Hees, F. Zhong, M. Stürzel, R. Mülhaupt; Macromolecular rapid communications, 2019, 40, 1800608
² F. Zhong, J. Schwabe, D. Hofmann, J. Meier, R. Thomann, M. Enders, R. Mülhaupt; Polymer, 2018, 140, 107–116.
³ T. Hees, F. Zhong, C. Koplin, R. Jaeger, R. Mülhaupt; Polymer, 2018, 151, 47–55.
⁴ S. Seif; Tribology of All-Hydrocarbon-Composites, MSc Thesis, Paris, 2023.

BILLARD

Bioinspirierte flüssige Proteinmaterialien als selbstregulierendes Depot für anti-VEGF Medikamente

Jessica Plura¹, Veronika Vetyšková², Felicitas Bucher¹, Wilfried Weber^{2,3}

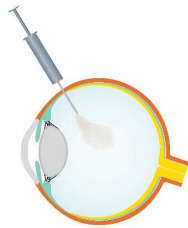
¹ Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg

² INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien, Saarbrücken

³ Universität des Saarlands, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Saarbrücken

Herausforderung

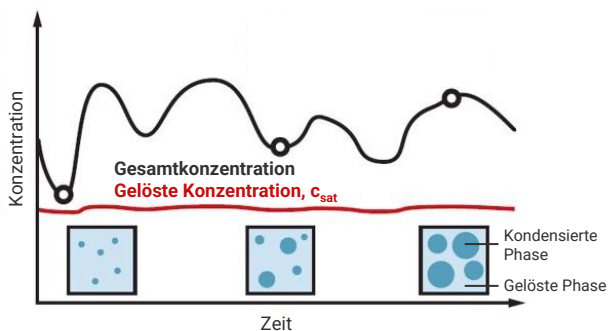
BILLARD adressiert die Therapie von Gefäßerkrankungen der Netzhaut - die Hauptursache für Sehverschlechterung und Erblindung in Industrieländern. Aktuell werden diese Erkrankungen durch die Injektion sogenannter VEGF-Inhibitoren direkt in den Glaskörper des Auges behandelt. Diese Injektionen müssen alle 4-8 Wochen wiederholt werden, was einerseits eine hohe Belastung für die Patient:innen und andererseits ein wiederholtes Risiko für Komplikationen darstellt. Eine Erhöhung der Dosis pro Injektion hilft nur bedingt um längere Injektionsintervalle zu erreichen, da die Eliminationsrate des Medikaments direkt proportional zu dessen Konzentration ist. Aus diesem Grund sind Depots, die die Medikamente über die Zeit freisetzen eine vielversprechende Herangehensweise, da somit ein gleichbleibender Wirkspiegel erreicht wird unter Vermeidung der mit hohen Eliminationsraten verbundenen Konzentrationen.



Unsere bioinspirierte Herangehensweise

Das Konzept unseres Depots ist inspiriert von dem natürlichen Mechanismus, mit dem Zellen sicherstellen, dass kritische Proteine immer in einer konstanten gelösten Konzentration vorliegen, unabhängig von schwankenden Synthese- und Degradationsraten.

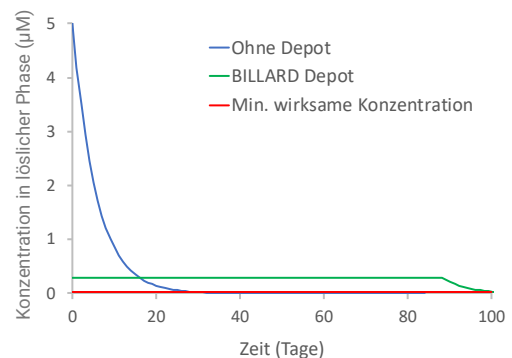
Kritische Proteine gehen bei Erreichen einer Sättigungskonzentration (c_{sat}) eine flüssig-flüssig Phasentrennung ein. Das bedeutet, dass bei einer weiteren Erhöhung der Gesamtproteinkonzentration die Konzentration in der gelösten Phase nicht weiter ansteigt. Stattdessen geht alles zusätzliche Protein in die kondensierte Phase. Andererseits führt eine Entnahme des Proteins aus der gelösten Phase dazu, dass Protein von der kondensierten Phase in die gelöste Phase übergeht, bis die Sättigungskonzentration wieder erreicht ist.



Schematische Darstellung des Verlaufs der Gesamtkonzentration sowie der gelösten Konzentration unter Vorliegen von Flüssig-Flüssig Phasentrennung.

Design des Depots

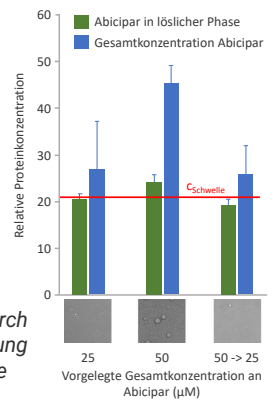
Formulierung von anti-VEGF Medikamenten, sodass diese eine flüssig-flüssig-Phasentrennung innerhalb des therapeutischen Fensters des Medikaments eingehen. Dies wird erreicht durch Kopplung an Biopolymere, die eine Phasentrennung begünstigen.



Simulation des Verlaufs der Konzentration eines anti-VEGF Medikaments im humanen Glaskörper. Mit Depot wird die wirksame Konzentration 3,3-fach länger aufrechterhalten. Die Größe der grünen Kreise repräsentiert die Menge Afibercept in der kondensierten Phase.

Vorläufige Daten

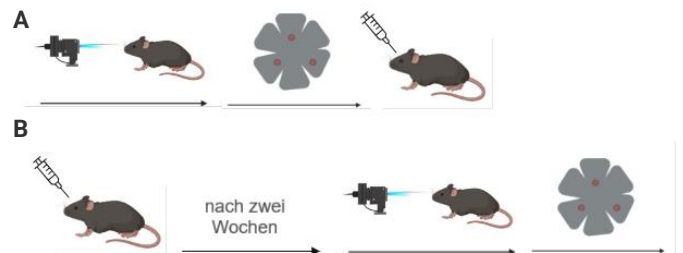
Das anti-VEGF Molekül Abicpar wurde an Biopolymere gekoppelt, sodass eine flüssig-flüssig Phasentrennung eintritt. Dies führt zu einer konstanten gelösten Konzentration obwohl die Gesamtkonzentration schwankt.



Für das anti-VEGF Molekül Abicpar wurde durch Fusion an ein Biopolymer eine Phasentrennung induziert. Die Bilder zeigen die kondensierte Phase

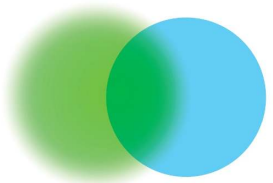
Evaluation der Depotformulierung

Evaluation der Verträglichkeit und Wirksamkeit ex vivo in Gewebemodellen sowie in vivo im Mausmodell.



A: Laserung mit anschließender Behandlung durch intravitreale Injektion

B: Testung der Langzeitwirkung des Depots. Behandlung durch intravitreale Injektion mit anschließender Laserung



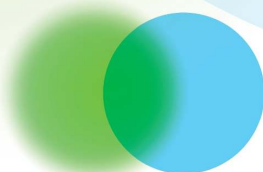
BEGLEITPROJEKT BioTrans

WISSENS- UND TECHNOLOGIETRANSFER

Aufgabe des Begleitprojektes im Rahmen der Fördermaßnahme „Biologisierung der Technik“ ist die bestmögliche Unterstützung aller Verbundprojekte und zielt im Wesentlichen auf

- eine intensive fachliche Vernetzung der FuEul-Verbundprojekte
- die Aufbereitung und Bündelung von erzielten Forschungsergebnissen
- die Identifizierung von neuen wissenschaftlichen Fragestellungen
- eine reichweitenstarke Öffentlichkeitsarbeit
- einen nachhaltigen Wissens- und Technologietransfer.

**BIOINSPIRIERTE
LÖSUNGSANSÄTZE**



**FÜR INDUSTRIE UND
GESELLSCHAFT**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Website



www.biologisierung-der-technik.de
biotrans@biologisierung-der-technik.de
[in](#) Biologisierung der Technik

CarBoMD: Cartilage Bone Medical Device

Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration

Motivation und Ziel

- Schwere Knorpel- und Knochenschäden (ICRS-Grad 3-4) werden derzeit mit begrenzt verfügbaren körpereigenen Implantaten repariert
- **Defizit:** Hohe Morbidität der Entnahmestellen, begrenzte Verfügbarkeit, mehrere Operationen
- **Ziel des Projekts:** Biphasisches bioresorbierbares Implantat zur Unterstützung der Knorpel- und Knochenregeneration ohne Mehrfachoperationen

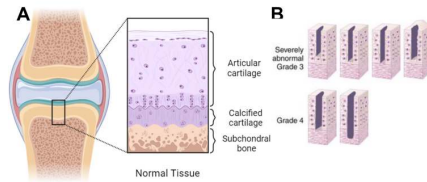


Abbildung 1. A) Mikrostuktur des osteochondralen Gewebes. B) Illustration der ICRS-Grade 3-4

Trabekulärer Knochen

- E-Modul unter Druck 100 – 900 MPa
- Porengröße 300 – 800 µm
- Porosität ca. 60 %

Knorpel

- E-Modul unter Druck 0,5 – 0,8 MPa
- Porengröße 100 – 200 µm
- Porosität ca. 70 %

ITA: Knorpelphase

- Ziel ist die Herstellung eines Gerüsts aus Nanofasern und Hydrogel mit **biomimetischer Struktur von Knorpel**

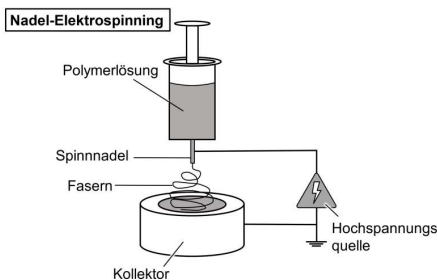


Abbildung 2. Darstellung des Elektrosplinnings.

- Zwei Komponenten:
 - **PCL** – Nanofaservlies
 - **Gelatine/GelMA** – Hydrogel
- Nachbildung der Struktur von Knorpel
 - Tiefe Zone: Fasern
 - Mittlere Zone: Hydrogel
 - Obere Zone: Fasern
- Hydrogel initiiert **Wasseraufnahme** und **Elastizität** des nativen Knorpels
- Nanofasern imitieren **extrazelluläre Matrix** und stabilisieren Hydrogel
- **Funktionalisierung** der Fasern für bessere **Anhaftung** an Metallgerüst

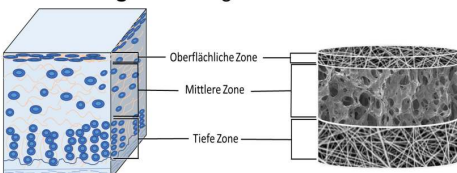


Abbildung 3. Vergleich der schematischen Knorpelstruktur mit angestrebten Implantataufbau.

SLA: Knochenphase

- Ziel ist die Auslegung eines **biomimetischen Designs** der **Knochenstruktur** (Steifigkeit & Degradationsverhalten)
- Gerüste werden durch **Metall-Direktdruck (DMP)** aus feinem Metallstaub gedruckt
- Einsatz von **Gitterstrukturen** bzw. **Einheitszellen** (Zelltyp/Zelltopologie, Strebendurchmesser, Zellgröße)

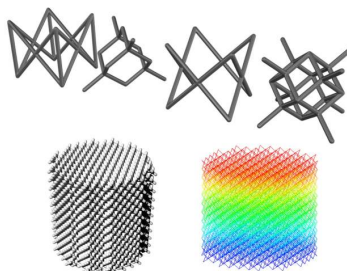


Abbildung 4. Verschiedene parametrisch generierte Einheitszellen (oben) sowie FEM-Simulation der Gitterstrukturen (unten).

- **Magnesium** zersetzt sich, ohne dass toxische Korrosionsnebenprodukte entstehen
- Struktur beeinflusst Degradationseigenschaften
- Entwicklung eines **Degradationsmodells** der Knochenphase
- **Optimierung** des Designs der Gitterstruktur



Abbildung 5. Beispiele der Knochenimplantate.

ANATZ: Biologisch-Funktionelle Evaluierung

- Präklinische Evaluierung der **Biokompatibilität** beider entwickelten Phasen unter Beachtung gängiger ISO-Normen



Abbildung 6. Repräsentatives biphasisches Implantat.

- Simulation der Umweltfaktoren der Implantate (oder Subkomponenten) mittels **Bioreaktor**
- **Statische** und **dynamische Kultivierung** der Zellen unter semi-physiologischen Bedingungen für bis zu 4 Wochen
- **3D-Sphäroid-Zellkultur** für Bewertung der Biokompatibilität für biomedizinische Materialien

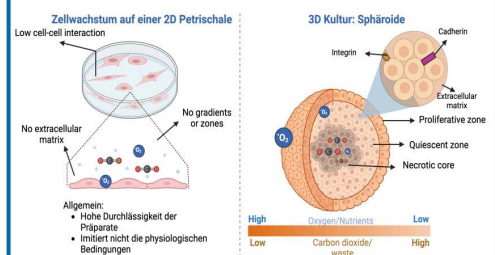


Abbildung 7. Vergleich der Eigenschaften von 2D (links) und 3D (rechts) Zellkulturen. Erstellt mit BioRender.

- **Weiterentwicklung** des Bioreaktors
- **Optimierung** der Sphäroid-Zellkultur mit **Knochenzellen**

Acknowledgement Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des Forschungsprojekts im Rahmen der Ausschreibung „Biologisierung der Technik“ (CarBoMD, FKZ:13XP5205). Weitere Danksagungen gehen an das Begleitprojekt BioTrans „Biologisierung der Technik“.

GEFÖRDERT VOM

DeDrug-Bio Autarke biohybride Filtersysteme zum Abbau von Arzneimittelrückständen

V. D. Nguyen¹, T. Heusinger von Waldegge², U. Specht², D. Mutz³, H.L. Menzel³,
B. Stricker⁴, V. Kohlgrüber⁴, M. Mücke⁵

¹SITEC Industrietechnologie GmbH; ²Fraunhofer IFAM; ³hanseWasser Bremen GmbH;

⁴Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg (KomS); ⁵Wilo SE



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Herausforderungen von Spurenstoffen im Abwasser

- In der deutschen Humanmedizin werden über **2.300 Arzneimittelwirkstoffe** bzw. 30.000 t verwendet.
- Kläranlagen eliminieren sog. Spurenstoffe wie Pharmazeutika und deren Rückstände z.T. nicht vollständig; so gelangen u.a. **Antiepileptika, Röntgenkontrastmittel, Antibiotika oder Schmerzmittel wie Diclofenac in Gewässer**.
- Hormonaktive Wirkstoffe können Geschlechterverhältnisse bei Fischpopulationen beeinflussen. Antibiotikarückstände führen zu antibiotikaresistenten Bakterien. Die Klimakrise verstärkt den Druck auf Gewässer sowie Ökosysteme und erhöht Spurenstoffkonzentrationen durch Trockenheit.
- Zum Schutz der Gesundheit und der Umwelt hat die EU im Nov. 2024 die einwohnerzahlabhängige Verpflichtung zur vierten Reinigungsstufe für kommunale Kläranlagen beschlossen.
- Bisher umgesetzte Anlagen zur gezielten Spurenstoffelimination verwenden überwiegend Aktivkohle oder Ozon als nachgeschaltete Verfahren. Der hohe Energiebedarf der Ozonerzeugung und die meist fossilen Quellen der Aktivkohle werfen allerdings Nachhaltigkeitsfragen auf.

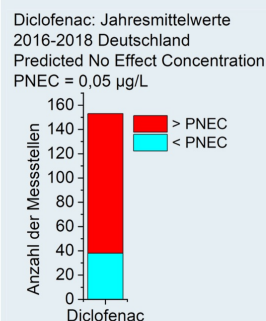
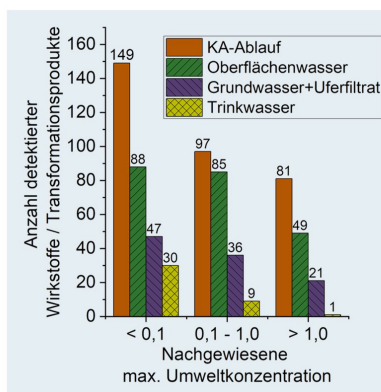
- Funktionalisierung von Filter-Substratmaterialien durch Laser- und Oberflächentechnik für stabile Lebensräume.
- Forschungsziele: Auswahl spezifischer Mikroorganismen (Fraunhofer IFAM), Oberflächen-technik für stabile Biofilmbildung in biohybriden Filtern (SITEC Industrietechnologie GmbH) Demonstrationstests in einer Kläranlage (hanseWasser Bremen GmbH).

Erste Ergebnisse

Spurenstoffauswahl: Diclofenac wird in konventionellen Kläranlagen nur zu ca. 30 % abgebaut², liegt in hohen Umweltkonzentrationen vor und ist dabei biologisch hoch wirksam (Geiersterben Pakistan¹).

Lastenheft/ Abwasserparameter: Relevante zeitabhängige Abwasserparameter für Filteranwendung (Temperatur, Feststoff-, Nährstoffgehalte, pH-Werte, ...) wurden definiert und erfasst.

Oberflächentechnik: Biofilmwachstum erscheint abhängig von: Oberflächenchemie, Oberflächenenergie, Hydrophilie, Mikro- und Nanotopografie, Porendesign³. Adaptierbare Habitate für biologische Tests, mittels Laser- und Plasmatechnik erzeugt. Kosteneffiziente und chem. stabile polymere Substrate z.Z. im Fokus.



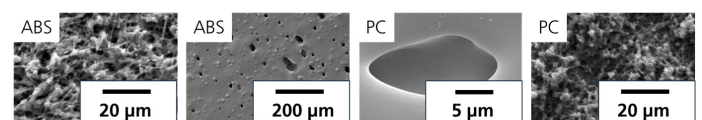
Anzahl der gemessenen Arzneimittelwirkstoffe (AMW) inkl. Transformationsprodukte + Metabolite (TP) mit Positivbefund in Kläranlagenabläufen (KA), Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser¹

Vergleich der Jahresmittelwerte für Diclofenac¹

laserstrukturiert, hydrophob oder hydrophil



Struktur-, Benetzungs-Anpassung für stabile Biofilme mittels Laser- und Plasmatechnik; Bsp. PP



REM: Laserinduzierte Strukturen auf Polymeren (ABS und PC)

Mikroorganismenauswahl:

Anforderung ist die aromatische Struktur des Diclofenac umzuwandeln und hydroxilierte giftige Metabolite zu vermeiden⁴: Hierrunter fallen etwa: *Achromobacter piechaudii*, und *Pseudomonas aeruginosa*.⁵



Diclofenac-Degradierendes Bakterium: *Achromobacter piechaudii*⁶

Zielstellung

- Entwicklung eines stabilen, selbstregenerierbaren Filters für kostengünstigen, emissionsarmen selektiven Wirkstoffabbau am biologischen Filtervorbild der Meeresschwämme (Porifera).
- Nutzung von Mikroorganismen zum selektiven Abbau von Spurenstoffen.



Kontakt

Dr. Duc Nguyen
SITEC Industrietechnologie GmbH
Bornaer Str. 192
D-09114 Chemnitz
Tel. +49 (371) 4708-246
duc.nguyen@sitec-technology.de

1 Umweltbundesamt
2 A. Rößler, M. Launay: Abschlussbericht KomS: Vergleichsmessungen zur Spurenstoffelimination, 2019.
3 S. Zheng et al., Front. Bioeng. Biotechnol., vol. 9, p. 643722, 2021
4 D. Wojcieszynska et al. Diclofenac Biodegradation by Microorganisms and with Immobilised Systems—A Review. Catalysts 2023, 13, 412
5 MSM Mohamed, et al., Complete Biodegradation of Diclofenac by New Bacterial Strains: Postulated Pathways and Degrading Enzymes. Microorganisms. 2023 May 30;11(6):1445.
6 Wiki: M. Kireddjian - https://doi.org/10.1099/00207713-36-2-282

HEAL-X BIOINK

Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting

P. Richthof¹, I. Schmidt², E. Arefaine², T. Thummaraj³, J. Gačanin³, T. Weil³, H. Hartmann², A. Blaeser¹

¹ Technische Universität Darmstadt, Institut für BioMedizinische Drucktechnologie, Darmstadt, Deutschland

² NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen, Deutschland

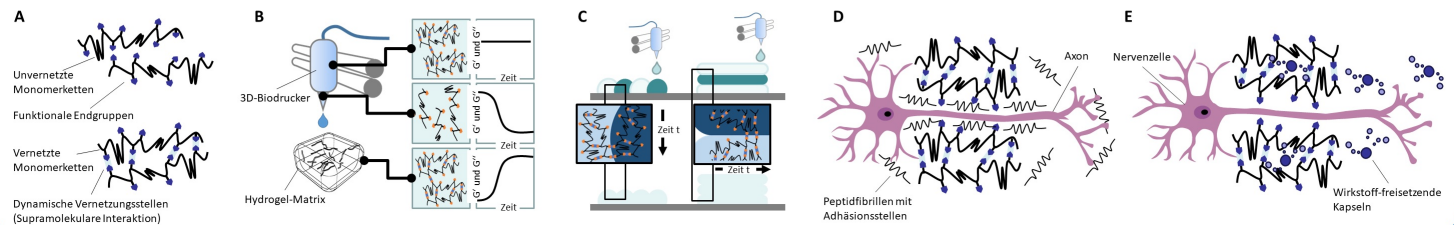
³ Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Synthese von Makromolekülen, Mainz, Deutschland



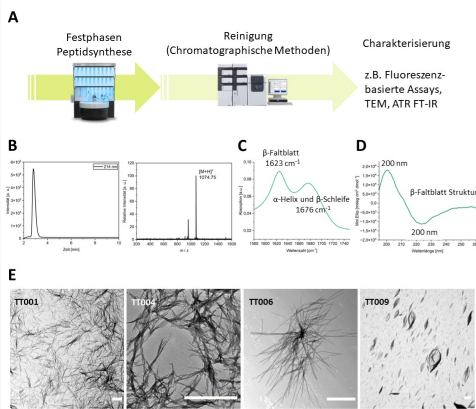
Projektidee

Hydrogele bieten aufgrund ihres hohen Wassergehalts und ihrer strukturellen Ähnlichkeit mit der nativen extrazellulären Matrix (EZM) sehr gute Umgebungsbedingungen für die dreidimensionale Kultur lebender Zellen. Beim 3D-Biodruck werden sie mit lebenden Zellen zu einer sogenannten Biotinte vermischt und schichtweise gedruckt, um eine vordefinierte 3D-Struktur zu erzeugen. Die derzeit verwendeten Hydrogele weisen fast ausschließlich ein statisches quasi-kovalentes Vernetzungsverhalten auf. Diese Rigidität und begrenzte Funktionalität steht im starken Kontrast zu der in natürlichen Organismen beobachteten dynamischen Interaktion und Kommunikation von Zellen, Peptiden und der EZM.

In diesem Kontext ist das übergeordnete Ziel dieses Projekts die Entwicklung einer selbstheilenden, bioinspirierten und funktionalen Hydrogel-Plattform für den 3D-Biodruck der nächsten Generation. Das Projekt ist inspiriert von supramolekularen, biochemischen Wechselwirkungen, die in der Natur in verschiedenen Organismen und Geweben beobachtet werden. Die Integration dynamischer Grenzflächen schließt nicht nur die Lücken der bisher verwendeten statischen Hydrogelnetzwerke, sondern ermöglicht auch die Nachahmung biochemischer Interaktionen in natürlich vorkommendem Gewebe. Im Projekt HEAL-X Bioink wird dieser bioinspirierte Ansatz umgesetzt, um eine möglichst realistische Zellumgebung zu schaffen.

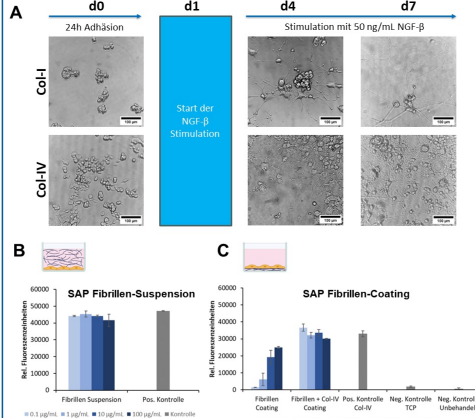


Entwicklung von Peptidfibrillen



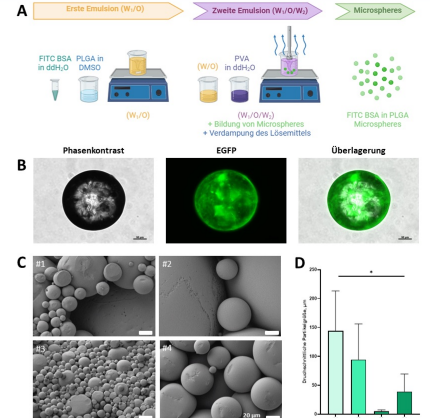
- Selbstassemblierende Peptidfibrillen (SAP)-Bibliothek unterschiedlicher AS-Sequenzen wurde synthetisiert
- Peptid-Nanofibrillen (PNF) mit unterschiedlicher Morphologie wurden generiert

Zell-Fibrillen-Interaktion



- Peptidfibrillen sind zytokompatibel
- Konzentrationsabhängige Adhäsion von neuronalen PC12 Zellen auf Fibrillen-Coatings

Wirkstoffverkapselung



- Erfolgreiche Verkapselung von FITC BSA
- Partikelgröße ist durch die Erhöhung der Mischgeschwindigkeit und Verringerung der Polymerkonzentration anpassbar

Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassend wurden erfolgreich verschiedene PNFs mit unterschiedlicher Morphologie und Struktur synthetisiert, die keine zytotoxische Wirkung gegenüber der PC12-Zelllinie zeigten. Außerdem konnte die neuronale Differenzierung der PC12 Zellen mit 50 ng/mL NGF-β auf Kollagen I und IV in 2D nach 4 und 7 Tagen nachgewiesen werden. Zudem wurde FITC BSA erfolgreich als Modell für die Wirkstoffverkapselung mittels $W_1/O/W_2$ -Doppelemulsions-Lösungsmittelverdampfung eingesetzt.

Die nächsten Projektschritte fokussieren sich auf die Integration der PNFs in Biotinten, um mechanische und rheologische Veränderungen und die Druckbarkeit für Drop-on-Demand (DoD) und μ -Extrusion zu untersuchen. Zudem werden die Methoden zur Wirkstoffverkapselung bezüglich der Beladungskapazität und der zeitlichen Wirkstofffreisetzung in 2D und 3D weiter analysiert. Auf der Grundlage dieser Studien wollen wir ein selbstheilendes und biodruckbares Hydrogel entwickeln.



Herausforderungen rekonstruktive Chirurgie

Mittels präoperativer, virtueller Planung und patientenspezifischer Implantate können funktionelle und ästhetische Fehlbildungen sowie Traumata chirurgisch rekonstruiert werden, sodass eine nahezu originalgetreue Kontur des Knochens erreicht werden kann. Trotz hervorragenden biokompatiblen und (bio)physikalischen Eigenschaften des am häufigsten verwendeten Implantatmaterials Titan kann es in bestimmten Fällen zu Modulfehlanpassungen, Empfindungsstörungen oder Interferenzen mit bildgebenden Verfahren zur Therapiekontrolle kommen.

PEEK als Alternative zu Titan

Polyetheretherketon (PEEK) ist derzeit das einzige Polymer, welches Titan bei der chirurgischen Therapie ersetzen kann. Im Vergleich zu Titan zeichnet sich PEEK aus durch:

- knochenähnliche mechanische Eigenschaften
- hohe Elastizität und Härte (sehr widerstandsfähig)
- geringes Gewicht
- Röntgentransparenz
- keine thermische Sensibilität



Das bioinerte PEEK weist jedoch ein hydrophobes Benetzungsverhalten und damit eine eingeschränkte Gewebsadhäsion sowie Knochenintegration auf.

Zielstellung Projekt

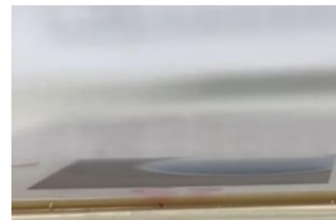
Um die Gewebsintegration von PEEK zu verbessern, soll im Verbundprojekt OSTEOFUNK die Morphologie des biologischen Vorbildes Knochen adaptiert werden. Hierfür wird auf dem PEEK-Substrat mittels Laserbearbeitung eine poröse Oberflächenstruktur erzeugt.

Durch die Laserstrukturierung wird außerdem additiviertes biphasisches Calciumphosphat im PEEK-Substrat freigelegt. Die Knochennachbildung wird komplettiert durch eine Beschichtung mit naturidentischem Kollagen auf dem strukturierten PEEK.

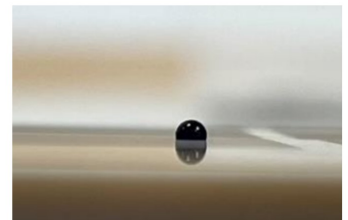
Erste Ergebnisse

Die Benetzungseigenschaften lassen sich durch die Laserbearbeitung so einstellen, dass jeweils hydrophile und hydrophobe Oberflächenstrukturen erzeugt werden können.

hydrophil

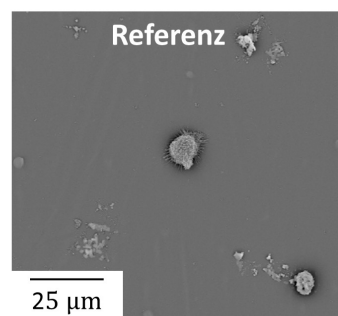


hydrophob

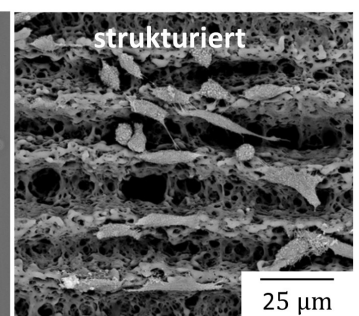


Die Modifikation der Benetzungseigenschaften reagiert jedoch bei Änderungen der Zusammensetzung des PEEK, der Verarbeitungsprozesse und der komplexen Implantatoberfläche hochsensibel und muss im weiteren Projektverlauf weiter erforscht und analysiert werden.

Erste Zelltests auf den laserinduzierten knochenmimetischen PEEK-Oberflächen zeigen eine deutliche Verbesserung der Proliferation von Fibroblasten gegenüber unbehandelten PEEK-Referenzoberflächen und deuten auf eine verbesserte Biokompatibilität der Oberflächen hin.



25 µm



25 µm

Projekt PLackLoS

PulverLack mit Lotus-Effekt – Selbstausbildend, Superhydrophob, Schmutzabweisend

Dmitry Grigoriev

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Geiselbergstraße 69, 14476 Potsdam

E-Mail: dmitry.grigoriev@iap.fraunhofer.de

Als superhydrophob werden Oberflächen bzw. Materialien bezeichnet, die äußerst schwer benetzbar sind, sodass typische Kontaktwinkel eines Wassertropfens Werte über 150° aufweisen. Bei kleinsten Neigungswinkeln einer solchen Oberfläche (Abrollwinkel genannt) rollt dann dieser Tropfen herunter. In der Natur wird dies auch als Lotuseffekt bezeichnet, da die Superhydrophobie zuerst für Blätter der Lotuspflanze beobachtet wurde (Abb. 1)

Problemstellung

In Deutschland werden jährlich ca. 2 Mio. Tonnen Lacke für die Funktionalisierung technischer Oberflächen eingesetzt. Dabei sind superhydrophobe Oberflächen in vielen Branchen von hoher technischer und wirtschaftlicher Relevanz. Bei metallischen Substraten führt die wasserabweisende Wirkung zu einem deutlich besseren Korrosionsschutz. Ferner wird die Biofilmbildung erschwert und der Selbstreinigungseffekt reduziert Reinigungsbedarf, was zu einer erheblichen Ressourceneinsparung und einer geringeren Umweltbelastung führt. Die Umsetzung superhydrophober Oberflächen auf Pulverlackbasis scheiterte bislang allerdings an geeigneten Additiven. Nur in hohen Konzentrationen lässt sich ein Selbstreinigungseffekt erzielen, wobei jedoch andere Lackeigenschaften wie Haftung, Glanz oder Verschleißfestigkeit beeinträchtigt werden. Bei nasslack-basierten Superhydrophobie-Lösungen besteht auch das Problem des Einsatzes von polyfluorierten Chemikalien, deren Verbot derzeit von der ECHA geprüft wird.

Bioinspirierter Lösungsansatz

Die Lösung zur Superhydrophobie bei Pulverbeschichtungen wurde durch den bereits oben erwähnten Lotuseffekt inspiriert und soll mittels einer ausgewogenen Kombination der Oberflächenenergie und deren Mikrorauigkeit erzielt werden.



Abbildung 1. Links: Lotus-Effekt in der Natur – Abrollende Wassertropfen auf superhydrophoben Blättern (Einfügung – Kontaktwinkel $> 150^\circ$); Rechts – auftreibender Gasbläseneffekt

Damit die mikroskaligen Additive sich während des Einbrennvorgangs des Pulverlacks spontan an der Oberfläche anordnen und diese mikrorau und superhydrophob funktionalisieren, wird ein weiterer biologisch inspirierter Effekt genutzt: bei einigen Wasserpflanzen wie Seerosen, Seegräsern und der Grundnessel wurde beobachtet, dass die Gewächse unter Wasser Gasbläschen erzeugen, die Pflanzensamen oder -blüten an die Wasseroberfläche auftreiben und so zu einer besseren Verbreitung der Art beitragen. Dieser Effekt soll während des Einbrennvorgangs des Pulverlacks genutzt werden, damit die Mikropartikel zur Oberfläche der Lackschmelze auftreiben.

Zu erwartende Projektergebnisse

Ein Verbund aus drei KMU, die entlang der Wertschöpfungskette der industriellen Pulverbeschichtung tätig sind, und einem Polymerforschungsinstitut hat sich zum Ziel gesetzt, eine innovative Systemlösung für vorgenannte Aufgabenstellung zu finden. Im Laufe des Projektes sollen folgende Ziele erreicht werden:

- die Entwicklung maßgeschneiderter Additive zur Selbstausbildung superhydrophober Oberflächen während des Pulverbeschichtungsprozesses,
- die Erarbeitung einer innovativen Pulverlackformulierung, um diese Additive in die Lackschicht einzubinden, sowie
- eine chemische Vorbehandlung (Abb. 2) für eine haftfeste Beschichtung der Produkte und
- die Erarbeitung eines innovativen Beschichtungsprozesses (Abb. 2), der die Selbstausbildung der superhydrophoben Oberflächen sicher ermöglicht.



Abbildung 2. Vorbehandlungslinie (links) und Pulverbeschichtung (rechts) bei der MPL GmbH

Projektpartner:

MPL GmbH Pulverbeschichtung (Projektkoordinator)

 **MPL GmbH**
Pulverbeschichtung

Fraunhofer IAP

 **Fraunhofer**
IAP

DOK Chemie GmbH

D.O.K.
Chemie GmbH

Ganzlin Beschichtungspulver GmbH

 **Ganzlin**
BESCHICHTUNGSPULVER

Assoziierter Partner: eiffo PartG

eiffo

Pinguin 2: Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik

BIOLOGISIERUNG
DER TECHNIK

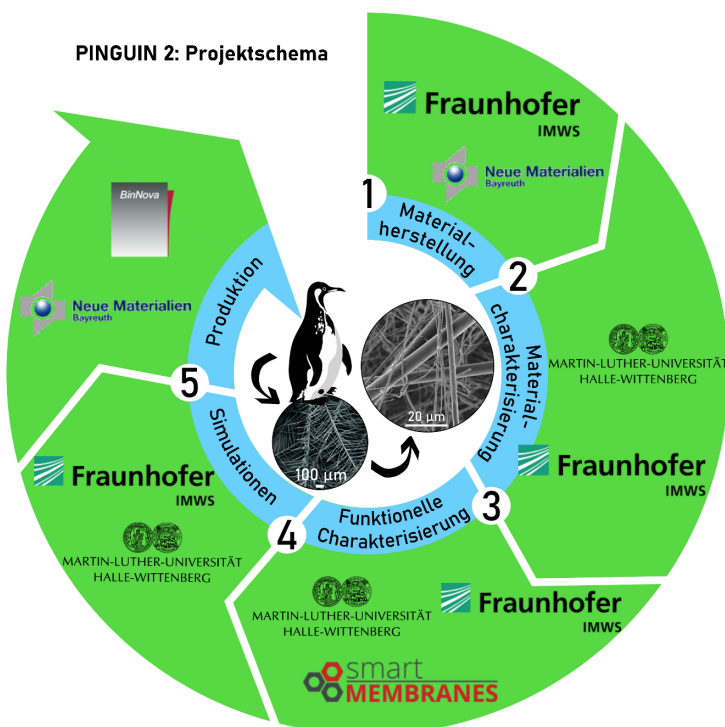
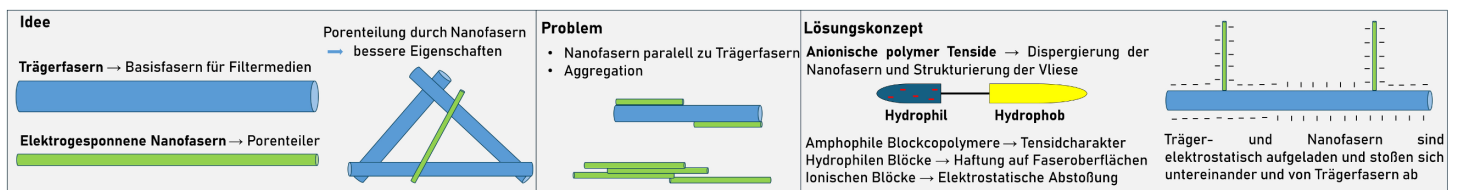
H. Leubner^{1*}, J. Binzer¹, M. Langner¹, R. Wehrspohn², M. Izidoro Santos², M. Lelonek³,
C. Schmelzer⁴, U. Hirsch⁴, J. Martins-Schalinski⁴, A. Friedmann⁴

¹ BinNova Microfiltration GmbH, ² Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ³ Smart Membranes GmbH,

⁴ Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

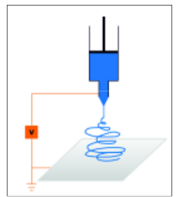
*holger.leubner@binnova.de

Das Ziel des Forschungsvorhabens „Pinguin 2“ ist die Entwicklung innovativer Filtermedien, die sowohl für Wasser- als auch Luftfiltration eine außergewöhnliche Effizienz bei reduziertem Druckabfall bieten. Dabei soll das Prinzip der Pinguin-Federn auf das Filtermedium übertragen werden: das Filtermedium soll aus einer Struktur mit groben Trägerfasern und quer angeordneten Nanofasern bestehen, die wie Federspitzen vertikal angeordnet sind, wodurch die von den Trägerfasern gebildeten groben Poren auf < 1 µm verkleinert werden. Dadurch sollen zukünftig Filteranlagen mit signifikant verringertem Druckabfall realisiert werden.



1 Materialherstellung

- Herstellung von Kurzschnittnanofasern (mittlere Faserdurchmesser < 200 nm, Faserlängen > 1 µm) durch Elektrosprinnverfahren; Einbringung von amphiphilen Blockcopolymeren als Tenside
- Dispergierung der Nanofasern und nasschemische Einbringung in Trägervliesmaterial



2 Materialcharakterisierung

- Charakterisierung der Blockcopolymere (molekulare Charakterisierung, Haftung auf Faseroberflächen, elektrostatische Abstoßung und Wasserdispergierbarkeit der Nanofasern)
- Strukturelle Charakterisierung der Faservliese und deren Porenstrukturen mittels Elektronenmikroskopie und 3D-Röntgen-Computertomographie (Mikro-CT und Nano-CT)

3 Funktionelle Charakterisierung

- Filtrationsanalyse durch µFTIR/µRaman-Spektroskopie – Erstellung von 2D-Kompositionskarten, Identifizierung und Quantifizierung von Mikroplastikpartikeln auf Filtermedien
- Bewertung von Antifouling-Eigenschaften durch diskontinuierliche Kurzzeittests und Quantifizierung der an den Proben befindlichen Biomasse, z.B. hinsichtlich typischer Wasser-mikroorganismen und Luftkeime

4 Simulationen

- Vorhersage von Filtrationseigenschaften durch Simulationen der absoluten Permeabilität und des molekularen Diffusionsvermögens mithilfe Nano-CT-Daten zur Optimierung von der Filterleistung: Austausch mit Materialherstellung und Produktion

5 Produktion

- Herstellung der Nanofaservliese über ein Nasslege-Verfahren: Dispergierung der Fasern in Wasser → Ablagerung auf einem Sieb → Imprägnierung mit Acrylat → Trocknung → Konfektionierung des Vlieses

Take-home Message

Das „PINGUIN 2“-Projekt stellt einen wichtigen Schritt in der Entwicklung nachhaltiger Filtertechnologien dar, die auf natürliche Strukturen zurückgreifen, um die Effizienz und Umweltverträglichkeit zu maximieren.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. A. Greiner und Neue Materialien Bayreuth GmbH für die Zusammenarbeit und bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Projektförderung.

GEFÖRDERT VOM

Entwicklung von programmierbaren mechanischen Metamaterialien

Der Fraunhofer Cluster of Excellence Programmable Materials CPM entwickelt „programmierbare Materialien“, die auf Umgebungsbedingungen reagieren oder zwischen verschiedenen Eigenschaften geschaltet werden können.

J. Krohn (LBF), C. Hübner (ICT), F. Wenz (IWM), M. Schleyer (IWM), W. Kaal (LBF), A. Schwarz (ICT), D. Schönfeld (IAP)

Komplexer werdende Anforderungen an das Materialverhalten bringen die klassischen Konzepte der Materialauswahl und -auslegung an ihre Grenzen. Der Fraunhofer Cluster of Excellence Programmable Materials CPM ist ein Zusammenschluss aus verschiedenen Fraunhofer-Instituten mit überschneidenden und sich ergänzenden Kompetenzen. Das Ziel ist die Entwicklung sogenannter „programmierbare Materialien“, die sich an Umgebungsbedingungen adaptieren, klassische Systemansätze ersetzen oder zwischen verschiedenen Eigenschaften geschaltet werden können.

Programmierbare mechanische Metamaterialien

Mechanische Metamaterialien bestehen aus Werkstoffen, deren makroskopische Eigenschaften durch eine mesoskalige (μm - cm) Strukturierung aus sogenannten Einheitszellen gezielt eingestellt werden. In **programmierbaren Metamaterialien** ist diese Mesostruktur nicht mehr fest, sondern verändert sich unter bestimmten Randbedingungen oder durch äußere Stimulierung reversibel. Des Weiteren können geometrische Parameter in der Struktur variiert werden, um die Funktionalität eines makroskopischen Bauteils zu optimieren.

Vom System zum Material

Systemabstraktion/-modellierung

Um bestehende technische Lösungen durch programmierbare Materialien zu ersetzen, werden zunächst Modelle abstrahiert (analytisch und/oder numerisch), um die Funktionsweise zu verstehen. Daraus ergeben sich dann die benötigten Abhängigkeiten oder Bedingungen (if, then, else), die das Material aufweisen muss, um die gewünschten Anforderungen zu erfüllen. Zudem besteht die Möglichkeit den bisherigen Lösungsraum zu erweitern oder in eine gezielte Richtung zu lenken.

Implementierung von Funktionen

Die zuvor ermittelten Funktionen und Abhängigkeiten sollen nun von programmierbaren Materialien übernommen werden. Dies wird durch die gezielte Gestaltung der inneren Materialstruktur ermöglicht. Diese wird dazu in Einheitszellen aufgeteilt, über deren geometrische Parameter das Verhalten gezielt eingestellt werden kann. Dafür werden Mechanismen wie innere Kontaktelemente oder Bistabilität verwendet. Die Anordnung von unterschiedlichen Einheitszellen in einer Matrix bildet dann das programmierbare Material (s. Abb. 1). Die optimale Verteilung der Einheitszellen im Bauteil kann mit der im CPM-entwickelten Software „ProgMatCode“ berechnet werden [1].

Skalierbare Herstellung

Durch den Aufbau aus einer großen Anzahl von unterschiedlichen Einheitszellen muss die Herstellbarkeit des Materials schon beim Design der Einheitszellen berücksichtigt werden. Um eine serienfähige Herstellung bei hoher innerer Materialkomplexität zu ermöglichen, müssen neben konventionellen und additiven Fertigungsverfahren auch neue Herstellungsmethoden, wie z. B. die Kombination aus Tiefziehen und anschließendem Aufschäumen von Folien, verwendet werden.

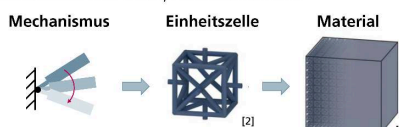


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der Entwicklung von programmierbaren Materialien

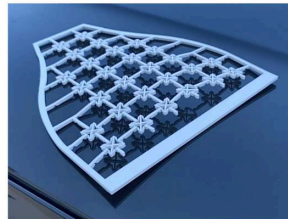


Abbildung 2: Programmierbare Formänderung durch Verschaltung von bistabilen Einheitszellen



Abbildung 3: Rüssel mit Arretiermechanismen (programmierbare Steifigkeit)



Abbildung 4: Programmierbare Dämpfung mit dehnungsabhängigen Drosselventilen

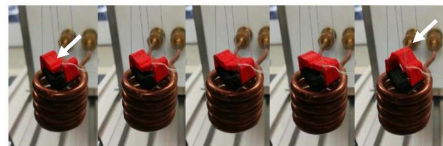


Abbildung 6: Zustandsänderung einer responsiven, bistabilen Einheitszelle durch alternierende Magnetfelder (programmierbares Schaltverhalten)

Programmierbares Materialverhalten

Formänderung

Programmierbare Materialien können verwendet werden, um die Formänderung eines Materials (2D und 3D) gezielt einzustellen (s. Abb. 2). Dafür besitzt das Bauteil mehrere stabile Formen. Hierbei wird die innere Struktur des Materials so gewählt, dass sie eine bestimmte Verformung zulässt oder verhindert. [3]

Steifigkeit

In vielen Anwendung sollen Strukturen je nach Situation und Bedarf weich oder steif sein. Solche Steifigkeitsänderung können durch verschiedene Mechanismen auf Einheitszellenebene in Metamaterialien integriert werden, beispielsweise durch Klemm- oder Arretiermechanismen. Je nach Anwendung können diese durch unterschiedliche Stimuli (z. B. Temperatur, Zug/Druck, Magnetfeld) ausgelöst und lokal eingestellt werden (s. Abb. 3).

Dämpfung

Neben der Steifigkeit ist die Dämpfung eine wesentliche mechanische Struktureigenschaft, die besonders bei dynamisch belasteten Komponenten von Bedeutung ist. Mit Hilfe programmierbarer Dämpfungs-Einheitszellen kann die Dämpfung beispielsweise beschleunigungsabhängig, dehnungsabhängig (s. Abb. 4) [4], temperaturabhängig oder schaltbar realisiert werden.

Akustik

Vibroakustische Metamaterialien können das Schwingungsverhalten und damit die Schallabstrahlung von Bauteilen in bestimmten Frequenzbereichen gezielt beeinflussen. Wenn die mechanischen Resonanzen der einzelnen Einheitszellen durch einen Stimulus verändert werden (z. B. Druckluft, s. Abb. 5), entstehen programmierbare Metamaterialien, deren akustische Eigenschaften bedarfsgerecht anpassbar sind [5].

Responsivität

Programmierbare Materialien besitzen immanente sensorische und aktorische Eigenschaften, um responsiv auf eine Anregung zu reagieren. Spezifische Materialeigenschaften erlauben z. B. eine Reaktion auf Temperatur, Licht, elektrische oder magnetische Felder (s. Abb. 6). Damit können sie ihren Zustand ändern und eine makroskopische Funktionsänderung bewirken.

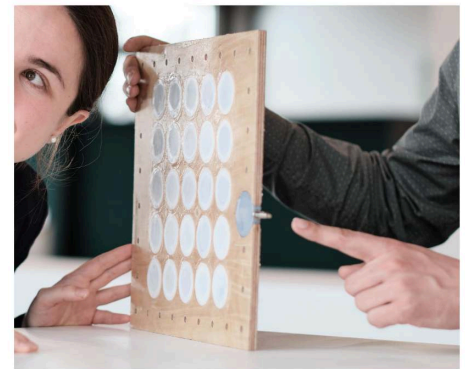


Abbildung 5: Vibroakustisches Metamaterial mit druckabhängigem Stoppband (programmierbare Akustik)

Biologische Inspiration

Bei der Entwicklung von programmierbaren Materialien können Vorbilder aus der Natur Inspiration bieten. Die meisten Pflanzen oder Tiere haben einen hierarchischen Aufbau, der sich von der Nanometer- bis zur Makroskala zieht. Ein solcher Aufbau ist in technischen Systemen meist nicht umsetzbar. Allerdings sind in programmierbaren Materialien Effekte wie Gradienten oder Kompartimentierung (Aufteilung der Funktionen in verschiedenen Bereichen) umsetzbar, da sie aus vielen Einheitszellen aufgebaut sind und besitzen dadurch wesentliche, funktionelle Vorteile zu bestehenden Systemen.

Biologische Materialien sind oft veränderlich und reagieren auf äußere Reize. Deshalb dienen sie als Inspiration für programmierbare Materialien. Beispiele sind die Venusfliegenfalle, deren bistabiler Mechanismus bei mechanischer oder elektrischer Anregung schließt [6] oder Tannenzapfen, die sich bei Feuchtigkeit schließen [7]. Im Falle der Bandscheibe ist insbesondere der mikrostrukturierte Bereich mit verschiedenen anisotropen Segmenten und die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften ein wichtiges Vorbild [8].

Kontakt

Dr. Franziska Wenz

Stv. Themenfokussprecherin

Programmierbare Formänderung u. Mechanik

Tel. +49 761 5142-139

franziska.wenz@iwm.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Christof Hübner

Themenfokussprecher

Fertigung und Skalierung

Tel. +49 721 4640-458

christof.huebner@ict.fraunhofer.de

Fraunhofer Cluster of Excellence Programmable Materials, www.cpm.fraunhofer.de

[1] T. Lichti, Development of Methods and Tools for the Design of Programmable Materials, TU Darmstadt, Diss., 2023

[2] Kadic, M., Milton, G. W., van Hecke, M. & Wegner, M.: 3D metamaterials, Nature Reviews Physics, 198-210, 2019

[3] F. Wenz, D. Schönfeld, S. C. L. Fischer, T. Pretz, C. Eberl, Controlling Malleability of Metamaterials through Programmable Memory, Advanced Engineering Materials, 2022

[4] Kaal, W., Fischer, S. F.; Becker, M.; Specht, M.: Design framework for programmable mechanical metamaterial with unconventional damping properties under dynamic loading conditions, Programmable Materials, 2023

[5] Kollmannsperger, L. S.; Kaal, W.; Becker, M. M., & Fischer, S. C. (2024). Identifying factors influencing the properties of vibroacoustic metamaterials using three different acoustic methods. Advanced Engineering Materials, 2302137.

[6] Volkov, A. G., Adesina, T., Markin, V. S., Jovanov, E.: Kinetics and Mechanism of Dionaea muscipula Trap Closing, 10.1104/pp.107.108241, 2008

[7] Bae, H., Kim, J.: Functional Principles of Morphological and Anatomical Structures in Pinecones, 10.3390/plants9101343, 2020

[8] N. Newell, J.P. Little, A. Christou, MA Adams, C.J. Adam, SD Masouros, Biomechanics of the human intervertebral disc: A review of testing techniques and results, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017

SATORIS

SuperAmphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme

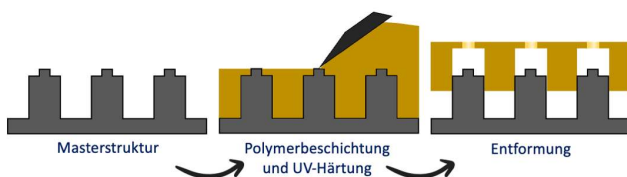
1. Problem

- Die Leistungsfähigkeit von Konsumeroptiken (z.B. Brillengläsern, Objektiven, medizintechnischen Geräten) wird durch bioorganische und fettthaltige Ablagerungen erheblich beeinträchtigt.
- Gängige Schutzbeschichtungen gegen Verschmutzungen, wie oberflächengebundene Polymerketten oder Nanopartikel, sind robust und transparent, jedoch oft nicht superamphiphob oder enthalten gesundheitlich bedenkliche Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS).
- Superamphiphobe Eigenschaften können durch Nanostrukturierung der Oberfläche erzielt werden. Die derzeit verfügbaren Nanostrukturen sind jedoch nicht dauerhaft beständig und können nicht ohne Beschädigung gereinigt werden.

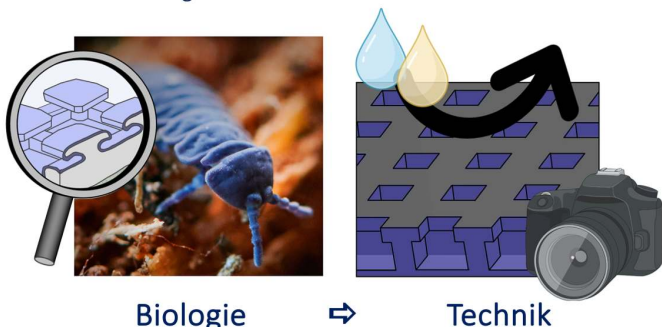
3. Lösungsansatz

Umsetzung des biologischen Funktionsprinzips in ein technisches Konzept für robuste, transparente Beschichtungen, die sowohl wasser- als auch fettabweisend sind.

- Numerische Optimierung der Benetzungs- und optischen Eigenschaften nanostrukturierter Oberflächen durch die Entwicklung eines Simulationswerkzeugs zur Vorhersage dieser Eigenschaften.
- Herstellung von robusten, superamphiphoben und transparenten Modelloberflächen basierend auf den Simulationsergebnissen und unter Verwendung lithographischer Methoden.

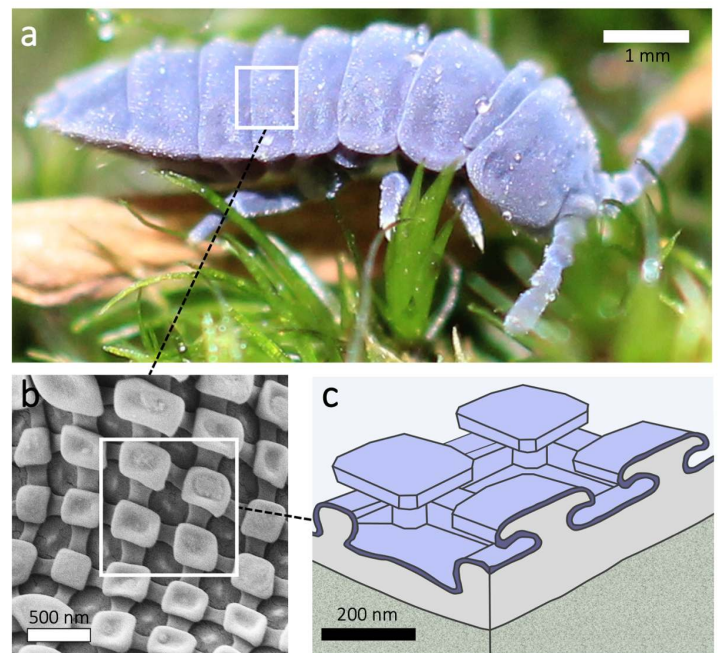


- Umfassende Charakterisierung der topographischen, mechanischen, schmutzabweisenden und optischen Eigenschaften der Modelloberflächen.
- Untersuchung von Optionen zur Übertragung der optimalen Benetzungs- und optischen Eigenschaften nanostrukturierter Oberflächen auf größere Flächen.



2. Biologisches Vorbild

Collembolen atmen über ihre gesamte Körperoberfläche, die stets trocken und sauber bleiben muss, um ein Erstickung zu verhindern. Ihre Körperoberfläche ist durch eine robuste, nanoskalige "Wabenstruktur" mit pilzförmigen Überhängen gekennzeichnet, die eine ausgeprägte Beständigkeit gegen Benetzung durch verschiedene Lösungsmittel und ölige Substanzen bietet.



- Bild von Tetrodontophora bielanensis (*T. bielanensis*), einer beispielhaften Collembolen-Art.
- Rasterelektronen-mikroskopische Aufnahme einer Kutikula von *T. bielanensis*.
- Schematischer Querschnitt der Kutikula, der die charakteristischen besetzungsresistenten Überhangstrukturen zeigt.

4. Konsortium und Aufgaben

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (Koordinator)

- ⇒ Prototypenentwicklung, Charakterisierung mechanischer und physikochemischer Materialeigenschaften, Bioadhäsion, Selbstreinigung, Erkundung von Translationsoptionen



Technische Universität Dresden (Akademischer Partner)

- ⇒ Simulation Superamphiphobie



Carl Zeiss AG (Industriepartner)

- ⇒ Simulation optischer Eigenschaften, Charakterisierung optischer Materialeigenschaften, Erkundung von Translationsoptionen



Hydratisierte Polyelektrolyt-Multilayer-Architekturen mit Self-Healing Potential für die Implantologie

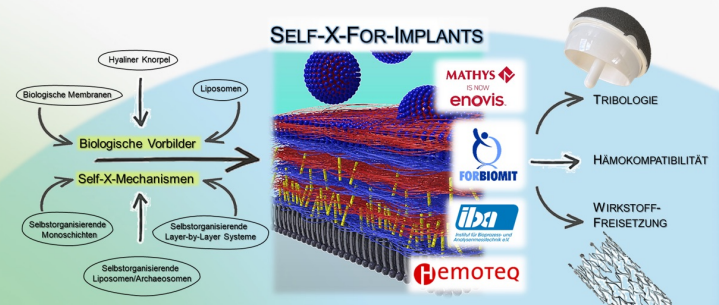
Julia Marie Börke^{1*}, Carolin Witt^{2*}, Martin Liebelt², Thomas Oberbach², Dirk Grafarend³,

Daniel Thiele⁴, Rainer Bader⁴, Holger Rothe¹, Klaus Liefeth¹

MOTIVATION:

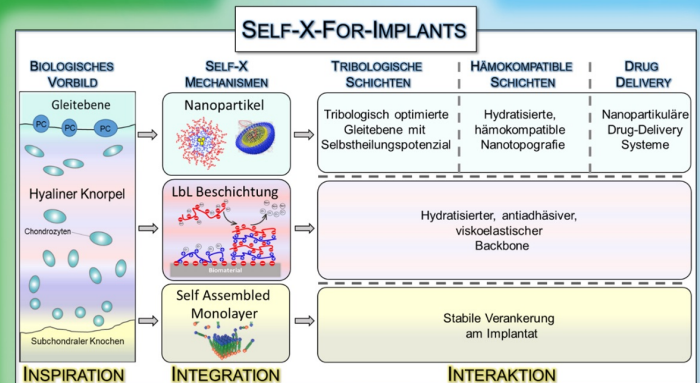
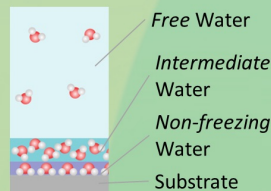
Jedes Jahr erfolgen über 200.000 Implantationen von künstlichen Hüftgelenken in Deutschland. Um eine Hauptursache für den Implantatwechsel, die abriebpartikelinduzierte aseptische Lockerung, zu reduzieren, werden neue tribologisch optimierte Oberflächen für Gelenk-Endoprothesen benötigt. Diese sollen über einen geringen Reibungskoeffizienten verfügen und den biomechanischen Ansprüchen im Gelenk genügen.

Daneben steigt durch die alternde Bevölkerung die Zahl an kardiovaskulären Erkrankungen kontinuierlich an. Seit Jahrzehnten gibt es etablierte Therapien basierend auf Gefäßprothesen (Stents). Eine Option, um die nach wie vor bestehenden Risikofaktoren zu reduzieren sind langzeitstabile anti-thrombogene Beschichtungen nach dem Vorbild der natürlichen Glykokalyx.



PROJEKTIDEE:

Als natürliche Vorbilder dienen der **hyaline Gelenkknorpel** und die **luminale Oberfläche der Blutgefäße**, die **endotheliale Glykokalyx**. Beide nutzen die **intermediäre Wasserphase**, welche durch die Wechselwirkungen mit der Oberfläche beeinflusst und gezielt optimiert werden kann, um die Biofunktionalität signifikant zu verbessern. So führt die Wasserphase im Hüftgelenk zur **Hydration-Lubrication** und so zu einer wasser-vermittelten nahezu physiologischen Tribologie zwischen den Gleitpartnern. Auf Gefäßprothesen werden definiert hydratisierte Dünnschichtsysteme mit einer Glykokalyx-analogen Struktur etabliert, um eine optimale **Antithrombogenität** zu erreichen. Die technische Umsetzung dieser Eigenschaften der natürlichen Vorbilder ist Gegenstand der Arbeiten im Projekt SELF-X-FOR-IMPLANTS.



PC: Phosphorylcholin, LbL: Layer-by-Layer

MATHYS IS NOW enovis™

„Erforschung eines keramischen Hüftoberflächenersatzes mit modifizierter Artikulationsoberfläche“

- Erforschung eines Strukturierungsansatzes durch Ultrakurz (UKP) gepulste Laser zur verbesserten Schichtanbindung
- Untersuchungen zur Auswirkung der Strukturierung auf mechanische und mikrostrukturelle Eigenschaften der Keramik

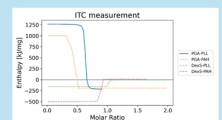


Laserstrukturierte Keramik



„Multiskaliges Matrix-Engineering zur Etablierung eines Kombinations-schichtsystems für tribologische und anti-thrombogene Anwendungen“

- Screening von möglichen Polyelektrolyt-Partnern, Linkern und Nachvernetzung
- Untersuchungen zur Tribologie und Hämostabilität

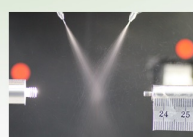


Thermodynamische Analyse per Isothermaler Titrationskalorimetrie



„Etablierung einer Beschichtungstechnologie auf Probenkörpern“

- Evaluierung der optimalen Beschichtungstechnologie
- Tauchbeschichtungen vs. Spraybeschichtungen



Spray-Beschichtungsanlage



„Rheologische, tribologische und biologische Charakterisierung der selbstorganisierenden Multilayer-Schichten“

- Tribologische Untersuchungen unter simulierten *In-vivo*-Bedingungen (physiologische Bewegungsabläufe, Synovia-Mimikry)
- Untersuchung der Schichtstabilität und biologische Analyse der Abriebsprodukte



6-Achs-Gelenk-Simulator

*Präsentierende Autoren

¹Institut für Bioprozess- und Analysemesstechnik e.V., Rosenhof, 37308 Heilbad Heiligenstadt

²Mathys Orthopädie GmbH, An den Trillers Büschen 2, 07646 Mörsdorf

³Hemoteq AG, Adenauerstr. 15, 5246 Würselen

⁴Orthopädische Klinik und Poliklinik, Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie, Universitätsmedizin Rostock (UMR), Doberaner Straße 142, 18057 Rostock

ProBand

Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben

Volker Junior^{1*}, Dr.-Ing. Christof Hübner², Daniel Bren³, Dr. Max Mylo⁴

1) phoenix GmbH & Co. KG; 2) Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM; 3) Festo SE & Co. KG; 4) Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK

Zielsetzung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung von programmierbaren Materialien für den Einsatz als Stoßdämpfer in technischen Anwendungen. Die Lösungen sollen von Wirkmechanismen inspiriert werden, die die menschliche Bandscheibe nutzt. Zielapplikation sind Stoßdämpfer wie sie heute beispielsweise in der Automatisierungstechnik eingesetzt werden.

Problemstellung

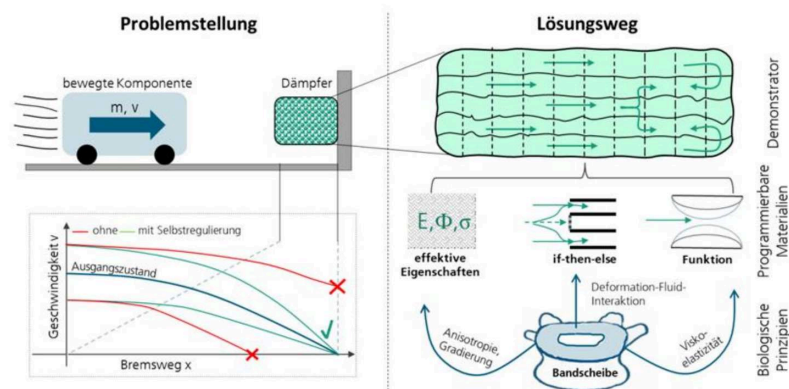
Dämpfungslösungen in der Automatisierungstechnik arbeiten häufig hydraulisch. Öl wird mit Hilfe eines Kolbens durch einen schmalen Spalt gepresst. Mit dem Widerstand wird die zu „dämpfende Masse“ abgebremst, die Bremsenergie wird in Form von Wärme dissipiert. Dabei werden die Dämpfer in der Regel nach der zu dissipierenden Energie und der Festlegung einer maximalen Bremskraft ausgelegt.

Der Dämpfer ist nicht in der Lage, sein Dämpfungsverhalten an unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten im Moment des Aufpralls oder veränderliche Massen anzupassen. Aufgabe des zu entwickelnden programmierbaren Materials ist es, möglichst große Spektren an zu dissipierender Energie abzubilden und sich dabei selbstständig darauf einzustellen, ob diese Energie eher von einer größeren Masse oder einer größeren Anfangsgeschwindigkeit herrührt.

Lösungsansatz und Bioinspiration

Dämpfungsverhalten, Aufbau und Wirkmechanismen der menschlichen Bandscheibe dienen als Inspiration für die Lösung. Die Bandscheibe, beziehungsweise der Verbund von Bandscheiben und Wirbelkörpern in der Wirbelsäule als Gesamtsystem, ist in der Lage, den unterschiedlichsten Lastsituationen gerecht zu werden - von der asymmetrischen langanhaltenden Belastung beim einarmigen Tragen bis zur Impact-situation bei der Landung nach einem Sprung.

Dabei nutzt sie, anders als heutige hydraulische Dämpfer, auch die Deformation des Grundkörpers. Diese kann zum Beispiel zur Veränderung der Fließwege eines Fluids genutzt werden. Der gradierte Aufbau der Bandscheibe - die Materialzusammensetzung, der Wassergehalt und die Struktur ändern sich von innen nach außen - dient als Inspiration für Aufbau und Elemente einer selbstregulierenden Lösung.



Problemstellung und Lösungsweg für eine selbstregulierende Dämpfung für optimales Bremsverhalten. Links: Lastfall und gewünschtes Zielverhalten. Rechts: Vorgehen im Projekt. Biologische Prinzipien (Wirkmechanismen) werden in programmierbare Materialien übertragen und in einem fluidegefüllten Demonstrator umgesetzt.

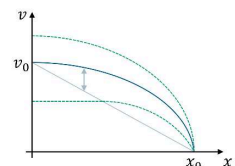
Stand des Projektes und erste Ergebnisse

Die Funktionsanalyse der bestehenden Lösung mit Erarbeitung des Anforderungsprofils an die Lösung ist abgeschlossen. Dabei wurde der Begriff Dämpfung in dem Sinne spezifiziert, dass das eher allgemeinsprachliche Verständnis für die Projektaufgabe verwendet wird. Während Dämpfung im technischen Sinne die Dissipation von Energie beispielsweise durch Flüssigkeitsreibung oder die Reduktion der Amplitude eines schwingenden Systems beschreibt, wird im allgemeinsprachlichen Gebrauch, gerade bei Schutzausrüstung, eher das Abbremsen eines Aufprallvorganges zur Vermeidung von Verletzungen, also die Zerstörung durch Überlastung einer Struktur, verstanden.

In diesem Sinne soll der „Dämpfer“ neben der geschwindigkeitsabhängigen Dissipation auch eine Federwirkung des Systems zur Realisierung eines idealen Systemverhaltens nutzen dürfen. Vermutlich wäre „Bremsen“ der treffendere Begriff.

Die Aufgabe besteht konkretisiert darin, einen Körper mit der Masse m , der mit der Geschwindigkeit v_0 auf den „Bremsen“ auftrifft, im verfügbaren Bremsweg x_0 auf die Geschwindigkeit $v = 0$ abzubremesen, und zwar idealerweise so, dass er den Bremsvorgang so regelt, dass die Bremszeit minimiert und eine definierte maximale Bremskraft nicht überschritten wird. Dabei stellt sich der Bremsen selbstständig auf unterschiedliche Massen und Anfangsgeschwindigkeiten ein.

Für das ideale Verhalten wurde eine Zielfunktion im Sinne einer If-Then-Else Funktion definiert:



$$\text{if } v < \left(v_0 - \frac{v_0}{x_0} \cdot x \right)$$

$$\text{Then } F_D = 0$$

$$\text{Else } F_D = d \cdot \left[v - \left(v_0 - \frac{v_0}{x_0} \cdot x \right) \right]$$

Für die in den Funktionsanalysen von Bandscheibe und technischem Dämpfer gefundenen Teilfunktionen wurden Ideen erarbeitet, in einem Morphologischen Kasten gegliedert und ihr Potential geschätzt. Zehn Basiselemente wurden ausgewählt, die jetzt zu Funktionsmustern ausgearbeitet und dann gefertigt und qualitativ geprüft werden. Einige Teilfunktionen wurden mit Handmustern erfolgreich abgebildet.

Projektkoordination

Volker Junior
phoenix GmbH & Co. KG
Josef-Felder-Straße 53
D-81241 München



A		Heusinger von Waldegge, Tim	13, 35	Nguyen, Viet Duc	13, 35
Arefaine, Elsa	15, 36	Hildebrand, Gerhard	28	Nolte, Nane	17, 37
B		Hirsch, Ulrike	21, 39	O	
Bader, Rainer	28, 42	Hofzumhaus, Norma	37	Oberbach, Thomas	28, 42
Binzer, Jürgen	21, 39	Hübner, Christof	40	P	
Blaeser, Andreas	15, 36	I		Plura, Jessica	8, 32
Borcherding, Kai	37	Izidoro-Santos, Murilo	21, 39	R	
Braun, Steffen	37	J		Richthof, Philipp	15, 36
Bucher, Felicitas	8, 32	Jaeger, Raimund	6, 31	Rothe, Holger	28, 42
Börke, Julia	28	Junior, Volker	23	S	
Börke, Julia Marie	42	K		Schmelzer, Christian	21, 39
E		Klein, Vanessa	37	Schmidt, Isabelle	15, 36
Erb, Rainer	4, 9	Kohlgrüber, Vera	13, 35	Sievers, Ernst-Udo	19, 38
F		Krohn, Jannik	40	Specht, Uwe	13, 35
Friedmann, Andrea	21, 39	L		Sprecht, Uwe	37
Friedrichs, Jens	26, 41	Langner, Markus	21, 39	Steer, Peter	6, 31
G		Lautenschläger, Dirk	19	Stricker, Birthe	13, 35
Gačanin, Jasmina	15, 36	Lelonek, Monika	21, 39	T	
Grafahrend, Dirk	28, 42	Leubner, Holger	21, 39	Thavathilakarjah, Dhusjanth	11
Grigoriev, Dmitry	38	Licht, Erik	6, 31	Thiele, Daniel	28, 42
Grom, Stefanie	37	Liebelt, Martin	28, 42	Thummaraj, Thunchanok	15, 36
Gryshchuk, Oleksandr	11, 34	Liefeith, Klaus	28, 42	V	
Gätjen, Linda	37	M		Vetyskova, Veronika	8, 32
H		Martins-Schalinski, Juliana	21, 39	W	
Hartmann, Axel	28	Menzel, H.-L.	13	Weber, Wilfried	8, 32
Hartmann, Hanna	15, 36	Menzel, Hannah	35	Wehrspohn, Ralf	21, 39
Hassenbach, Peter	2	Meyer, Daniel	33	Weil, Tanja	15, 36
He, Chao	37	Micke, Michael	35	Wiemer, Katharina	28
Henke, Paul	28	Mutz, Daniel	13, 35	Witt, Carolin	28, 42
N		N		Wolfram, Tobias	37