



Statuskonferenz 2025

# Konferenzband



# Inhaltsverzeichnis

Begleitworte	1
[#1] Vorwort des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt Hassenbach, P. (V) <sup>1</sup> <sup>1</sup> Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)	2
[#2] Einleitung: Biologisierung der Technik – eine Zukunftsperspektive Erb, R. (V) <sup>1</sup> <sup>1</sup> BIOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V.	3
Kurzvortrag	4
[Adaptribo-2] Adaptive Strukturbildung unter tribologischer Belastung von Antriebskomponenten aus sortenreinen Kompositen Jaeger, R. (V) <sup>1</sup> ; Glabatz, P. <sup>2</sup> ; Steer, P. <sup>3</sup> ; Kolano, B. <sup>3</sup> ; Schwonburg, T. <sup>4</sup> ; Reiser, R. <sup>4</sup> <sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg im Breisgau; <sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau; <sup>3</sup> 2RPS Mechatronik GmbH; <sup>4</sup> LyondellBasell	5
[BILLARD] Bioinspiriertes Polymer-basiertes Depot zur Verlängerung der Wirksamkeit von Medikamenten gegen Gefäßerkrankungen der Netzhaut Plura, J. <sup>1</sup> ; Vetyskova, V. <sup>2</sup> ; Trehin, P. <sup>2</sup> ; Bucher, F. <sup>3</sup> ; Weber, W. (V) <sup>4</sup> <sup>1</sup> Universitätsklinikum Freiburg; <sup>2</sup> Leibniz Institut für Neue Materialien; <sup>3</sup> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; <sup>4</sup> Leibniz Institut für Neue Materialien, Saarbrücken	7
[BioTrans] Wissens- und Technologietransfer bioinspirierter Lösungsansätze in Industrie und Gesellschaft Erb, R. (V) <sup>1</sup> ; Rudolph, J. <sup>2</sup> ; Groß, S. <sup>3</sup> ; Meyer, D. <sup>3</sup> ; Abel, A. <sup>4</sup> ; Klein, S. <sup>5</sup> <sup>1</sup> BIOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V., Berlin; <sup>2</sup> BIOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V.; <sup>3</sup> Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V.; <sup>4</sup> Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Sankt Augustin; <sup>5</sup> Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.	9
[CarBoMD] Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration Gryshchuk, O. (V) <sup>1</sup> ; Shettigar, P. <sup>2</sup> ; Nalbant, B. <sup>3</sup> ; Cervantes Gonzales, M.Y. <sup>3</sup> ; Jahr, H. <sup>3</sup> ; Emonts, C. <sup>1</sup> <sup>1</sup> Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University; <sup>2</sup> Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen University; <sup>3</sup> Institut für Anatomie und Zellbiologie der RWTH Aachen	11
[DeDrug-Bio] Abbau von Arzneimittelrückständen in Abwässern durch autarke, biohybride Filtersysteme Specht, U. (V) <sup>1</sup> ; Heusinger von Waldegge, T. <sup>1</sup> ; Kohlgrüber, V. <sup>2</sup> ; Menzel, H. <sup>3</sup> ; Mücke, M. <sup>4</sup> ; Mutz, D. <sup>3</sup> ; Nguyen, V.D. <sup>5</sup> ; Stricker, B. <sup>2</sup> <sup>1</sup> Fraunhofer IFAM, Bremen; <sup>2</sup> Kompetenzzentrum Spurenstoffe (KomS BW), Stuttgart; <sup>3</sup> hanseWasser Bremen GmbH; <sup>4</sup> Wilo SE, Dortmund; <sup>5</sup> SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz	13
[HEAL-X Bioink] Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting Richthof, P. (V) <sup>1</sup> ; Schmidt, I. <sup>2</sup> ; Thummaraj, T. <sup>3</sup> ; Bagherabadi, B. <sup>3</sup> ; Weil, T. <sup>3</sup> ; Gačanić, J. <sup>3</sup> ; Blaeser, A. <sup>1</sup> ; Hartmann, H. <sup>2</sup> <sup>1</sup> Technische Universität Darmstadt; <sup>2</sup> NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut, Reutlingen; <sup>3</sup> Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz	15
[OSTEOFUNK] Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie Nolte, N. <sup>1</sup> ; Gätchen, L. <sup>1</sup> ; Grom, S. <sup>2</sup> ; Klein, V. <sup>2</sup> ; Braun, S. <sup>2</sup> ; He, C. <sup>3</sup> ; HofzumaHaus, N. <sup>3</sup> ; Borchering, K. <sup>1</sup> ; Wolfram, T. (V) <sup>2</sup> <sup>1</sup> Fraunhofer IFAM, Bremen; <sup>2</sup> KLS Martin SE & CO. KG, Mülheim; <sup>3</sup> Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath	17
[PLackLoS] Pulverlack mit Lotus-Effekt - Selbstausbildend, Superhydrophob, Schmutzabweisend Herget, H. (V) <sup>1</sup> ; Grigoriev, D. <sup>2</sup> ; Schenderlein, M. <sup>2</sup> ; Sievers, E.-U. <sup>3</sup> <sup>1</sup> MPL Metall-Pulver- Lackierung GmbH; <sup>2</sup> Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung; <sup>3</sup> ieffo PartG	19
[Pinguin2] Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik Deng, C. <sup>1</sup> ; Izidoro Santos, M. (V) <sup>2</sup> ; Dulder, M. <sup>1</sup> ; Langner, M. <sup>3</sup> ; Martins de Souza e Silva, J. <sup>2</sup> ; Hirsch, U. <sup>4</sup> ; Pawlik, P. <sup>5</sup> ; Lelonek, M. <sup>5</sup> ; Schmelzer, C. <sup>4</sup> ; Wehrspohn, R. <sup>2</sup> ; Greiner, A. <sup>1</sup> ; Binzer, J. <sup>3</sup> ; Leubner, H. <sup>3</sup> <sup>1</sup> Neue Materialien Bayreuth GmbH; <sup>2</sup> Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale); <sup>3</sup> BinNova Microfiltration GmbH, Rudolstadt; <sup>4</sup> Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle (Saale); <sup>5</sup> SmartMembranes GmbH, Halle (Saale)	21

<b>[ProBand] Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben</b>	<b>23</b>
Mylo, M. (V) <sup>1</sup> ; Bren, D. <sup>2</sup> ; Wenz, F. <sup>3</sup>	
<sup>1</sup> Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK, Freiburg im Breisgau; <sup>2</sup> Festo SE & Co. KG, Esslingen; <sup>3</sup> Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM, Freiburg im Breisgau	
<b>[SATORIS] Superamphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme</b>	<b>25</b>
von Strauwitz, T. (V) <sup>1</sup> ; Werner, C. <sup>2</sup> ; Friedrichs, J. <sup>2</sup> ; Wicker, K. <sup>3</sup> ; Quintanilha, R. <sup>3</sup> ; Voigt, A. <sup>4</sup> ; Prätorius, S. <sup>4</sup>	
<sup>1</sup> Carl Zeiss AG, Dresden; <sup>2</sup> Leibniz Institute of Polymer Research Dresden; <sup>3</sup> Carl Zeiss AG; <sup>4</sup> Technische Universität Dresden	
<b>[SELF-X-FOR-IMPLANTS] Hydratisierte Polyelektrolyt-Multilayer-Architekturen mit Self-Healing Potential für die Implantologie</b>	<b>27</b>
Thiele, D. (V) <sup>1</sup> ; Waletzko, J. <sup>1</sup> ; Jonitz-Heincke, A. <sup>1</sup> ; Bader, R. <sup>1</sup> ; Witt, C. <sup>2</sup> ; Hartmann, A. <sup>2</sup> ; Liebelt, M. <sup>2</sup> ; Oberbach, T. <sup>2</sup> ; Börke, J.M. <sup>3</sup> ; Rothe, H. <sup>3</sup> ; Hildebrand, G. <sup>3</sup> ; Liefeth, K. <sup>3</sup> ; Grafahrend, D. <sup>4</sup> ; Wiemer, K. <sup>4</sup>	
<sup>1</sup> Universitätsmedizin Rostock; Orthopädische Klinik und Poliklinik; Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie; <sup>2</sup> Mathys Orthopädie GmbH, Mörsdorf; <sup>3</sup> Institut für Bioprozess- und Analysemesstechnik e.V., Heilbad Heiligenstadt; <sup>4</sup> Hemoteq AG, Würselen	
<b>Poster</b>	<b><u>29</u></b>
<b>[AdapTribo-2] Adaptive Strukturbildung bei sortenreinen Kompositen unter tribologischer Belastung</b>	<b>30</b>
Jaeger, R. (V) <sup>1</sup> ; Glabatz, P. <sup>2</sup> ; Schwonburg, T. <sup>3</sup> ; Reiser, R. <sup>3</sup> ; Steer, P. <sup>4</sup> ; Kolano, B. <sup>4</sup>	
<sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg im Breisgau; <sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik (IWM) Geschäftsfeld Bauteilsicherheit und Leichtbau; <sup>3</sup> LyondellBasell; <sup>4</sup> 2RPS Mechatronik GmbH	
<b>[BILLARD] Bioinspiriertes Polymer-basiertes Depot zur Verlängerung der Wirksamkeit von Medikamenten gegen Gefäßerkrankungen der Netzhaut</b>	<b>31</b>
Plura, J. <sup>1</sup> ; Vetyiskova, V. <sup>2</sup> ; Trehin, P. <sup>2</sup> ; Bucher, F. <sup>3</sup> ; Weber, W. (V) <sup>4</sup>	
<sup>1</sup> Universitätsklinikum Freiburg; <sup>2</sup> Leibniz Institut für Neue Materialien; <sup>3</sup> Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; <sup>4</sup> Leibniz Institut für Neue Materialien, Saarbrücken	
<b>[BioTrans] Wissens- und Technologietransfer bioinspirierter Lösungsansätze in Industrie und Gesellschaft</b>	<b>32</b>
Rudolph, J. (V) <sup>1</sup> ; Erb, R. <sup>1</sup> ; Meyer, D. <sup>2</sup> ; Groß, S. <sup>2</sup> ; Abel, A. <sup>3</sup> ; Klein, S. <sup>3</sup>	
<sup>1</sup> BLOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V.; <sup>2</sup> Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V.; <sup>3</sup> Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.	
<b>[CarBoMD] Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration</b>	<b>33</b>
Gryshchuk, O. (V) <sup>1</sup> ; Cervantes Gonzales, M.Y. <sup>2</sup> ; Emonts, C. <sup>1</sup> ; Jahr, H. <sup>2</sup> ; Nalbant, B. <sup>2</sup> ; Shettigar, P. <sup>3</sup>	
<sup>1</sup> Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University; <sup>2</sup> Institut für Anatomie und Zellbiologie der RWTH Aachen; <sup>3</sup> Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen	
<b>[DeDrug-Bio] Autarke biohybride Filtersysteme zum Abbau von Arzneimittelnrückständen</b>	<b>34</b>
Specht, U. (V) <sup>1</sup> ; Heusinger von Waldegge, T. <sup>1</sup> ; Kohlgrüber, V. <sup>2</sup> ; Menzel, H. <sup>3</sup> ; Micke, M. <sup>4</sup> ; Mutz, D. <sup>3</sup> ; Nguyen, V.D. <sup>5</sup> ; Stricker, B. <sup>2</sup>	
<sup>1</sup> Fraunhofer IFAM, Bremen; <sup>2</sup> Kompetenzzentrum für Spurenstoffe Koms BW, stuttgart; <sup>3</sup> hanseWasser Bremen GmbH; <sup>4</sup> Wilo SE, Dortmund; <sup>5</sup> SITEC Industrietechnologie GmbH, Chemnitz	
<b>[HEAL-X Bioink] Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting</b>	<b>35</b>
Schmidt, I. (V) <sup>1</sup> ; Richthof, P. <sup>2</sup> ; Thummaraj, T. <sup>3</sup> ; Bagherabadi, M. <sup>4</sup> ; Arefaine, E. <sup>1</sup> ; Weil, T. <sup>3</sup> ; Gacanan, J. <sup>3</sup> ; Blaeser, A. <sup>2</sup> ; Hartmann, H. <sup>1</sup>	
<sup>1</sup> NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut, Reutlingen; <sup>2</sup> Technische Universität Darmstadt; <sup>3</sup> Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Abteilung Synthese für Makromoleküle, Mainz; <sup>4</sup> Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz	
<b>[OSTEOFUNK] Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie</b>	<b>36</b>
Nolte, N. <sup>1</sup> ; Gätjen, L. <sup>1</sup> ; Grom, S. <sup>2</sup> ; Klein, V. <sup>2</sup> ; Braun, S. <sup>2</sup> ; He, C. <sup>3</sup> ; Hofzumahaus, N. <sup>3</sup> ; Borchertding, K. <sup>1</sup> ; Wolfram, T. (V) <sup>2</sup>	
<sup>1</sup> Fraunhofer IFAM, Bremen; <sup>2</sup> KLS Martin SE & Co. KG, Mühlheim; <sup>3</sup> Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath	
<b>[PLackLoS] Pulverlack mit Lotus-Effekt - Selbstausbildend, Superhydrophob, Schmutzabweisend</b>	<b>37</b>
Herget, H. (V) <sup>1</sup> ; Sievers, E.-U. <sup>2</sup>	
<sup>1</sup> MPL Metall-Pulver- Lackierung GmbH; <sup>2</sup> eiffo PartG, Aichtal	
<b>[Pinguin2] Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik</b>	<b>38</b>
Deng, C. <sup>1</sup> ; Izidoro Santos, M. (V) <sup>2</sup> ; Dulder, M. <sup>1</sup> ; Langner, M. <sup>3</sup> ; Martins de Souza e Silva, J. <sup>2</sup> ; Hirsch, U. <sup>4</sup> ; Pawlik, P. <sup>5</sup> ; Lelonek, M. <sup>5</sup> ; Schmelzer, C. <sup>4</sup> ; Wehrspohn, R. <sup>2</sup> ; Greiner, A. <sup>1</sup> ; Binzer, J. <sup>3</sup> ; Leubner, H. <sup>3</sup>	
<sup>1</sup> Neue Materialien Bayreuth GmbH; <sup>2</sup> Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale); <sup>3</sup> BinNova Microfiltration GmbH, Rudolstadt; <sup>4</sup> Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle (Saale); <sup>5</sup> SmartMembranes GmbH, Halle (Saale)	



---

[ProBand] Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben 39

Mylo, M. (V)<sup>1</sup>; Bren, D.<sup>2</sup>; Wenz, F.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK, Freiburg im Breisgau; <sup>2</sup>Festo SE & Co. KG, Esslingen; <sup>3</sup>Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM, Freiburg im Breisgau

---

[SATORIS] Superamphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme 40

von Strauwitz, T. (V)<sup>1</sup>; Friedrichs, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Carl Zeiss AG; <sup>2</sup>Leibniz Institute of Polymer Research Dresden

---

[SELF-X-FOR-IMPLANTS] Hydratisierte Polyelektrolyt-Multilayer-Architekturen mit Self-Healing Potential für die Implantologie 41

Börke, J.M. (V)<sup>1</sup>; Thiele, D.<sup>2</sup>; Waletzko, J.<sup>2</sup>; Jonitz-Heincke, A.<sup>2</sup>; Bader, R.<sup>2</sup>; Witt, C.<sup>3</sup>; Hartmann, A.<sup>3</sup>; Liebelt, M.<sup>3</sup>; Oberbach, T.<sup>3</sup>; Grafarend, D.<sup>4</sup>; Wiemer, K.<sup>4</sup>; Rothe, H.<sup>1</sup>; Hildebrand, G.<sup>1</sup>; Liefelth, K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V., Heilbad Heiligenstadt; <sup>2</sup>Universitätsmedizin Rostock (UMR); <sup>3</sup>Mathys Orthopädie GmbH, Mörsdorf; <sup>4</sup>Hemoteg AG, Würselen

---



## Begleitworte

## **Vorwort des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt**

---

Liebe Leserin, lieber Leser,

das bisherige Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) wurde mit Wirkung zum 6. Mai 2025 im Rahmen einer Umstrukturierung der Ressorts in das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter Leitung von Ministerin Dorothee Bär überführt. Die Förderung der Materialforschung bleibt davon jedoch unberührt – als Schlüsseltechnologie stellt sie weiterhin eine zentrale Säule der Forschungs- und Innovationspolitik des Bundes dar.

Die Kontinuität in der Forschungs- und Innovationsförderung wird mit dem neuen Materialforschungsprogramm „Materialinnovationen für die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft (Mat2Twin)“, das Anfang 2025 veröffentlicht wurde und in das Rahmenprogramm „Forschung und Innovation für Technologische Souveränität 2030 (FITS 2030)“ eingebettet wird, bestätigt. Mat2Twin unterstreicht im Rahmen der strategischen Ausrichtung der nächsten zehn Jahre die Bedeutung der bioinspirierten Materialforschung: Sie weist den Weg zu innovativen Werkstoffen, die Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit vereinen – und so Lösungen ermöglichen, die ökologische Verantwortung mit technologischer Souveränität verbinden.

Bioinspirierte Konzepte bieten besonders in der Materialforschung herausragende Innovationspotenziale, oft mit deutlichen Vorteilen gegenüber traditionellen Ansätzen. Von flexiblen und zugleich stabilen Strukturen bis hin zu selbstheilenden oder sich selbst organisierenden Materialien – die Beispiele sind vielfältig: So dient der Farbwechsel des Chamäleons als Inspirationsquelle für die Entwicklung von Strukturtinten im 3D-Druck, deren Farbe sich dynamisch verändern lässt. Muskeln und Tentakel inspirieren in der Softrobotik die Entwicklung von Materialien, die auf elektrische Spannung mit Bewegung reagieren, und die Struktur von Fischeschuppen liefert Impulse für widerstandsfähige Schutzmaterialien.

Bioinspirierte Materialien und Technologien können nicht nur zu neuen Produkten führen, sondern Unternehmen in Deutschland auch bei der Umstellung auf nachhaltigere Produktionsweisen unterstützen. Energieeffiziente Fertigung, Materialeinsparungen und beschleunigte Prozesse senken Kosten und helfen zugleich, den wachsenden Anforderungen von Politik und Gesellschaft in puncto Nachhaltigkeit gerecht zu werden. In einem global wettbewerbsintensiven Umfeld ist dies entscheidend, um die Zukunftsfähigkeit unserer Wirtschaft zu sichern und sie zugleich umweltfreundlicher und widerstandsfähiger gegenüber Krisen zu gestalten. Damit kann sich Deutschland als Vorreiter im Bereich biologisierter Technik positionieren.

Um die Potenziale einer Biologisierung der Technik vollständig zu erschließen, braucht es gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung. Daher fördert das BMFTR zwölf innovative, interdisziplinär aufgestellte Verbundprojekte mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie, die darauf abzielen, biologische Prinzipien in abstrahierter Form für die Erforschung und Entwicklung neuer materialwissenschaftlicher Lösungsansätze zu nutzen und deren Potenzial für industrielle Anwendungen zu validieren.

Der vorliegende Konferenzband zur 2. Statuskonferenz stellt die Zwischenergebnisse der geförderten Projekte der Maßnahme „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“ vor. 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

## **Einleitung: Biologisierung der Technik – eine Zukunftsperspektive**

---

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 BMFTR-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 BIOKON, 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 zweiten Statuskonferenz der Fördermaßnahme haben Sie die Gelegenheit, die Fortschritte der Projekte zu diskutieren, 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 BIOKON





## Kurzvortrag

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

R. Jaeger<sup>1\*</sup>, P. Glabbatz<sup>1</sup>, P. Steer<sup>2</sup>, B. Kolano<sup>2</sup>, T. Schwonburg<sup>3</sup>, R. Reiser<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, <sup>2</sup>2RPS Mechatronik GmbH, <sup>3</sup>Basell Polyolefine GmbH

\*raimund.jaeger@iwm.fraunhofer.de

Kunststoffe nehmen als Werkstoffe für Antriebssysteme eine zunehmend bedeutende Rolle ein. Neben vorteilhaften Einseigenschaften (z.B. eine hohe Korrosionsbeständigkeit und gute Dämpfungseigenschaften) sind Kunststoffe potenziell nachhaltiger als andere Werkstoffe – beispielsweise tragen sie durch ihr geringes Gewicht zu energiesparenden Leichtbaulösungen bei. Insbesondere Polyolefine sind „low carbon footprint materials“: sie können hoch energieeffizient hergestellt werden, der Energiebedarf und CO<sub>2</sub> – Fußabdruck ist verglichen mit Metallen oder Keramiken gering. Im Vergleich zu anderen Kunststoffen schneiden Polyethylen und Polypropylen in LCA-Analysen besser ab<sup>1</sup>. Im Projekt AdapTribo-2 werden sogenannte Polyolefin-Reaktorblends untersucht. Diese weisen eine breite Molekulargewichtsverteilung auf - von eher niedermolekularem PE über PE mittleren Molekulargewichts (HDPE) bis hin zu unverschlaufem ultrahochmolekularem PE (UHMWPE). Diese Reaktorblends können mit gängigen extrusionsbasierten Verfahren verarbeitet werden und sind mehrfach ohne Qualitätseinbußen recycelfähig<sup>2-4</sup>. Scherströmungen während der Verarbeitung können die ultrahochmolekulare Fraktion zu Fibrillen verstrecken; diese Strukturbildung führt zu einem sortenreinen Komposit mit deutlich besseren mechanischen und tribologischen Kennwerten<sup>5</sup>. Im Projekt „AdapTribo“ des Ideenwettbewerbs „Biologisierung der Technik“ konnte gezeigt werden, dass sich die verstärkenden Strukturen auch im Reibkontakt ausbilden und die tribologischen Einseigenschaften des Werkstoffs verbessern können. Die Reaktorblends passen sich – ähnlich wie lebendiges Gewebe – externen Belastungen an, um diesen besser widerstehen zu können<sup>6</sup>.

Im Projekt AdapTribo-2 soll untersucht werden, wie diese Strukturbildung in realen technischen Systemen am Beispiel einer Verzahnung (Zahnrad-Zahnrad) erreicht und genutzt werden kann. LyondellBasell entwickelt und charakterisiert hierfür einen Polyethylen-Reaktorblend mit gesteigertem UHMWPE Anteil, der eine erhöhte Abriebbeständigkeit aufweisen soll. Zentral für die technische Nutzung des Reaktorblends ist die Fließfähigkeit der Systeme. Die Katalysatorsysteme und Reaktortechnologie werden iterativ so angepasst, dass das Verhältnis und die Verteilung des HDPE und des UHMWPE eine Schmelzprozessierbarkeit trotz des gesteigerten UHMWPE-Gehalts garantieren. Um zeitnah ein optimales Verhältnis von UHMWPE und HDPE identifizieren zu können, werden neben den aufwändigen Versuchen zur katalytischen Herstellung der Reaktorblends auch konventionelle Compounds von HDPEs und Reaktorblends mit hohem UHMWPE-Anteil hinsichtlich ihrer Fließeigenschaften in der Schmelze und der mechanischen Eigenschaften untersucht – die eng mit der Verarbeitung verbunden sind. Um Sondereffekt in der Strukturbildung auf Grund des gesteigerten UHMWPE-Gehalts frühzeitig erkennen zu können, wird die Ausbildung der kristallinen Nanostrukturen in den RBs bereits im Spritzgussverfahren untersucht. Aus den Ergebnissen soll die Ausbildung der kristallinen Nanostrukturen in Abhängigkeit des UHMWPE-Gehalts besser verstanden werden – sowohl in der Schmelze als auch im Reibkontakt.

Das Fraunhofer IWM untersucht in tribologischen Modellexperimenten die Bedingungen, unter denen sich die verstärkenden Strukturen ausbilden können und wie sich diese Strukturen auf die tribologischen Einseigenschaften auswirken. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Strukturbildung unter realistischen tribologischen Einsatzbedingungen, beispielsweise in geschmierten Systemen oder in Systemen mit intermittierenden tribologischen Belastungen. Die Schmierstoffverträglichkeit der Reaktorblends in Kontakt mit verschiedenen Reibpartnern wird über einen weiten Bereich von Gleitgeschwindigkeiten durch die Aufnahme von Stribeckkurven untersucht. Im Ring-Scheibe- und Stift-Scheibe-Tribometer werden tribologische Experimente gegen Stahl technischer Rauheit als

Reibpartner durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass durch geeignete tribologische Belastungen die Verschleißbeständigkeit eines reinen Reaktorblends (100RB14) und eines mit 50% HDPE compoundingierten Reaktorblends (50RB14) erhöht werden kann. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass sich unter einer intermittierenden tribologisch/thermischen Belastung (Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{\text{hoch}}$  vs.  $\omega_{\text{niedrig}}$ ) in einem mit unpolarem Polyalkylenglykol (uPG) geschmierten System die verstärkenden Shish-Kebab-Strukturen in Reibrichtung ausbilden<sup>7</sup>.

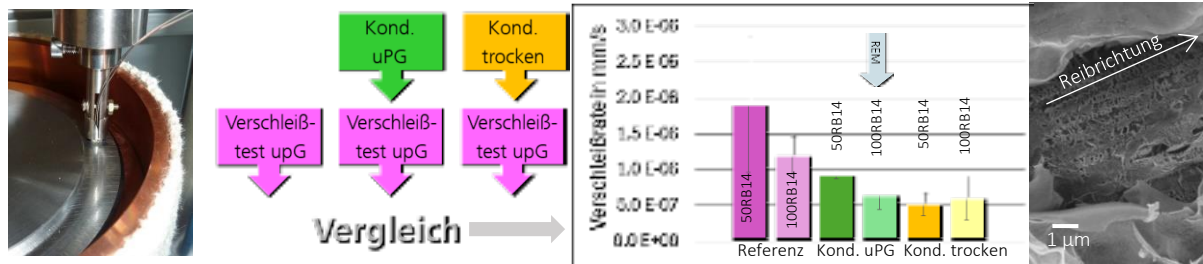


Abb. 1: Links: Stift-Scheibe-Tribometer. Mitte: *in-situ* Konditionierung und Verschleißtest: Verschleißtest uPG: in uPG,  $\sigma = 3$  MPa,  $t = 4$  h,  $\omega = 60$  rpm; Konditionierung uPG: in uPG,  $\sigma = 3$  MPa,  $\Delta t = 6$  s,  $\omega_{\text{hoch}} = 60$  rpm,  $\omega_{\text{niedrig}} = 6$  rpm; Konditionierung trocken:  $\sigma = 3$  MPa,  $\Delta t = 6$  s,  $\omega_{\text{hoch}} = 90$  rpm,  $\omega_{\text{niedrig}} = 9$  rpm. Rechts: Shish-Kebab-Strukturen in Reibrichtung, 100RB14 uPG.

2RPS entwickelt einen Komponentenprüfstand, mit dem komplexen tribologische und thermische Belastungen in einem geschmierten System dargestellt und deren Einfluss auf die Strukturbildung untersucht werden können. Die Prüflinge (Scheiben- und Zahnradpaarungen) werden bei 2RPS mit unterschiedlichen Verfahren gefertigt. Unterschiedliche Materialpaarungen können mit verschiedenen Testabläufen und Belastungsfällen untersucht und verglichen werden. Erste Versuche sollen mit Scheibenpaarungen durchgeführt werden, die während einer Umdrehung mit unterschiedlichem Anpressdruck beaufschlagt werden können. Ebenso können sich die Reibpartner mit unterschiedlichen Drehzahlen gegenüberstellen, um die Reibung an den Berührflächen zu erzeugen. Die Testläufe sollen sowohl trocken als auch geschmiert stattfinden.

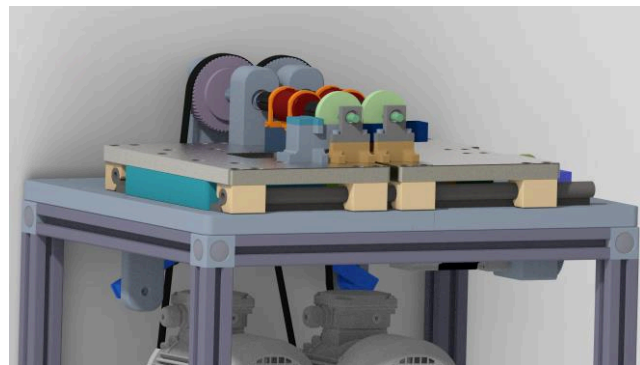


Abb. 2: Konzept des Komponentenprüfstands

2RPS und das Fraunhofer IWM beteiligen sich an der Initiative „Material Digital“ zur Digitalisierung von Werkstoffdaten. Im Rahmen des Projekts sollen durch eine semantische Beschreibung tribologischer Systeme die Material- und Messdaten für eine Auswertung mit maschinellem Lernen und mechanismenbasierter Wissensverknüpfung vorbereitet werden. Fokus soll auf Experimenten an geschmierten Systemen (Stribeckkurven aus Modellexperimenten und Komponententests) liegen, die mit Wechselwirkungsenergien verknüpft werden, die die Spreitungs- und „Anlösetendenz“ von Schmierstoffen beschreiben<sup>8</sup>. Perspektivisch soll hieraus ein Tool zur Unterstützung der Schmierstoffauswahl entstehen.

## 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 Koplín, R Jaeger, R Mülhaupt; Polymer, **2018**, 151, 47–55.
- [6] S Seif; Tribology of All-Hydrocarbon-Composites, MSc Thesis, Paris, **2023**.
- [7] P Glabbatz; Aufklärung der Einflüsse von reibinduzierter Deformation auf die Strukturentwicklung von sortenreinen Reaktionsblends, BSc Thesis, Westfälische Hochschule, **2025**.
- [8] C Koplín, H Oehler, O. Praß, B. Schlüter, I. Alig, I., R. Jaeger; Lubricants, **2022**, 10, 93-123.

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

---

J. Plura<sup>1</sup>, Dr. V. Vetyšková<sup>2</sup>, P. Trehin<sup>2</sup>, PD Dr. F. Bucher<sup>1</sup>, MD, Dipl. Vwl., Prof. Dr. W. Weber<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Klinik für Augenheilkunde, Universitätsklinikum Freiburg

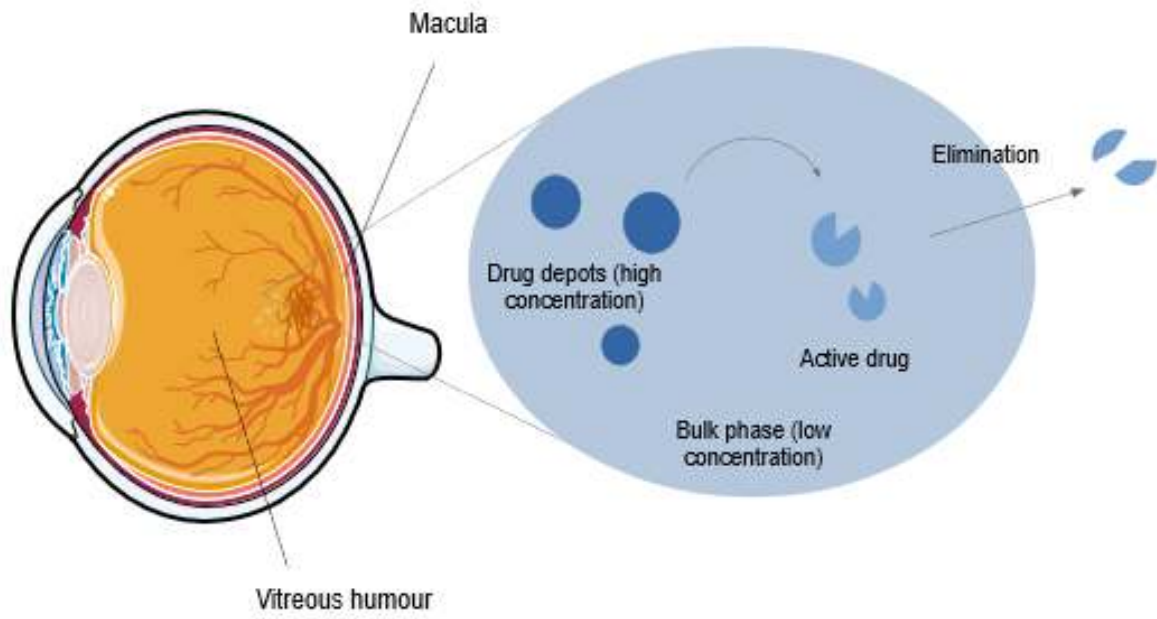
<sup>2</sup> INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien, Saarbrücken

<sup>3</sup> Universität des Saarlandes, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Saarbrücken

Das Projekt BILLARD konzentriert sich auf die Behandlung von retinalen Gefäßerkrankungen, insbesondere auf die altersbedingte Makuladegeneration (AMD), die in den Industrieländern die Hauptursache für Sehverschlechterung im Alter darstellt. Der vaskuläre endotheliale Wachstumsfaktor (VEGF) stellt dabei einen zentralen Mediator in der Krankheitsentstehung dar. Die Injektion von Anti-VEGF-Inhibitoren direkt in den Glaskörper des Auges stellt den aktuellen Behandlungsstandard dar. Diese Injektionen müssen alle 4 bis 8 Wochen verabreicht werden und erzeugen neben dem Risikoprofil des Eingriffs eine hohe Behandlungslast für Patienten und Behandler. Deshalb besteht ein dringender Bedarf an Therapien, die das Intervall zwischen den Injektionen verlängern können. Um diesen Bedarf an verlängerten Therapieintervallen zu decken, verfolgt unser Projekt BILLARD die Entwicklung eines natürlich inspirierten, polymerbasierten Depotsystems für bereits zugelassene VEGF-Inhibitoren.

Das von uns entwickelte biobasierte Depot besteht aus verschiedenen biobasierten Komponenten, die eine gleichmäßige Freisetzung des Medikaments ermöglichen oder das Depot sichtbar machen, um die Freisetzung optisch zu verfolgen. Es ist uns bereits gelungen, eine erste Version des biobasierten Depots zur gleichmäßigen Freisetzung zu formulieren. Unser Ziel ist nun, die Freisetzungskinetik an die benötigte Wirkstoffkonzentration im Auge anzupassen. Dies erfolgt durch Modulierung der Biopolymer-Formulierung und des Kopplungsmechanismus. Parallel dazu führten wir in vitro und ex vivo Toxizitätstests mit mehreren der biobasierten Depot-Komponenten durch. Bislang erscheinen die getesteten Einzelbestandteile im Hinblick auf den Einsatz in der Netzhaut sicher und stützen somit ihr Potenzial für die Behandlung von Netzhauterkrankungen. In den späteren Phasen dieses Projekts werden wir unsere Depotformulierungen auf die nachhaltige Freisetzung kommerziell verfügbarer Anti-VEGF-Inhibitoren untersuchen und deren Wirksamkeit über die Zeit sowohl in Zellkultur- als auch in Mausmodellen von retinalen Gefäßerkrankungen bewerten.





**Abbildung 1.** Schematische Darstellung der langsamen Freisetzung von Proteinen von Biopolymer-gebundenen Matrizen

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

Dr. Rainer Erb<sup>1\*</sup>, Jessica Rudolph<sup>1</sup>, Dr. Daniel Meyer<sup>2</sup>, Sabine Groß<sup>2</sup>, Dr. Stefan Klein<sup>3</sup>, Andreas Abel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BIONIKON – Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e.V., <sup>2</sup> DGO – Deutsche Gesellschaft für Galvano- und Oberflächentechnik e.V., <sup>3</sup> DGM – Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.

\*BioTrans@biologisierung-der-technik.de

Technologische Innovationen sind die Grundlage für eine zukunftsfähige Gesellschaft. Laut Innovationsindikator 2024 des Bundesverbands der Deutschen Industrie (BDI) zeigt sich jedoch, dass Deutschlands Innovationskraft derzeit hinter den Erwartungen zurückbleibt [1]. Eine vielversprechende Möglichkeit, diesem Trend entgegenzuwirken, liegt in der Biologisierung der Technik – einem Ansatz, der auf Bioinspiration beruht und in den letzten Jahren zunehmend wissenschaftliche Aufmerksamkeit erfahren hat [2–4]. Die Natur bietet hierfür einen nahezu unbegrenzten Pool an Vorbildern und Lösungsprinzipien.

Das wissenschaftliche Verbundprojekt BioTrans untersucht, wie bioinspirierte Ansätze in der Material- und Werkstoffforschung dazu beitragen können, den Forschungs- und Industriestandort Deutschland zu stärken. Im Fokus stehen der Wissens- und Technologietransfer innerhalb der BMFTR-Fördermaßnahme „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“. Die Projektpartner BIONIKON, DGM und DGO bündeln dabei ihre umfangreiche Fachkompetenz und Netzwerke aus Wissenschaft und Industrie.

Ziel der Begleitforschung ist es, die Innovations- und Nachhaltigkeitspotenziale einer biologisierten Technik sichtbar zu machen, zu vernetzen und zu multiplizieren. BioTrans unterstützt die einzelnen Förderprojekte, begleitet Innovationsprozesse und trägt dazu bei, Forschungsergebnisse in nachhaltige Wertschöpfung zu überführen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Transfer in KMU und Start-ups, um deren Zugang zu neuen Erkenntnissen und Technologien zu erleichtern. Eine umfassende Öffentlichkeitsarbeit unterstützt den Wissens- und Technologietransfer und stärkt die Sichtbarkeit der Fördermaßnahme.

Über die Website [biologisierung-der-technik.de](https://biologisierung-der-technik.de) fungiert BioTrans als zentraler Content-Hub. Dort werden die zwölf geförderten FuEul-Projekte mit Projektsteckbriefen und Präsentationen vorgestellt. Ergänzend informieren Flyer, Newsletter und Social-Media-Aktivitäten – insbesondere der LinkedIn-Kanal von BioTrans – über aktuelle Entwicklungen.

Die Projekte wurden und werden intensiv begleitet und im Sinne eines Community-Buildings miteinander vernetzt. Zur Förderung des wissenschaftlichen Austauschs werden vielfältige Netzwerk- und Veranstaltungsformate umgesetzt: Neben einer erfolgreichen Statuskonferenz mit der Verleihung des BIONIKON-Nachwuchspreises Bionik Award fanden 2024 zwei Future Meetings für Nachwuchswissenschaftler\*innen statt und es wurde eine Webinar-Reihe zum Wissenstransfer biologischer Prinzipien in technische Anwendungen gestartet.

Darüber hinaus präsentierte BioTrans die Biologisierung der Technik auf Fachveranstaltungen wie der MatFo 2025 und der MaterialsWeek, wo innovative Beispiele bioinspirierter Materialforschung vorgestellt wurden. Am eigenen Messestand informierte BioTrans nicht nur über die zwölf aktuell vom BMFTR geförderten Biologisierungsprojekte, sondern präsentierte auch anschauliche Exponate zur bioinspirierten Materialforschung. Die beeindruckende thematische Bandbreite – von programmierbaren Dämpfungsmaterialien für die Produktionstechnik bis hin zu selbstheilenden, druckbaren Gewebestrukturen für die Medizin von morgen – stellte einen vielbeachteten Themenschwerpunkt der

MaterialsWeek dar. In einem Doktorandenseminar zur Fragestellung, wie digitale Werkzeuge sinnvoll in die Materialforschung integriert werden können und einem interaktiven Workshop erlebten Teilnehmende praxisnah, wie sich biologische Ideen systematisch in technische Innovationen übertragen lassen – Bioinspiration als Treiber zukunftsfähiger Technologien.



**Abbildung 1.** Erste Statuskonferenz 2024 bei Festo in Esslingen am Neckar. Die Teilnehmenden der Statuskonferenz stellten ihre Forschungsansätze vor - Start für einen inspirierenden Austausch (Quelle: BioTrans).

## 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] T. Marzi, V. Knappertsbusch, A. Marzi, S. Naumann, G. Deerberg, E. Weidner, *Fragen zu einer biologischen Technik*, **2018**, *UMSICHT-Diskurs* 2, 1-114.
- [4] 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: Cartilage Bone Medical Device

### Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration

O. Gryshchuk<sup>1\*</sup>, P. Shettigar<sup>2</sup>, B. Nalbant<sup>3</sup>, M. Y. Cervantes Gonzales<sup>3</sup>, H. Jahr<sup>2,3</sup>, C. Emonts<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA), Aachen

<sup>2</sup>Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen (SLA), Aachen

<sup>3</sup>Institut für Anatomie und Zellbiologie der RWTH Aachen (ANATZ), Aachen

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

Arthrose ist eine häufige degenerative Gelenkerkrankung, die den Gelenkknorpel und den darunter liegenden Knochen schädigt. Zu den Risikofaktoren zählen Sportverletzungen, Übergewicht, Fehlstellungen der Gelenke und Alterung. In Deutschland ist jeder Fünfte im Alter von über 65 Jahren von Arthrose betroffen, die in 72 % der Fälle ohne Behandlung zu einer fortschreitenden Osteoarthritis und einem vollständigen Gelenkersatz führen kann. <sup>[1]</sup>

Tiefe Knorpeldefekte oder osteochondrale Läsionen betreffen die Schnittstelle zwischen Knorpel und Knochen. Der derzeitige Goldstandard sind autologe Knorpel-Knochen-Transplantate. Hierbei werden zylindrische Transplantate aus weniger belasteten Gelenkbereichen entnommen und an den Defektstellen implantiert werden. Dieser Ansatz ist jedoch durch die Verfügbarkeit von Spendergewebe, unterschiedlichen Knorpeldicken und die Morbidität der Entnahmestelle begrenzt. <sup>[2]</sup>

Um diese Probleme anzugehen, konzentriert sich dieses Projekt auf die Entwicklung eines zweiphasigen, resorbierbaren, porösen Knochen-Knorpel-Implantats. Das Implantat soll die biologischen und mechanischen Eigenschaften von Knorpel und Knochen nachbilden, einschließlich der kalzifizierten Knorpelübergangszone und der fibrösen Knorpelstruktur, wobei der Schwerpunkt auf einem biomimetischen Design liegt. <sup>[3,4]</sup>

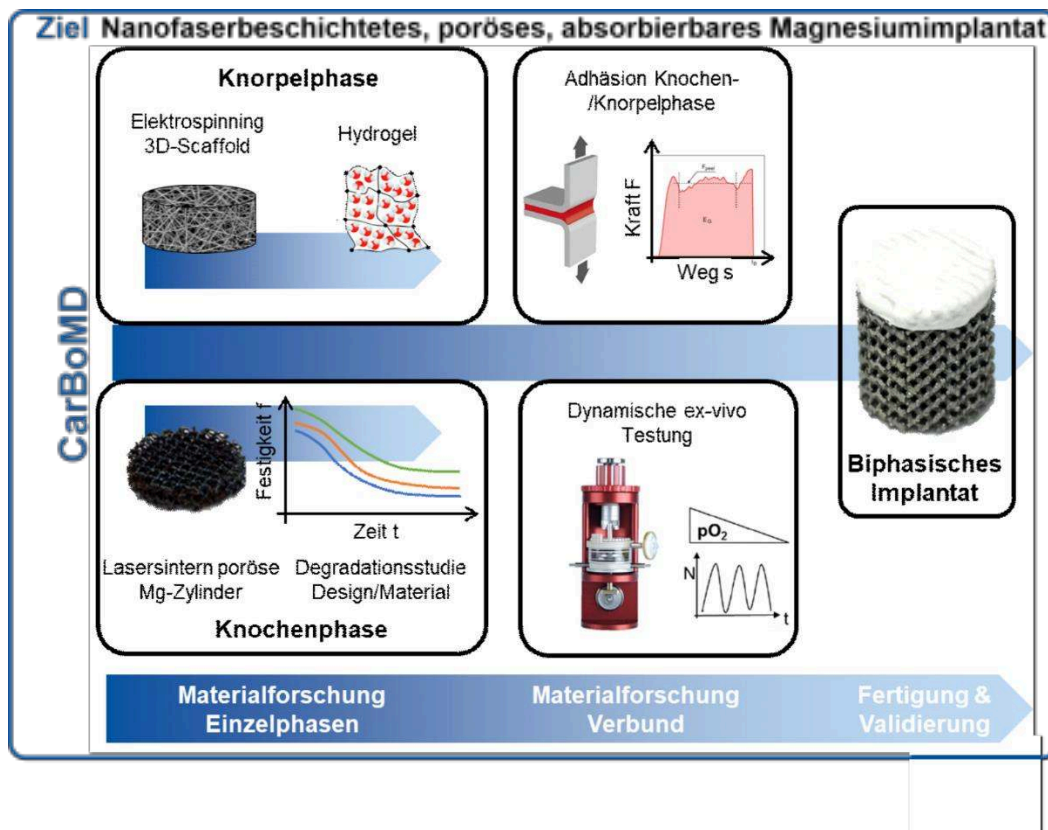


Abbildung 1. Mission Bild des CarBoMD Projekts.



Die Knochenphase wurde unter Berücksichtigung verschiedener Arten von Einheitszellen und Abmessungen entwickelt. Die Gitterstruktur wurde mit Grasshopper entworfen, einem algorithmischen Designtool in Rhinoceros 3D, das auch zur Validierung der geometrischen Eigenschaften des Implantats verwendet wird. Die mechanischen Eigenschaften werden mit der Finite-Elemente-Software Abaqus validiert. Auf Grundlage der geometrischen und mechanischen Eigenschaften werden verschiedenen Designs ausgewählt. Zur Validierung der Mechanik und Geometrie werden diese mittels LDPF-Drucker gedruckt. Die Proben werden in Bioreaktoren platziert, damit sie unter simulierten Körperbedingungen abgebaut werden können. Der Einfluss des Abbaus auf die mechanischen Eigenschaften wird mittels eines Druckversuches unter Verwendung eines Direct-Image-Correlation-Systems ermittelt. Darüber hinaus wird der Einfluss der Degradation auf die mechanischen Eigenschaften mithilfe einer Finite-Elemente-Analyse validiert, wobei Materialmodelle verwendet werden, die die Degradation mit den mechanischen Eigenschaften koppeln, auf deren Grundlage das optimierte Design erstellt wird.

Für die biologische Untersuchung der Knochenphase wurden Extrakte aus Zn1Mg-Scaffolds an drei Zelllinien (hFOB1.19, hPDLSCs, MC3T3-E1) getestet. Während hFOB1.19- und hPDLSC-Zellen Viabilitätswerte über 70 % aufwiesen und somit als nicht zytotoxisch gelten, zeigten MC3T3-E1-Zellen geringere Werte. Sphäroidkulturen wiesen im Vergleich zu Monolayern bei allen Zelltypen eine höhere Viabilität aufwiesen.

Für die Knorpelphase wird ein hybrides System aus Nanofaservliesen und Hydrogelen entwickelt, das mechanische Stabilität mit biologischer Funktionalität kombiniert. Durch Elektrosponnen werden 3D-PCL-Nanofaservliese hergestellt, die anschließend mit GelMA-Hydrogel imprägniert werden, um eine zellfreundliche, feuchtigkeitsstabile Matrix zu bilden. Diese Kombination ermöglicht eine verbesserte Zelladhäsion und Differenzierung, während das PCL-Vlies die strukturelle Stabilität während der Heilung gewährleistet. Der E-Modul der Knorpelphase wird mittels Druckversuchen untersucht, die Biokompatibilität durch Ex-vivo-Zellkulturtests. Mikroskopische Analysen der Faseroberfläche sowie Gleitversuche dienen zur Bestimmung des Reibwertes der Materialoberfläche.

Im Rahmen der Entwicklung des ComBi-Bioreaktors für knorpelbasierte Anwendungen wurde die Softwareumgebung erweitert, um Bedienbarkeit und Prozesssteuerung zu optimieren. Die Kalibrierung wurde erfolgreich abgeschlossen und erste mechanische Prüfungen an PCL- und GelMA-Scaffolds durchgeführt. Während PCL-Strukturen im 30-Sekunden-Kompressionstest klare, stabile Zyklen zeigten, reagierten GelMA-Proben aufgrund der weicheren Matrix verzögert, bestätigten jedoch die zuverlässige Funktionalität des Systems unter knorpelähnlichen Bedingungen. Die Zytokompatibilität der Materialien wurde gemäß ISO 10993-12:2021 bewertet. Extrakte aus PCL- und GelMA-Proben zeigten Zellviabilitäten von über 95 % nach 72 h Inkubation, was eine hohe Biokompatibilität bestätigt.

Zur Herstellung des Gesamtimplantats wird die Oberfläche der Knochenphase mit Ag-Plasma vorbehandelt und unter Verwendung von PCL-Lösung als Haftvermittler mit der Knorpelphase verbunden. Die Adhäsion beider Phasen zueinander wird mittels Zugversuchen untersucht.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die entwickelten Zn1Mg-basierten Knochenstrukturen und PCL/GelMA-Knorpelschichten sowohl mechanisch als auch biologisch geeignet sind, um ein funktionelles, vollständig resorbierbares Implantatsystem zu bilden. Der kombinierte Einsatz von additiver Fertigung, elektrogenesponnenen Hybridstrukturen und simulationsgestütztem Design ermöglicht die gezielte Anpassung der Materialeigenschaften und schafft die Grundlage für zukünftige klinische Anwendungen bioresorbierbarer osteochondraler Implantate.

## Quellen

- [1] J. Fuchs; R. Kuhnert; Journal of Health Monitoring, **2017**, vol. 2(3), 55-60
- [2] M. Rabenberg, Robert Koch-Institut, „Arthrose.“, **2013**, vol. 54, 1-38
- [3] F. de Caro et al., Local Cartilage Repairs, **2024**, Vol. 15(4) 399-406
- [4] J. Verhaegen et al., Cartilage, **2015**, vol. 6, 12-19

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

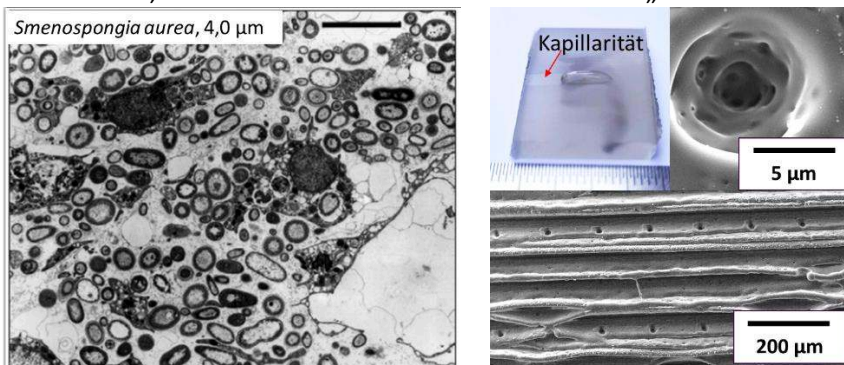
V. D. Nguyen<sup>1\*</sup>, T. Heusinger von Waldegge<sup>2</sup>, U. Specht<sup>2</sup>, D. Mutz<sup>3</sup>, H.L. Menzel<sup>3</sup>, B. Stricker<sup>4</sup>, V. Kohlgrüber<sup>4</sup>, M. Mücke<sup>5</sup>

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

\*duc.nguyen@sitec-technology.de

Arzneimittelrückstände wie Diclofenac werden in kommunalen Kläranlagen nach der biologischen Stufe häufig nur unvollständig entfernt; Effluente liegen in Deutschland typischerweise im µg/L-Bereich (z. B. KAS Seehausen: Zulauf ≈ 2,98 µg/L, Ablauf ≈ 2,49 µg/L, 2023). Vor dem Hintergrund der EU-Vorgaben[3] zur Entfernung solcher Spurenstoffe entwickelt DeDrug-Bio einen autarken, regenerierbaren biohybriden Filter, der den selektiven Wirkstoffabbau durch gezielt fixierte Mikroorganismen auf bioinspirierten Trägern ermöglicht. Kernidee ist die technische Realisierung des biologischen Vorbilds „Schwamm“ (Porifera): Ein verzweigtes Kanal-/Kammernetz mit gerichteter Benetzung bildet ein Habitat, das die Einbettung, Versorgung selbstregenerierender mikrobieller Filterorganismen fördert.

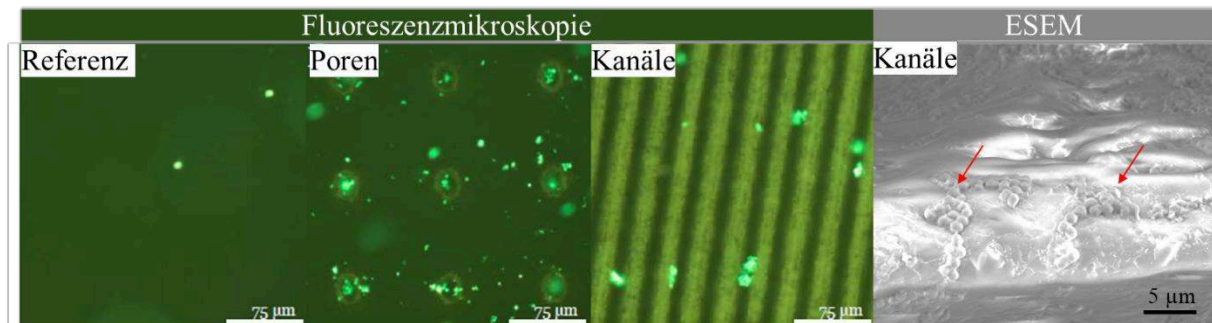
Materialauswahl & Strukturierung. Zu Beginn erfolgte ein Screening thermoplastischer Polymere (PET, PP, PC, PE), die sich besonders gut mit Femtosekundenlaser bearbeiten lassen. Polymere bieten zentrale Vorteile für biohybride Filterträger: präzise, reproduzierbare Mikro-/Nanostrukturierung bei skalierbarer Fertigung (Folien, Module), chemische Beständigkeit gegenüber Abwassermatrizes sowie niedrige Masse und Kosten. Transparente Folien (z.B. PET) erlauben zusätzlich optische Online-Inspektionen (Mikroskopie/Fluoreszenz) und eine zielgerichtete Einstellung der Oberflächenenergie (Kontaktwinkel) per Laser- und optionaler Plasmabehandlung. Auf Basis von Strukturqualität und Benetzbarkeit wurde PET als primärer Träger ausgewählt. Polymerfolien werden anschließend mit einem Femtosekundenlaser (1030 nm, 300 fs) im Scan-Modus (Kanäle) und Matrix-Modus (Kammern) strukturiert. So entstehen gerichtet benetzte Kanäle (30 µm) und Mikrokammern ( $r \approx 15\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ ), deren überlagerte Rauheit/Nanoporosität Oberflächenenergie und Adhäsion steuert. Die Kanäle übernehmen die Rolle der Porengänge (Kapillareffekt, erhöhte Verweilzeit), die Kammern bilden Mikronischen; zusammen entsteht die Habitatfunktion „Kanäle & Einbettung“ des Schwamms.



**Abbildung 1:** Links: Mikroskopische Aufnahme eines Schwamms nach [2] mit Poren, extrazellulärer Matrix und inkorporierten Bakterien. Rechts: Laserinduzierte Schwamm-Architektur auf PET (SEM): Poren und Kanäle mit gerichteter Benetzung (Kanäle) sowie Mikrokammern als Nischen (Mikronischen).

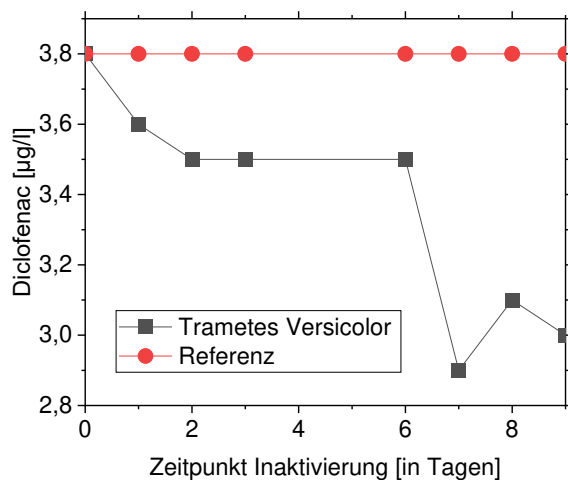
Biologie & Prüfstrategie. Als Leitorganismen werden *Achromobacter spanius* (Literatur: nahezu vollständige DCF-Degradation im Batch) sowie der Weißfäulepilz *Trametes versicolor* als enzymatischer Referenzdegrader verwendet. Die Messbereiche sind praxisnah im µg/L-Niveau ( $\approx 3\text{--}4\text{ }\mu\text{g/L}$ ) und orientieren sich an deutschen Abwasserwerten. Endpunkte sind chromatografisch bestimmte Diclofenac-Konzentrationen und Kolonisationsmetriken (Fluoreszenz/ESEM) auf den Topographien, um Topographie ↔ Benetzung ↔ Adhäsion zu korrelieren.

In Kolonisationsstudien siedelten  $\approx 65\%$  der lebenden Zellen bevorzugt in den laserinduzierten Kanälen.



**Abbildung 2:** Kolonisationsexperimente mit *Achromobacter spanius* nach 24 h bei 28 °C: links Fluoreszenzmikroskopie der Live/Dead-Färbung (Referenz, laserinduzierte Poren und Kanäle); rechts Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) von Kolonien im laserinduzierten Kanal [3].

In Batch-Ansätzen (Pilz/Bakterien) mit Start  $\approx 3\text{--}4\text{ }\mu\text{g/L}$  DCF (Analytik: Hausmethode, Labor Luers, 06–07/2025) blieben die Kontrollen in Bakterien- bzw. Pilzmedien bei  $\sim 3,8\text{ }\mu\text{g/L}$  konstant. *Trametes versicolor* reduzierte die DCF-Konzentration von  $3,8\text{ }\mu\text{g/L}$  auf  $3\text{ }\mu\text{g/L}$  innerhalb von 7 Tagen, entsprechend einer Absenkung um ca. 25 % (siehe Abbildung 3). *Achromobacter spanius* zeigte im gleichen Zeitraum noch keine gesicherte, nachhaltige Abnahme ( $3,9 \rightarrow 3,6\text{ }\mu\text{g/L}$  an Tag 8).



**Abbildung 3:** Gaschromatographie zur Messung des Diclofenacabbaus via *Trametes versicolor* von Diclofenac vergleichbar in Abwasserkonzentrationen.

Unter praxisnahen Startkonzentrationen im  $\mu\text{g/L}$ -Bereich liefert *T. versicolor* in 7–9 Tagen eine messbare Absenkung, während *A. spanius* unter den ersten Batch-Bedingungen keine robuste Reduktion zeigt. Ursachen könnten Ko-Substrat-Limitierung, Enzyminduktion (Anfahrzeit), Biomasse-Aufbau sein. Für kontinuierliche Systeme (Durchfluss, definierte Verweilzeiten) ist eine höhere Performance plausibel, sobald

Habitat-Topographie (Kanäle/Kammern), gerichtete Benetzung und Nährstoffzufuhr zusammenwirken.

Quellen:

- [1] **European Union**; *Urban Wastewater Treatment Directive* (Directive (EU) 2024/3019), 2024.
- [2] **M. Wehl**; *Bakterielle Aufnahme, Selektivität und interne Prozessierung bei marinen Schwämmen (Porifera)*, 2006, Dissertation, Universität Würzburg.
- [3] **T. Hadler**; *Untersuchungen zur bio-inspirierten Laser-Oberflächenmodifikation von Polymeren zur Ansiedlung spezifischer Mikroorganismen*. IFAM, Hochschule Bremen, 2025.

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

P.Richthof<sup>1</sup>, I. Schmidt<sup>2</sup>, T. Thummaraj<sup>3</sup>, M. Bagherabadi<sup>3</sup>, T. Weil<sup>3</sup>, J. Gačani<sup>3</sup>, A. Blaeser<sup>1</sup>, H. Hartmann<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Darmstadt, BioMedizinische Drucktechnologie, Darmstadt, Deutschland

<sup>2</sup> NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen, Reutlingen, Deutschland

<sup>3</sup> Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Mainz, Deutschland

\*Hanna.Hartmann@nmi.de

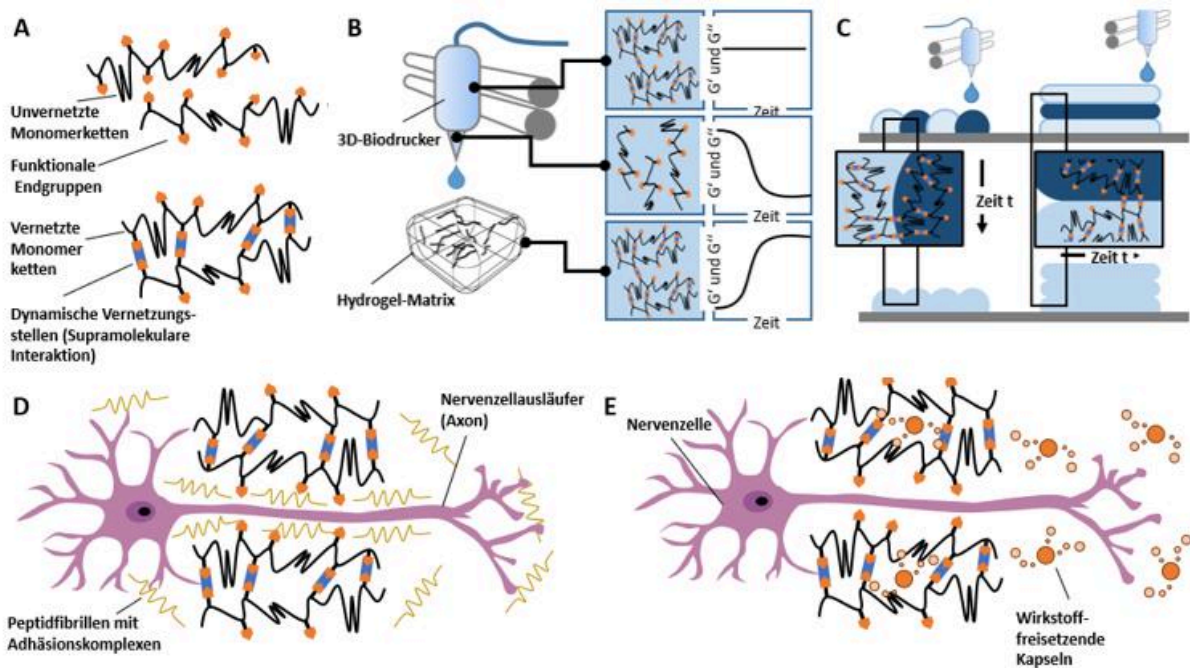
### Konsortium:

- 1) 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 In-Vitro-Gewebe modellen und Organ-on-a-Chip Systemen.
- 2) 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.
- 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 Wirkstoff-freisetzende Mikrokapseln in die Matrix eingebaut, die eine gezielte und gradierte Freisetzung ermöglichen und damit die Ausrichtung des Zellwachstums steuern können (E).

### Zwischenergebnisse und Ausblick:

Eine Vielzahl fibrillenbildender, selbst-assemblierender Peptide (SAP) mit variierenden Aminosäuresequenzen wurde synthetisiert und charakterisiert. Mittels verschiedener Zelltypen konnten biologisch aktive Fibrillen identifiziert werden, welche Zelladhäsion, Proliferation sowie neuronale Differenzierung unterstützen. Eingebracht in Hydrogele ermöglichen die Fibrillen nun in 3D eine Biofunktionalisierung bei gleichzeitiger Biokompatibilität. Hinsichtlich der Wirkstoffverkapselung konnte neben FITC-BSA als Modellemolekül der neuronale Wachstumsfaktor NGF erfolgreich und effizient in PLGA verkapselt werden, ohne signifikante Änderung der Partikelgröße gegenüber dem Modellemolekül. Funktionelle Analysen demonstrierten, dass freigesetztes NGF eine konzentrationsabhängige neuronale Differenzierung induziert. Neben den SAP-Fibrillen konnten auch bereits Hybrid-Hydrogele synthetisiert werden, welche das Aggregationsverhalten von SAPs nutzen. Durch supramolekulare Quervernetzung wurden Hydrogele mit ausgeprägtem thixotropem Verhalten generiert.

Die nächsten Schritte konzentrieren sich auf die systematische Bewertung und Optimierung der verschiedenen Hydrogele hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, der Langzeitfreisetzung verkapselter Wirkstoffe sowie ihres Potentials als biofunktionale, druckbare und selbstheilende Plattform für biomedizinische Anwendungen.

## **OSTEOFUNK: Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie**

---

Dr. N. Nolte<sup>3</sup>, L. Gaetjen<sup>3</sup>, Dr. C. He<sup>2</sup>, N. Hofzumahaus<sup>2</sup>, S. Grom<sup>1</sup>, V. Klein<sup>1</sup>, Dr. S. Braun<sup>1</sup>,  
Dr. K. Borchering<sup>3</sup>, Dr. T. Wolfram<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>KLS Martin SE & Co. KG, <sup>2</sup>Clean-Lasersysteme GmbH, <sup>3</sup>Fraunhofer IFAM

\*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).

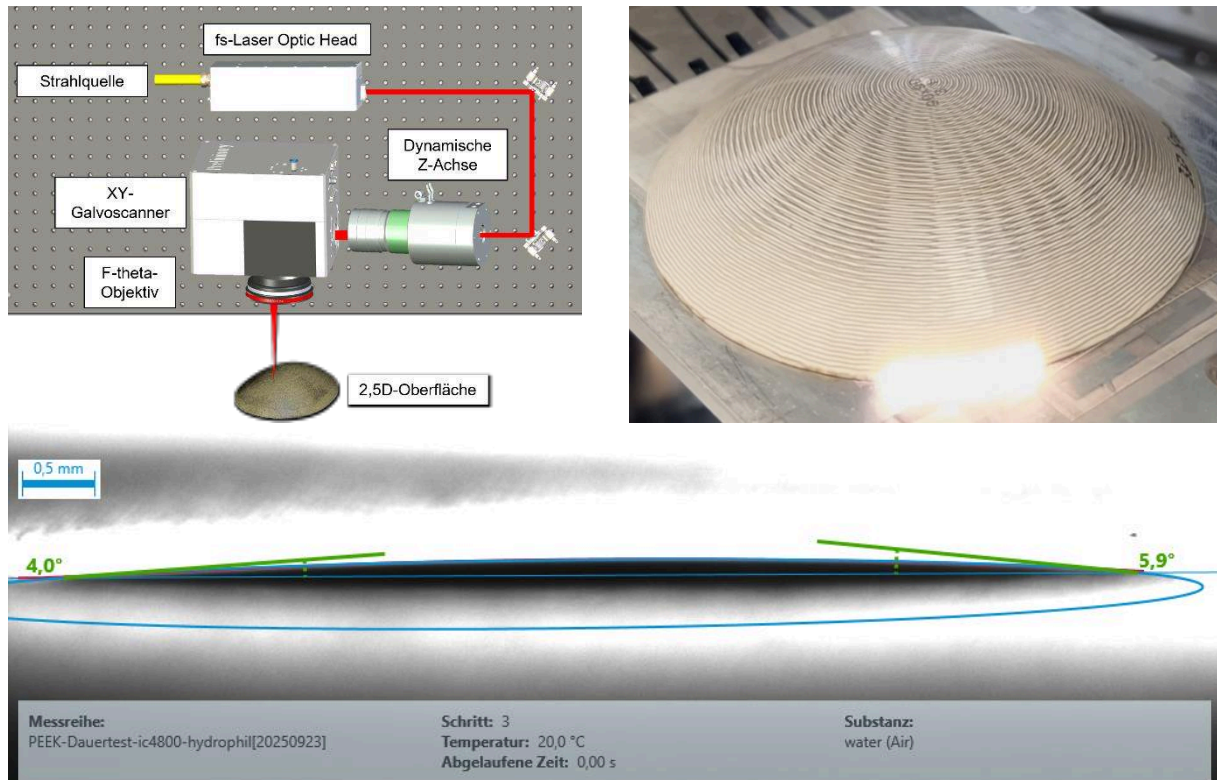
PEEK ist ein Polymermaterial, das Titanimplantaten in der chirurgischen Therapie als Alternative dienen kann. Der Grund dafür ist, dass die mechanischen Eigenschaften von PEEK denen von Knochen ähneln, es sehr elastisch, gleichzeitig aber sehr hart und widerstandsfähig ist, ein geringes Gewicht aufweist, keine thermische Sensibilität hervorruft und geringe Artefaktbildung auf Röntgenbildern erzeugt. Der bioinerte Werkstoff PEEK zeigt allerdings ein mangelhaftes Benetzungsverhalten auf, sodass eine stabile Gewebs- und Knochenintegration bisher nicht in Gänze erreicht werden konnte. Das Projekt OSTEOFUNK adressiert genau diesen Aspekt: inspiriert durch die schwammartige Morphologie des biologischen Vorbilds eines Knochens, ist das Ziel, eine poröse, gut benetzbare Oberflächenstruktur auf das PEEK-Implantat zu übertragen. Für eine effiziente Integration soll zusätzlich biphasisches Calciumphosphat in der Oberfläche angereichert und mit einer Schicht aus naturidentischem Kollagen eine natürliche Knochenoberfläche nachempfunden werden. Die Ergebnisverwertung soll in eine Produktentwicklung münden und die Übertragbarkeit der Technologie auf Implantate der Wirbelsäulenchirurgie und in weitere Bereiche der Traumatologie evaluiert werden.

Im Rahmen des Verbundprojekts wurden neben den unterschiedlichen Materialzusammensetzungen auch verschiedene Fertigungstechnologien zur Herstellung von PEEK-Implantaten eingehend analysiert. Hierbei bewirken Materialänderungen, wie additiviertes Tri-Calciumphosphat im PEEK- Substrat, Änderungen des Einkopplungsverhaltens der Laserstrahlung und damit einhergehend Unterschiede in der Strukturausbildung. Diese wird außerdem beeinflusst durch die fertigungsbedingte Oberflächenbeschaffenheit des Grundsubstrates. Durch Anpassungen der Prozessparameter der Laserbearbeitung können diese Faktoren ausgeglichen und Strukturgeometrie sowie Benetzungsverhalten gezielt modifiziert werden. Es konnten poröse Oberflächenstrukturen erzeugt werden, die der Spongiosa des menschlichen Knochens ähneln.

An modifizierten, normierten Probengeometrien wurden 3-Punkt-Biegeversuche und Zugversuche durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Oberflächenmodifikationen auf die mechanische Leistungsfähigkeit zu analysieren. Änderungen in der Oberflächenmodifikation können hierbei teilweise

zu signifikanten Änderungen der biomechanischen Charakteristik führen. Nicht jede Modifikation ist daher im Hinblick auf die jeweilige Indikation geeignet oder benötigt eine zusätzliche, gezielte Designanpassung.

Für den Wechsel der Bearbeitung von flachen zu dreidimensionalen PEEK-Oberflächen wurde ein Fokusmodul mit dynamischer z-Achse integriert (Abbildung 1). Hierdurch können verschiedene Implantatgeometrien flächig strukturiert und in ihrem Benetzungsverhalten gezielt zu hydrophil oder hydrophob modifiziert werden (Abbildung 1). Diese Oberflächenfunktionalisierung ermöglicht eine präzise Anpassung an biologische Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Zell- und Gewebeadhäsion und damit die spätere Implantatintegration.



**Abbildung 1.** Modifizierung der PEEK-Oberflächen mittels dynamischem Lasermodule, links oben: Systemaufbau, rechts oben: Modifizierung der Oberfläche, unten: Kontaktwinkelmessung der Oberfläche [1]

Erste Ergebnisse der biologischen Versuchsreihen zeigen, dass durch Funktionalisieren der PEEK-Oberfläche kollagenähnliche Proteine über kovalente Bindungen fest angebunden werden können. Dies verbessert zusammen mit additiviertem Tri-Calciumphosphat im PEEK-Material die Zellinteraktion. Zusammen mit der laserinduzierten Mikrostrukturierung der Implantatoberfläche, welche der menschlichen Knochenstruktur nachempfunden ist, soll außerdem die Gewebeadhäsion erhöht werden. Dies ist insbesondere für die vollständige Implantatintegration entscheidend und um eine Dislokation des Implantats im Körper entgegenzuwirken. Die bisherigen Ergebnisse zeigen eine hohe Sensitivität der modifizierten Oberflächen gegenüber biomechanischen und zellbiologischen Einflüssen. Diese Aspekte sollen im weiteren Projektverlauf systematisch untersucht und optimiert werden.

#### Quellen

[1] Clean-Lasersysteme GmbH

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

H. Herget<sup>1\*</sup>, Dr. D. Grigoriev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> MPL Metall-Pulver- Lackierung GmbH, <sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP)

\*Holger.Herget@mpl-gmbh.de

Fast alle technischen Oberflächen sind zur Optimierung der Oberflächenfunktionalitäten organisch oder metallisch beschichtet. Bei den organischen Beschichtungen weisen Pulverlacke gegenüber Nasslacken erhebliche Vorteile auf, da keine umwelt- und gesundheitsgefährdenden Lösemittel emittiert werden und deutlich weniger Abfälle beim Lackierprozess anfallen. Im Gegensatz zu Nasslacken 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]

Die Umsetzung superhydrophober Oberflächen auf Pulverlackbasis scheiterte an geeigneten Additiven. Nur in hohen Konzentrationen ließ sich bisher ein Selbstreinigungseffekt erzielen, wobei andere Lackeigenschaften wie Haftung, Glanz oder Verschleißfestigkeit beeinträchtigt wurden. Bei niedrigen Konzentrationen hingegen gelangten zu wenig Additive an die Oberfläche, um die erforderliche Mikrorauigkeit hervorzurufen. Bei vielen superhydrophoben Nasslacken besteht darüber hinaus das Problem, dass 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 Pulverlacksschichten möglich werden soll. 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.

### Projektfortschritt

Im ersten Projektjahr wurde zunächst die Untersuchung von Systemspezifikationen planmäßig abgeschlossen. Die Anforderungen an geeignete Additive, Pulverlack- und Vorbehandlungsformulierungen sowie den Beschichtungsprozess wurden zusammengestellt und aufeinander abgestimmt. Ein Screening geeigneter Mikropartikel, gasbildender Mittel und Verbindungen für die Oberflächenmodifizierung ergab eine Reihe potentiell geeigneter Additive. Für die darauf aufbauende Untersuchung möglicher superhydrophober Beschichtungssysteme wurden Parameter und Grenzwerte



festgelegt und ein gemeinsames Versuchsprogramm erstellt und umgesetzt. Referenzdaten für Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozesse wurden erstellt; Pulverformulierungen wurden mit unterschiedlichen Additiven beladen und in Beschichtungsversuchen im Labor untersucht. Ein integriertes Versuchsprogramm zu Vorbehandlungs- und Beschichtungsprozessen mit additiven Pulverformulierungen auf Aluminiumsubstraten wurde begonnen.

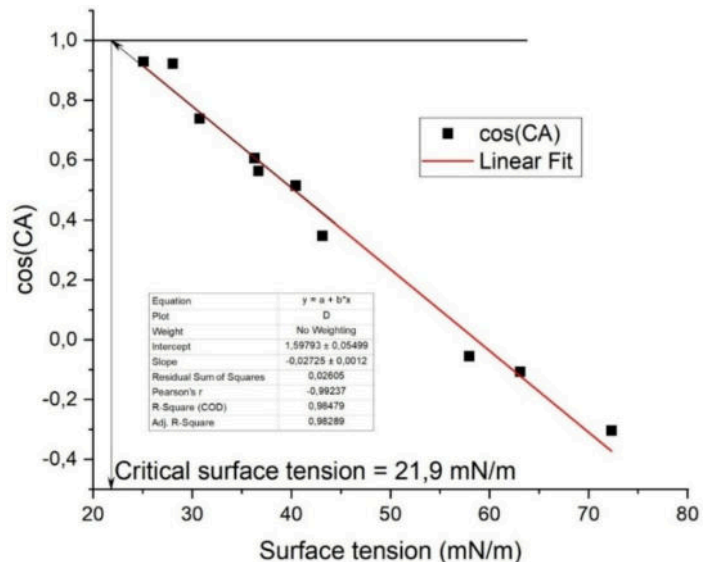
Aktueller Entwicklungsschwerpunkt ist die Hydrophobierung der Additive und die Einbindung der hydrophobierten Additive in Pulverformulierungen. Kritisch hierbei ist die Benetzbarkeit der hydrophobierten  $\text{SiO}_2$  basierten Mikropartikel, die typisch zur Darstellung der Mikrorauigkeit verwendet werden, durch die Pulverschmelze. Als Test der Benetzbarkeit mit  $\text{H}_2\text{O}$  wurde u. a. die kritische Oberflächenspannung einer Quarzplatte bestimmt (Abbildung 2).

Die kritische Oberflächenspannung der hydrophobierten Quarzplatte liegt weit unter dem Wert für hydrophobe bzw. oleophile Pulverlackschmelzen (35 mN/m).

Zur weiteren Definition des zu erreichenden Hydrophobierungsgrades wurden die Benetzbarkeiten eines hydrophobierten  $\text{SiO}_2$ -Pulvers mit reinen Flüssigkeiten sowie mit der Schmelze des Pulverlackbindemittels (Harzes) bestimmt (Tabelle 1).

Um einen selbstausbildenden superhydrophoben Effekt zu erreichen, muss der Hydrophobierungsgrad der  $\text{SiO}_2$  basierten Mikropartikel weiter erhöht werden. Ziel ist, dass die hydrophobierten Mikropartikel mit Flüssigkeiten mit Oberflächenspannung oberhalb 30 mN/m nicht benetzt werden.

Zum Halbzeit-Meilenstein im Februar 2026 soll die Beladung und Modifizierung der Mikropartikel und ihre Einarbeitung in eine Pulverlackformulierung erfolgreich umgesetzt sein. Eine erste angepasste Vorbehandlungsformulierung und entsprechendes Konzept für den Beschichtungsprozess sollen ebenfalls bereits erreicht sein. Dieses wird auf pulverbeschichtete Aluminiumbleche für den Architekturbereich / Bauaußenbereich als projektiertem Anwendungsfeld fokussieren. Als Demonstrator soll der Herstellungsprozess für superhydrophob pulverbeschichtete Aluminiumbleche im Maßstab 1:50 einer industriellen Anlage abgebildet werden.



**Abbildung 2.** Bestimmung der kritischen Oberflächenspannung einer Quarzplatte © Fraunhofer IAP, Potsdam

Lfd. Nr.	Flüssigkeit	T, °C	ST, mN/m	Beobachtung	Benetzbarkeit
1	Wasser	23,5	72,2	Schwimmt	keine
2	Glycerin	23,5	63,1	Schwimmt	keine
3	Formamid	26,3	57,7	Schwimmt	keine
4	Ethylenglycol	26,3	47,1	Schwimmt	keine
5	DMSO	26,3	42,8	Sinkt langsam	benetzbar
6	NMP	26,3	40,1	Sinkt	benetzbar
7	DOPHTH	23,5	30,7	Sinkt schnell	benetzbar

**Tabelle 1.** Benetzbarkeit eines hydrophobierten  $\text{SiO}_2$  Pulvers © Fraunhofer IAP, Potsdam

## **PINGUIN 2: Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik**

C. Deng<sup>1</sup>, M. Izidoro Santos<sup>2</sup>, M. Dulder<sup>1</sup>, M. Langner<sup>3</sup>, J. M. de Souza e Silva<sup>2</sup>, U. Hirsch<sup>4</sup>, Piotr Pawlik<sup>5</sup>, M. Lelonek<sup>5</sup>, C. Schmelzer<sup>4</sup>, R. Wehrspohn<sup>2</sup>, A. Greiner<sup>1</sup>, J. Binzer<sup>3</sup>, H. Leubner<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Neue Materialien Bayreuth GmbH, <sup>2</sup>Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, <sup>3</sup>BinNova Microfiltration GmbH, <sup>4</sup>Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, <sup>5</sup>SmartMembranes GmbH

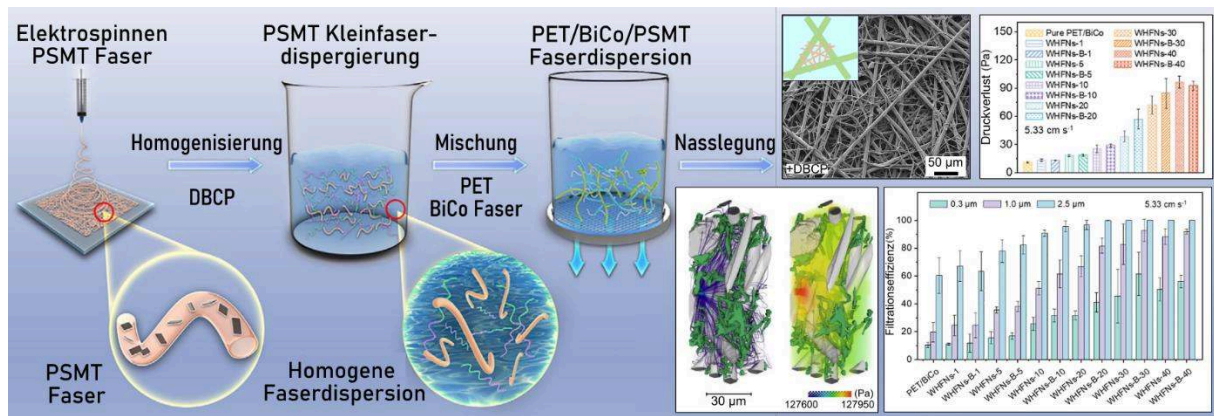
\*holger.leubner@binnova.de

Das Projekt PINGUIN 2 adressiert den dringenden Bedarf an fortschrittlichen Filtermedien zur Reduzierung der Umweltverschmutzung durch Aerosole und Mikroplastik. Herkömmliche Filter erfassen feine Partikel oft nur unter erheblichem Energieaufwand, der durch einen hohen Druckabfall verursacht wird. Inspiriert von der einzigartigen hierarchischen Struktur der Daunenfedern von Pinguinen – die aus großen, geraden Fasern bestehen, die von feineren, senkrecht angeordneten Fibrillen durchzogen sind [1] – hat dieses Projekt erfolgreich bioinspirierte Filtermedien mit verbesserter Leistung entwickelt. [2,3]

Die Anfangsphase des Projekts konzentrierte sich auf die Entwicklung von Komposit-Filtermatten durch die Kombination von Polyethylenterephthalat (PET)-Mikrofasern mit elektrogesponnenen Polyacrylnitril (PAN)-Nanofasern. Röntgenmikroskopie (XRM) und numerische Strömungsmechanik (CFD) lieferten grundlegende Einblicke in die Mikrostruktur und die Strömungseigenschaften des Materials. Diese frühen Studien zeigten, dass die gleichmäßige Verteilung der feinen Nanofasern in der gröberen Fasermatrix die primäre Herausforderung und der Schlüssel zur Steigerung der Filtrationseffizienz war. [3]

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen optimierte das PINGUIN-2-Projekt das Materialdesign durch die Herstellung nassgelegter hybrider Faser-Netzwerke (WHFNs), in denen kommerzielle PET- und Bikomponenten-(PET/BiCo)-Stapelfasern mit elektrogesponnenen Kurzfasern aus mit Montmorillonit-Nanoplättchen beladenem Polystyrol (PSMT) kombiniert wurden. [2] Ein speziell entwickeltes amphiphiles Diblock-Copolymer (DBCP) stabilisierte die hydrophoben Kurzfasern im wässrigen Nasslegeverfahren, verhinderte Faseraggregation und ermöglichte die Bildung eines homogenen, robusten 3D-Netzwerks (Abb. 1). Die optimierten WHFNs zeigten deutliche Leistungssteigerungen, darunter eine Abscheideleistung von 100 % für 2,5-µm-Partikel bei einem geringen Druckabfall von 92,6 Pa sowie eine mehr als doppelt so hohe Zugfestigkeit wie das ursprüngliche Substrat.

Eine wesentliche Entdeckung war, dass die Filtrationseffizienz bei höheren Luftstromgeschwindigkeiten zunimmt – ein Phänomen, das auf synergistische triboelektrische Effekte der Montmorillonit-Nanoplättchen zurückgeführt wird, die die Partikelabscheidung verbessern. [2] Aufbauend auf diesen Ergebnissen konzentrieren sich laufende und zukünftige Arbeiten auf die Optimierung der Filtermedien für spezifische Anwendungen und die Skalierung der Produktion. Aktuelle Kaskadenfiltrationstests zeigen, dass WHFNs mit einem moderaten PSMT-Gehalt (10–20%) eine Rückhalterate von bis zu 100% für 1,9-µm-Polystyrolpartikel erreichen und gleichzeitig das Ablösen von Partikeln minimieren. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, ein Gleichgewicht zwischen Zusammensetzung und struktureller Stabilität für eine optimale Leistung zu finden.



**Abbildung 1.** Design und Herstellung robuster WHFN-Filter. **Links:** Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses. **Rechts oben:** SEM-Aufnahme eines WHFN-Filters mit 40 % PSMT (WHFN-B-40) sowie Druckverlust verschiedener WHFN-Proben bei einer Luftanströmgeschwindigkeit von  $5,33 \text{ cm s}^{-1}$  ( $9 \text{ L min}^{-1}$ ). **Rechts unten:** XRM-gestützte Simulationen der Luftströmung und des Druckverlusts in einem WHFN-Filter sowie Ergebnisse aus Aerosolfiltrationstests mit unterschiedlichen PSMT-Gehalten. Adaptiert nach [2].

Parallel zu diesen Fortschritten in der Materialentwicklung wird eine dedizierte Digitalisierungsinitiative etabliert, die durch zusätzliche Fördermittel unterstützt wird. Diese Initiative wird die FAIR-Datenprinzipien implementieren und die Plattform MaterialDigital (PMD) nutzen, um die Schaffung einer strukturierten, durchsuchbaren Datenbank für 3D-mikrostrukturelle und Leistungsdaten von Filtrationsmaterialien zu unterstützen. Ziel ist es, die Optimierung von Filtrationsmaterialien zu beschleunigen, tiefere Einblicke in die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zu gewinnen und somit die zentralen Forschungsziele zu fördern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das PINGUIN-2-Projekt erfolgreich ein Konzept aus der Natur in ein hochleistungsfähiges Filtrationsmaterial umgesetzt hat. Durch die systematische Überwindung anfänglicher Herausforderungen in der Materialverarbeitung haben wir eine skalierbare, energieeffiziente Plattform entwickelt, die für die industrielle Produktion bereit ist. Unsere zukünftige Arbeit wird sich auf die Materialverfeinerung und die skalierbare Fertigung konzentrieren.

## 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. Deng, Y. Xu, J. M. de Souza e Silva, H. T. Nguyen, M. I. Santos, Y. Song, H. Schmalz, R. Schneider, A. Hering, M. Langner, R. B. Wehrspohn, A. Greiner *Adv. Funct. Mater.* **2025**, e11218
- [3] M. I. Santos, J. M. de Souza e Silva, D. Damberg, M. Langner, R. Debastiani, U. Hirsch, A. Greiner, R. B. Wehrspohn *Methods in Microsc.* Accepted

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

---

M.D. Mylo<sup>1,\*</sup>, F. Wenz<sup>2</sup>, D. Bren<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik - IMTEK, <sup>2</sup> Fraunhofer Cluster of Excellence

Programmierbare Materialien CPM, <sup>3</sup> Festo SE & Co. KG

\*max.mylo@livmats.uni-freiburg.de

### **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.

### **Problemstellung**

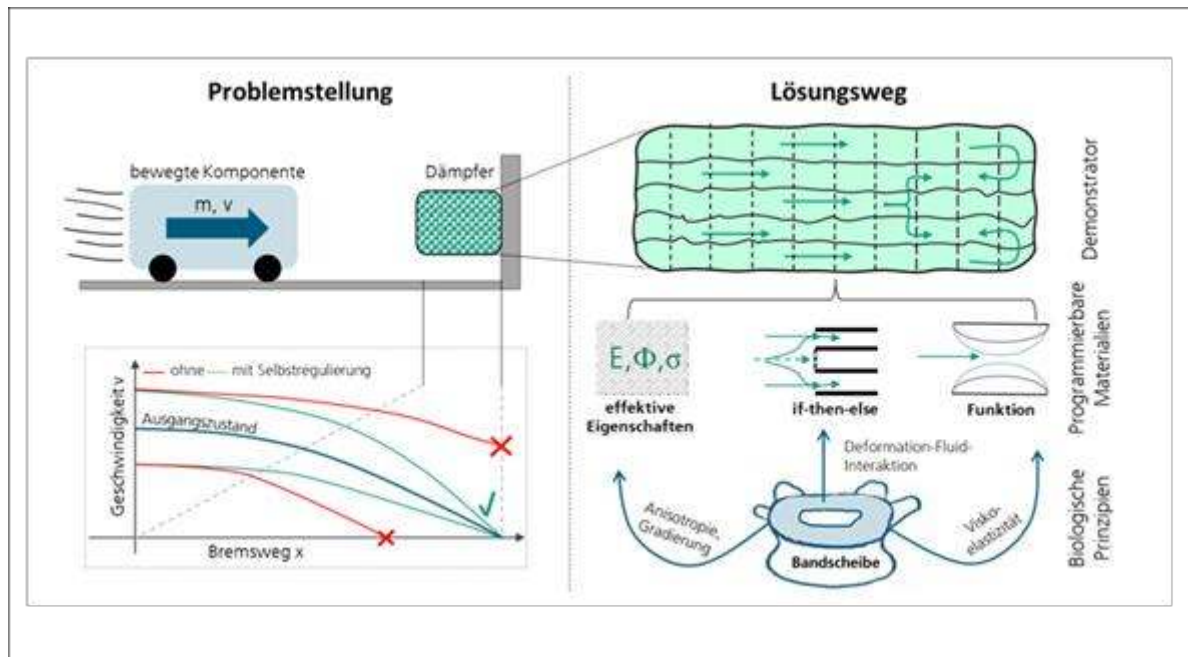
Stoßdämpfer werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, um die Energieableitung zu gewährleisten und so Maschinen, Komponenten oder Personen zu schützen. Im Bereich der Automatisierungstechnik ist es besonders wichtig, Massen innerhalb einer vorgegebenen Bremsstrecke und in kürzester Zeit zu dämpfen, ohne dabei hohe Bremskräfte zu erzeugen. Um diese Herausforderung zu bewältigen, müssen Materialien verwendet werden, die die Menge der abgeleiteten Energie an die Geschwindigkeit und Masse der beweglichen Komponenten anpassen.

Insbesondere mit Flüssigkeit gefüllte Metamaterialien bieten eine gute Möglichkeit, ein spezifisches Dämpfungsverhalten zu konzipieren [1]. Darüber hinaus kann die Struktur in programmierbaren Materialien auf äußere Reize (wie z. B. Temperatur, Dehnungsrate) reagieren und das Verhalten anpassen [2, 3]. Abbildung 1 links zeigt eine vereinfachte Problemstellung und das im Projekt betrachtete ideale Bremsverhalten.

### **Lösungsansatz und Bioinspirationskonzept**

Auf Basis einer ausführlichen Charakterisierung gängiger Stoßdämpfer hinsichtlich ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise wurden die Kernfunktionen, eine Anforderungsliste sowie die gegebenen Rahmenbedingungen für den adaptiven *ProBand*-Dämpfer abgeleitet. Zudem wurde anhand einer Anwenderbefragung eine Wunschliste für einen idealen Dämpfer erstellt.

Basierend hierauf werden im *ProBand*-Projekt programmierbare Materialien mit eben solchem Verhalten entwickelt. Das Design des Materials ist inspiriert von den Eigenschaften und der Struktur der menschlichen Bandscheibe, die als Dämpfer in der Wirbelsäule fungiert. Die Bandscheibe ist ein ideales biologisches Vorbild, da sie adaptiv verschiedenste Lastfälle – vom einfachen Gehen bis hin zu Saltos im Leistungssport – abdämpfen kann und dabei eine extrem hohe Langlebigkeit aufweist. Die zugrundeliegenden Funktionsmechanismen wurden hinsichtlich ihrer strukturellen Ebene (von Molekül- bis Organebene), ihrer Wirkzeit (von Sekundenbruchteilen bis hin zu mehreren Stunden) und ihrer Extrahierbarkeit für technische Fragestellungen charakterisiert und in einem Glossar sowie einem morphologischen Kasten für die interdisziplinäre Zusammenarbeit zusammengefasst. Kernaspekte sind hierbei die Anordnung der Faserringe, die dabei helfen, die auftretenden Druckkräfte in Zugkräfte umzuwandeln, sowie deren Anteil an der Dämpfung, der je nach auftretenden Kräften variiert [4]. Abbildung 1 (rechts) zeigt die grundlegende Idee des Projekts: die Übertragung biologischer Mechanismen in einen Demonstrator für adaptive Dämpfung.



**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.

### Aktueller Stand der Forschung

Es wird ein Konzept für einen programmierbaren Stoßdämpfer entwickelt, das von der Wirkungsweise der menschlichen Bandscheibe inspiriert ist. Das Konzept basiert auf miteinander verbundenen elastischen Faltenbälgen, die den Flüssigkeitsaustausch untereinander oder mit einem Ausgleichsvolumen ermöglichen. Der Druck innerhalb des Systems, der von der Aufprallgeschwindigkeit und der ausgeübten Kraft abhängt, bestimmt, wie viel Energie direkt dissipiert oder zwischengespeichert wird als potenzielle Verformungsenergie im zweiten Faltenbalg. Ähnlich wie bei der Bandscheibe führen axiale Druckbelastungen während eines Aufpralls zu einer seitlichen Ausdehnung des gelartigen Kerns, die in Zugkräfte in den Faserringen umgewandelt wird. Gleichzeitig wird das Wasser im Kern durch die Fasern nach außen ausgestoßen, was zu einer Energieableitung führt [4].

### Quellen

- [1] A. Corvi, L. Collini, *Materials & Design*, **2024**, 244, 113174.
- [2] F. Wenz, D. Schönfeld, S. Fischer, T. Pretsch, C. Eberl, *Advanced Engineering Materials*, **2022**, 25, 2201022.
- [3] S. Janbaz, K. Narooei, T. van Manen, A.A. Zadpor, *Science Advanced*, **2020**, 6, eaba0616.
- [4] N. Newell, J.P. Little, A. Christou, M.A. Adams, C.J. Adam, S.D. Masouros, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **2017**, 69, 420-434.



## SATORIS: Superamphiphobe, robuste Oberflächenstrukturen für optische Systeme

C. Werner<sup>1\*</sup>, J. Friedrichs<sup>1</sup>, K. Wicker<sup>2</sup>, T. von Strauwitz<sup>2</sup>, R. Quintanilha<sup>2</sup>, A. Voigt<sup>3</sup>, S. Prätorius<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF), <sup>2</sup> Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG (ZEISS), <sup>3</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Wiss. Rechnen (TU Dresden)

\*werner@ipfdd.de

Bioorganische und fettbasierte Beläge beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit optischer Oberflächen erheblich; herkömmliche mechanische Reinigungsverfahren können Oberflächen beschädigen und benötigen häufig umweltschädliche Substanzen. Gängige Schutzbeschichtungen sind zwar oft robust, aber optisch nicht hinreichend transparent und meist nur superhydrophob statt superamphiphob. Nanostrukturierung kann Superamphiphobie erzeugen, scheitert in der Praxis jedoch häufig an fehlender Dauerhaftigkeit und begrenzter Reinigbarkeit. Eine innovative, PFAS-freie Beschichtung, die zugleich wasser- und fettabweisend, robust und hochtransparent ist, verspricht daher erhebliche Leistungsgewinne für optische Geräte.

Die drei Partner im Projekt SATORIS erforschen hierzu mittels theoretischer und experimenteller Methoden neue Oberflächenbeschichtungen, die von natürlich vorkommenden Oberflächenstrukturen inspiriert sind. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Haut von *Collemboles* (Springschwänzen), deren Körperoberfläche eine nanoskalige, mechanisch stabile „Wabenstruktur“ mit pilzförmigen, überhängenden Querschnitten aufweist (**Abbildung 1**). Diese Strukturen bieten eine ausgeprägte Beständigkeit gegen Benetzung durch verschiedenste Flüssigkeiten.

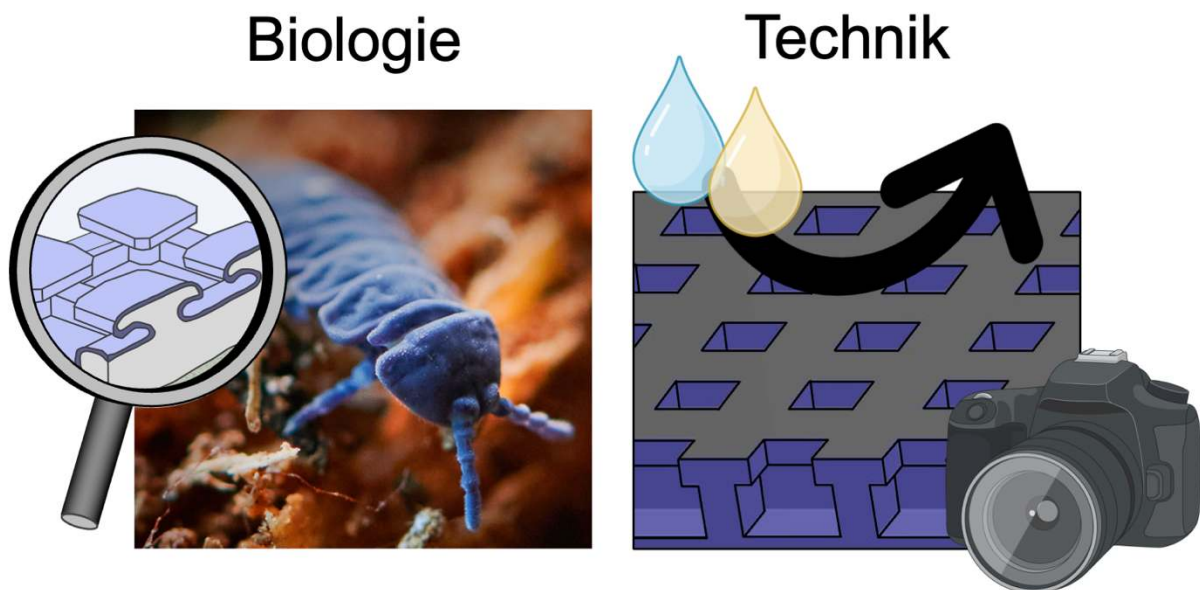
Seit der letzten Statuskonferenz wurden signifikante Fortschritte in den zentralen Arbeitspaketen Simulation und Herstellung erzielt.

Im Bereich der Simulation wurden entscheidende Grundlagen für das Design der Nanostrukturen geschaffen. Der Projektpartner **ZEISS** etablierte eine rigorose Simulationsumgebung, um die optischen Eigenschaften nanoskaliger Strukturen wie Transmission und Reflexion zu bestimmen und zu validieren. Erste Studien mit Mottenaugen-Referenzgeometrien zeigten, dass für Strukturhöhen unter 150 nm würfel- oder zylinderförmige Geometrien optisch vorteilhafter sind als pyramidale, um Ziel-Transmissionen von >98 % zu erreichen. Darauf aufbauend wurde eine Simulation für eine Nanostruktur erfolgreich implementiert, die den periodischen Abstand zwischen den Strukturen als Parameter berücksichtigt. So konnte für eine Vielzahl an Geometrien (variierende Höhe, Durchmesser und Perioden) ein antireflektives Verhalten nachgewiesen werden. Zudem wurden Tests zu Geometrievariationen und Abweichungen vom Idealzustand durchgeführt, um Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit zu definieren. Parallel dazu trieb der Projektpartner **TU Dresden** die Simulation der Benetzungsstabilität voran. Mittels eines 2D-Zweiphasenmodells wurde der Einfluss von Geometrie und Kontaktwinkel auf die Stabilität der Phasengrenze in einer Kavität untersucht. Die Ergebnisse bestätigen, dass größere Kontaktwinkel und ausgeprägtere Überhänge die Beständigkeit gegenüber Druckdifferenzen signifikant erhöhen, was das Eindringen von Flüssigkeiten verhindert. Die nächsten geplanten Schritte sind die Einbeziehung realer Materialdaten, sowie die Übertragung dieser Ergebnisse von der Mikro- auf die Makroskala.

Bei der Herstellung von Modelloberflächen durch den Projektpartner **IPF** wurde der ursprünglich geplante Ansatz der Reverse Imprint Lithographie verworfen. Prozesstechnische Schwierigkeiten wie die präzise Maskenausrichtung im Nanometerbereich und ein kritischer Entformungsschritt machten das Verfahren für die Zielskala unpraktikabel. Stattdessen werden zwei vielversprechende alternative Herstellungsrouten etabliert und intensiv verfolgt. Zum einen wird in an der direkten Strukturierung von optischen Oberflächen mittels reaktivem Ionentiefätzen (RIE) gearbeitet. Dieser Ansatz nutzt einen

mehrstufigen Ätzprozess, um die gewünschten Überhangstrukturen direkt im Zielsubstrat (z.B. Quarzglas) zu erzeugen. Durch isotropes Ätzen mit einem  $\text{SF}_6 + \text{O}_2$  Plasma ist es bereits gelungen, erste definierte Loch-Arrays mit Überhangbildung herzustellen. Die Methode zeichnet sich durch hohe Präzision und fein abstimmbare Strukturdimensionen aus, jedoch ist die herstellbare Fläche durch die zeitintensive Erstellung der Ätzmasken derzeit noch auf den  $\text{mm}^2$ -Bereich limitiert. Aufgrund dessen wird parallel die Methode des Emulsion Templating als skalierbare und potenziell kostengünstige Alternative zur Strukturierung großer Oberflächen verfolgt. Dieses Verfahren nutzt Nanoemulsionen (z.B. Mineralöl in einer Polyvinylalkohol-Matrix) als temporäre Template. Es konnten bereits erfolgreich Oberflächen mit Überhangstrukturen im angestrebten Größenbereich hergestellt werden. Die aktuelle Herausforderung liegt in der unzureichenden Transparenz der Schichten, die durch Lichtstreuung in der porösen Matrix entsteht. Aktuelle Optimierungsarbeiten konzentrieren sich auf die Anpassung der Emulsionszusammensetzung und die Abscheidung mittels Spin-Coating, um dünnere Schichten mit verbesserten optischen Eigenschaften zu erzielen.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass das Projekt trotz der strategischen Anpassung im Herstellungsbereich auf einem sehr guten Weg ist. Die Simulationsergebnisse von ZEISS und der TU Dresden liefern wertvolle, quantitative Designempfehlungen und Toleranzfenster für die experimentellen Arbeiten. Die beiden Herstellungsrouten stellen vielversprechende, komplementäre Ansätze zur Realisierung der komplexen, bioinspirierten Nanostrukturen dar: RIE für hochpräzise Modelloberflächen zur Validierung der Simulationen und Emulsion Templating als vielversprechender Pfad für die Aufskalierung des Ansatzes.



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

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

D. Thiele<sup>1\*</sup>, J. Waletzko<sup>1</sup>, A. Jonitz-Heincke<sup>1</sup>, R. Bader<sup>1</sup>, C. Witt<sup>2</sup>, A. Hartmann<sup>2</sup>, M. Liebelt<sup>2</sup>, T. Oberbach<sup>2</sup>, J. M. Börke<sup>3</sup>, H. Rothe<sup>3</sup>, G. Hildebrand<sup>3</sup>, K. Liefeth<sup>3</sup>, D. Grafahrend<sup>4</sup>, K. Wiemer<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Orthopädische Klinik und Poliklinik, Forschungslabor für Biomechanik und Implantattechnologie, Universitätsmedizin Rostock (UMR), Doberaner Straße 142, 18057 Rostock

<sup>2</sup> Mathys Orthopädie GmbH, An den Trillers Büschen 2, 07646 Mörsdorf

<sup>3</sup> Institut für Bioprozess- und Analysemesstechnik e.V., Rosenhof, 37308 Heilbad Heiligenstadt

<sup>4</sup> Hemoteq AG, Adenauerstr. 15, 5246 Würselen

\*daniel.thiele@med.uni-rostock.de

Die Implantation von Hüftendoprothesen macht mit über 220.000 Eingriffen den größten Anteil der in Deutschland jährlich implantierten künstlichen Gelenke aus. Eine Hauptursache für Revisionseingriffe stellt die abriebpartikelinduzierte Implantatlockerung dar. Daher wird bei der Entwicklung neuer Hüftendoprothesen auf eine Verbesserung der Reibungseigenschaften und die Reduzierung des Abriebs geachtet. Nativer Gelenkknorpel besitzt hervorragende Reibungs- und Abriebeigenschaften. Diese Eigenschaften beruhen auf einer durch Wasser vermittelten Schmierung der Gleitfläche. Inspiriert von diesem natürlichen Prinzip der Reibungsminimierung, ist es das Ziel des Verbundprojektes SELF-X-FOR-IMPLANTS, eine Plattformtechnologie zu erforschen, die es ermöglicht, „maßgeschneiderte“ reibungsarme Schichtsysteme für die Implantate zu etablieren. Die funktionalisierten Implantate sollen sich durch ein Selbstheilungspotenzial auszeichnen. Die adressierten primären Anwendungen sind eine reibungsminimierende Funktionsschicht auf Gelenk-Endoprothesen, ein anti-thrombogenes Schichtsystem für Implantate im Blutkontakt (hier: periphere Stents) sowie Schichtsysteme mit definierter Wirkstofffreisetzung zur Infektionsprophylaxe, zum Beispiel bei Patienten mit akutem Gefäßverschluss.

Das Projektkonsortium besteht aus Forschungseinrichtungen mit den Schwerpunkten Beschichtungsentwicklung, Schicht- und Funktionsanalytik sowie Industriepartnern aus den Bereichen Medizinprodukteherstellung und -funktionalisierung. 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 Projektverlauf konnten deutliche Fortschritte in allen Teilvorhaben erzielt werden. Demonstratoren keramischer Kappenprothesen und keramischer Hüftpfannen konnten generiert sowie die laserbasierte Strukturierung der Implantatoberfläche etabliert werden. Im Rahmen der Ermittlung der mechanischen und der mikrostrukturellen Eigenschaften der Keramiken mit laserstrukturierten Oberflächen konnten Strukturen identifiziert werden, die keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Keramik zeigten. Im Rahmen der Generierung maßgeschneiderter Schichtsysteme für die Implantologie wurde zunächst ein anbindendes Oberflächen-Linkersystem entwickelt, welches auf Silanen basiert und eine feste Anbindung zwischen den keramischen Oberflächen und der ersten Ionenschicht der Polyelektrolytmultilayerschicht (PEM) bildet. Darüber hinaus wurden erste Versuche zur Hämokompatibilität der Schichten durchgeführt, welche geringe Zellreaktionen im Blutkontakt zeigten. Ein Teilvorhaben widmet sich der Konzeption und Entwicklung eines Beschichtungssystems, um die entwickelten Schichtsysteme in einem industriellen Maßstab auf Implantate aufbringen zu können. Zu diesem Zweck wurden zunächst die Ansätze zum Sprüh- und Tauchverfahren analysiert und darauf aufbauend modifiziert und sukzessive optimiert. In der Folge konnte eine deutliche Verringerung der Prozesszeiten für ein Implantat beobachtet sowie erste Labormuster mit Hilfe dieses Prozesses beschichtet werden. Im Projektverlauf erfolgen eine rheologische, tribologische und biologische Charakterisierung der Multilayerschichten. Darüber hinaus wurde eine Machbarkeitsstudie zur Abriebuntersuchung an laserstrukturierten Hüftendoprothesen durchgeführt.

Weiterhin gilt es nachzuweisen, dass die Schichtsysteme auf Implantate definiert aufgebracht werden können und dabei ihre gewünschte Struktur trotz mechanischer Einflüsse, wie Reibung, durch ihre hierarchische Mikrostrukturierung behalten sowie den Abrieb- und Verschleißuntersuchungen standhalten.

Weitere Ausführungen der bereits durchgeführten Arbeiten und wissenschaftlich erzielten Erfolge können aus dem Posterbeitrag oder dem Kurzvortrag des Verbundprojektes SELF-X-FOR-IMPLANTS auf der Statuskonferenz entnommen werden.

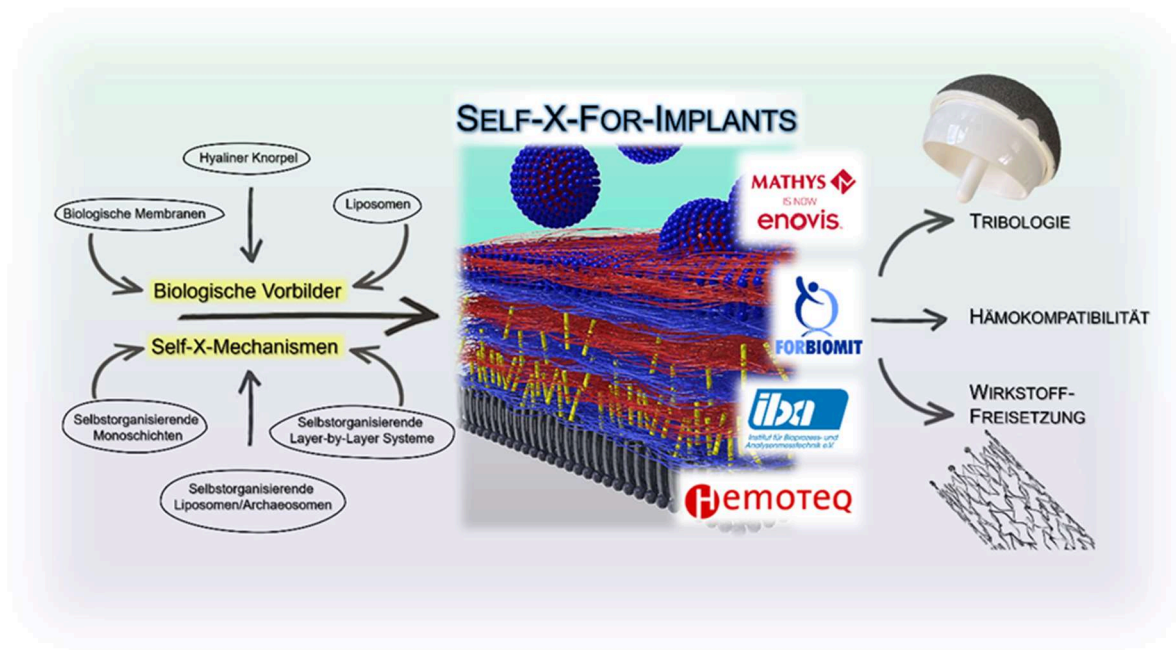


Abbildung 1. Schema des Verbundprojektes; Copyright: iba e.V.



## Poster



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

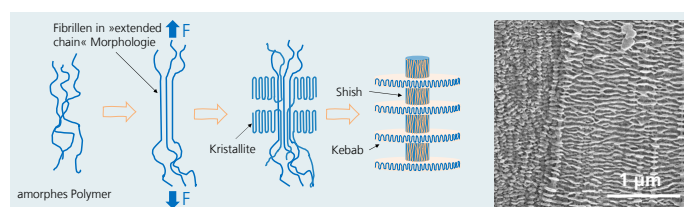
Raimund Jaeger<sup>1</sup>, Piet Glabbatz<sup>1</sup>, Thomas Schwonburg<sup>2</sup>, René Reiser<sup>2</sup>, Peter Steer<sup>3</sup>, Benjamin Kolano<sup>3</sup>

1: Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM, Mikrotribologiezentrum  $\mu$ TC, Freiburg

2: Basell Polyolefine GmbH, Frankfurt a. M.

3: 2RPS Mechatronik GmbH, Ottobrunn

Kunststoffe spielen als Leichtbauwerkstoffe für Antriebssysteme eine zunehmend bedeutende Rolle: sie weisen eine gute Korrosionsbeständigkeit auf und wirken sich positiv auf »noise, vibration, harshness« aus. Insbesondere Polyolefine sind »low carbon footprint materials«: sie können hoch energieeffizient hergestellt werden, der Energiebedarf und  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck ist verglichen mit Metallen oder Keramiken gering. Die im Projekt AdapTribo-2 untersuchten Polyolethylene weisen eine breite Molekulargewichts-verteilung auf - von niedermolekularem PE über PE mittleren Molekulargewichts (HDPE) bis hin zu unverschauften ultrahochmolekularem UHMWPE. Diese sogenannten Reaktorblends (RB) werden durch eine Mehrzentrenkatalyse im Reaktor polymerisiert, können mit gängigen extrusionsbasierten Verfahren verarbeitet werden und sind ohne Qualitätseinbußen mehrfach recycelfähig<sup>1,2</sup>. Scherströmungen während der Verarbeitung können die ultrahochmolekulare Fraktion zu Fibrillen verstrecken. Diese Strukturbildung führt zu einem sortenreinen Komposit mit deutlich besseren mechanischen und tribologischen Kennwerten<sup>3</sup>. Die verstärkenden Strukturen können sich auch im Reibkontakt ausbilden und die tribologischen Eigenschaften des Werkstoffs verbessern<sup>4</sup>. Die Reaktorblends passen sich – ähnlich wie lebendiges Gewebe – externen Belastungen an, um diesen besser widerstehen zu können.



Links: Orientierung der UHMWPE-Fraktion zu Fibrillen durch Scherung und Ausbildung der Shish-Kebab-Struktur. Rechts: Orientierte Shish-Kebab-Strukturen durch Spritzguss.

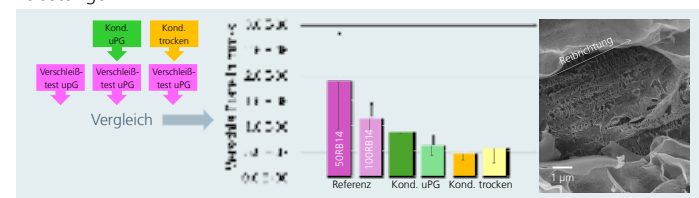
## Neue Reaktorblends für tribologische Anwendungen

LyondellBasell entwickelt und charakterisiert für AdapTribo-2 einen Polyethylen-Reaktorblend mit gesteigertem UHMWPE Anteil, der eine erhöhte Abriebbeständigkeit aufweisen soll. Zentral für die technische Nutzung des Reaktorblends ist die Fließfähigkeit der Systeme. Die Katalysatorsysteme und Reaktortechnologie werden iterativ so angepasst, dass das Verhältnis und die Verteilung des HDPE und des UHMWPE eine Schmelzprozessierbarkeit trotz des gesteigerten UHMWPE-Gehalts garantieren. Parallel zur Entwicklung von Katalysatorsystemen und Reaktortechnologie werden konventionelle Compounds von HDPE und Reaktorblends mit hohem UHMWPE-Anteil hinsichtlich ihrer Fließeigenschaften in der Schmelze und der mechanischen Eigenschaften untersucht, um ein optimales Verhältnis von UHMWPE und HDPE zu identifizieren.

<sup>1</sup> T Hees, F Zhong, M Stürzel, R Mülhaupt; Macromolecular rapid communications, 2019, 40, 1800608  
<sup>2</sup> F Zhong, J Schwabe, D Hofmann, J Meier, R Thomann, M Enders, R Mülhaupt; Polymer, 2018, 140, 107–116.  
<sup>3</sup> T Hees, F Zhong, C Koplin, R Jaeger, R Mülhaupt; Polymer, 2018, 151, 47–55.  
<sup>4</sup> S Seif; Tribology of All-Hydrocarbon-Composites, MSc Thesis, Paris, 2023.  
<sup>5</sup> P Glabbatz; Aufklärung der Einflüsse von rebinduzierter Deformation auf die Strukturentwicklung von sortenreinen Reaktorblends, BSc Thesis, Westfälische Hochschule, 2025.

## Selbstverstärkung durch tribologische Belastung

Das Fraunhofer IWM untersucht in tribologischen Modellexperimenten die Strukturbildung unter realitätsnahen Einsatzbedingungen, beispielsweise für geschmierte Systeme oder Systeme mit intermittierenden tribologischen Belastungen.



Links: Stift-Scheibe-Experimente mit in-situ Konditionierung. Kond. uPG: in uPG,  $\sigma = 3 \text{ MPa}$ ,  $\Delta t = 6 \text{ s}$ ,  $\omega_{\text{hoch}} = 60 \text{ rpm}$ ,  $\omega_{\text{niedrig}} = 6 \text{ rpm}$ ; Kond. trocken:  $\sigma = 3 \text{ MPa}$ ,  $\Delta t = 6 \text{ s}$ ,  $\omega_{\text{hoch}} = 90 \text{ rpm}$ ,  $\omega_{\text{niedrig}} = 9 \text{ rpm}$ . Rechts: In Reibrichtung orientierte Fibrillen (Shish-Kebab-Strukturen), 100RB14, in uPG konditioniert.

Für einen reinen Reaktorblend (100RB14) und ein Compound aus HDPE und RB (50RB14) konnte gezeigt werden, dass durch geeignete Belastungen im Stift-Scheibe-Tribometer die Verschleißbeständigkeit erhöht wird. Die in-situ Konditionierung gelang sowohl für trockenen als auch für mit unpolarem Polyalkylenglykol (uPG) geschmierten Reibkontakt<sup>5</sup>.

## Ein Komponentenprüfstand zur Untersuchung der Strukturbildung

2RPS entwickelt einen Komponentenprüfstand, mit dem komplexe tribologische und thermische Belastungen in einem geschmierten System dargestellt und deren Einfluss auf die Strukturbildung untersucht werden können.

Prüflinge (Scheiben- und Zahnradpaarungen) werden bei 2RPS mit unterschiedlichen Verfahren gefertigt. Unterschiedliche Materialpaarungen können mit verschiedenen Testabläufen und Belastungsfällen untersucht werden, die Versuche können trocken oder geschmiert durchgeführt werden.



Konzept des Komponentenprüfstands

Ziel des Vorhabens ist es, Polyethylene durch die adaptive Strukturbildung als nachhaltige Werkstoffe für Antriebssysteme zu erschließen, die durch ihre Recycelfähigkeit und Schmierstofftoleranz eine interessante Ergänzung zum Werkstoffportfolio für Antriebssysteme darstellen.

## Kontakt

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

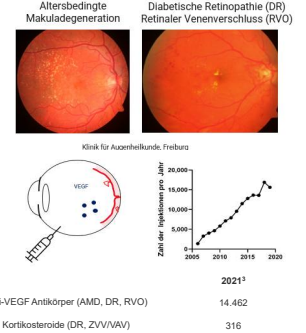
## Einleitung

Das Projekt BILLARD konzentriert sich auf die Behandlung von retinalen Gefäßerkrankungen, insbesondere auf die altersbedingte Makuladegeneration (AMD), die in den Industrieländern die Hauptursache für Sehverschlechterung im Alter darstellt. Der vaskuläre endotheliale Wachstumsfaktor (VEGF) stellt dabei einen zentralen Mediator in der Krankheitsentstehung dar und wird mit Anti-VEGF-Inhibitoren regelmäßig intravitreal behandelt. Um die Therapieintervalle zu verlängern, verfolgt unser Projekt BILLARD die Entwicklung eines biologisch inspirierten, polymerbasierten Depotsystems für bereits zugelassene VEGF-Inhibitoren.

## Problemstellung

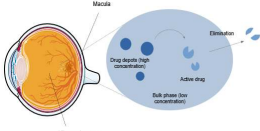
Die größte Herausforderung in der aktuellen Anti-VEGF-Therapie:

- Hohe Behandlungsbelastung (alle 4 – 8 Wochen)
- unzureichende Compliance
- suboptimale Behandlungsausgänge



## Von der Natur lernen

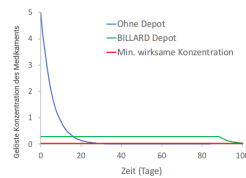
Biologische Systeme modulieren die Freisetzung sowie die lösliche Konzentration von Proteinen durch Konjugation (kovalent und nicht-kovalent) an (strukturelle) Proteine.



Schematische Darstellung der langsamen Freisetzung von Proteinen von Biopolymer-gebundenen Matrizen

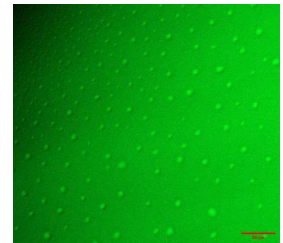
## Lösungsansatz

Durch Kopplung des Zielproteins an Biopolymere wird eine stetige Freisetzung erreicht.



Simulation des Verlaufs der Konzentration eines anti-VEGF Medikaments im humanen Glaskörper bei Bolus-Injektion sowie bei Freisetzung aus dem Depot.

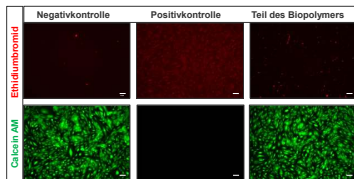
## Depotformulierung



Visualisierung der Depotformulierung. Die Fluoreszenz-markierten Biopolymer-Formulierungen wurden mittels Schrägfeldmikroskopie sichtbar gemacht. Maßstab, 20 µm

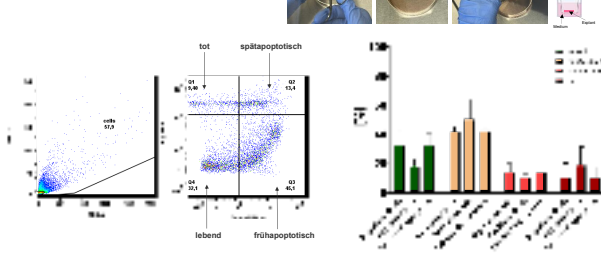
## Projektfortschritt

### a) In vitro - Humane retinale mikrovaskuläre Endothelzellen (HRMVEC)



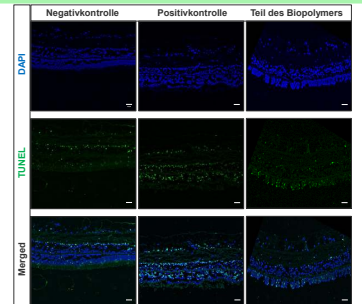
Calcein-AM und Ethidiumbromid-Färbung zur Bestimmung der Zellviabilität und Toxizität bei HRMVEC.

### b) Ex vivo – porcine Retinaexplantate



Durchflusszytometrische Analyse (FACS): Detektion und Quantifizierung apoptotischer und nekrotischer Zellen mittels Annexin V- und Propidiumiodid-Färbung.

Toxizitätsnachweis mittels FACS-Analyse: Balkendiagramm der lebenden, apoptotischen und toten Zellen nach Behandlung.

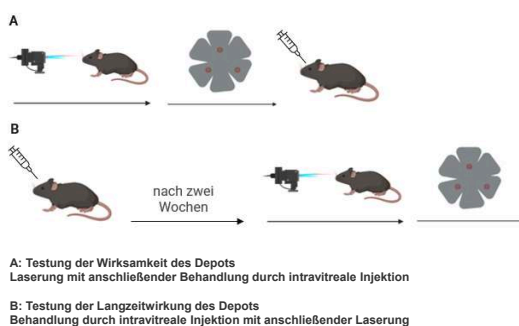


TUNEL-Färbung aus Gewebeschritten zum Nachweis apoptotischer Zellen als Indikator für zelluläre Toxizität.

## Nächste Schritte

- Ausschluss einer intraokularen Toxizität des Polymerdepots anhand von *In-vitro*- und *In-vivo*-Toxizitätstests
- Analyse der Wirksamkeit und Langzeitwirksamkeit des Polymerdepots in einem Mausmodell für neovaskuläre AMD

### Laser CNV (Modell für feuchte Makuladegeneration)

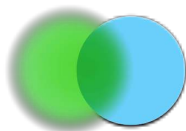


## Teilnahme an der Initiative MaterialDigital:

Höhere Verwertbarkeit der Daten durch:

- Semantische Interoperabilität mittels auf das Projekt angepasster deskriptiver Ontologien
- Flexible Arbeitsabläufe, die jede Probe vom Produktions- bis zum Teststadium begleiten
- Eine dezentralisierte IT-Architektur, die externen Beteiligten einen vereinheitlichten, kontrollierten Zugang zu den Daten ermöglicht





# BIOTRANS

## WISSENS- UND TECHNOLOGIETRANSFER BIOINSPIRIERTER LÖSUNGSANSÄTZE IN INDUSTRIE UND GESELLSCHAFT



## Vernetzung & Veranstaltungen



Statuskonferenzen



Doktorandenseminare



Themenspezifische Workshops

## Reichweitenstarke Öffentlichkeitsarbeit



BdT-Website



Social Media



Informationsmaterialien



Presse & Veröffentlichungen

## Wissens- & Technologietransfer



Öffentliche Webinare



Messen & Fachsessions



## Ausblick

- Identifizieren von Transferhürden & neuen wissenschaftlichen Fragestellungen
- Aufbereiten & Bündeln von erzielten Forschungsergebnissen
- Abschließender BdT-Kongress

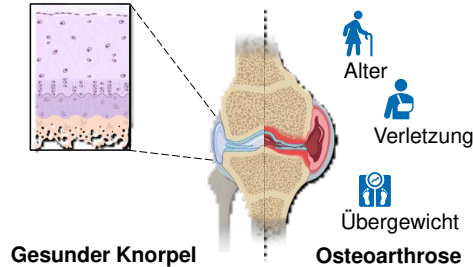


# CarBoMD: Cartilage Bone Medical Device

## 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 behandelt
- Defizit:** Hohe Morbidität an der Entnahmestelle, begrenzte Verfügbarkeit, mehrere Operationen
- Ziel des Projekts:** Biphasisches bioresorbierbares Implantat zur Unterstützung der Knorpel- und Knochenregeneration ohne Mehrfachoperationen



### Anforderungen

#### Trabekulärer Knochen

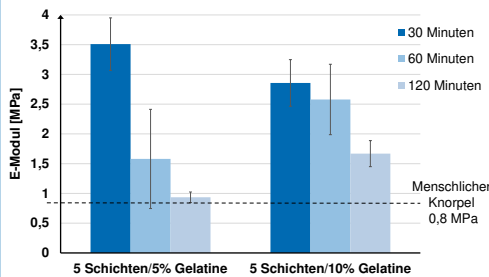
- E-Modul unter Druck 100 – 900 MPa
- Porengröße 300 – 800 µm
- Porosität ca. 60 %

#### Knorpel

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

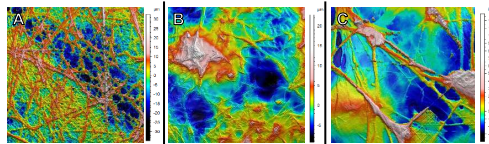
### ITA: Knorpelphase

- Knorpelphase aus Nanofaser/Hydrogel Komposit
  - Nanofasern:** Stabilisierende Funktion
  - Hydrogel:** Biologische & elastische Funktion
- 3D-PCL-Scaffold aus mehreren Lagen
- Durchtränkt mit GelMA Hydrogel
- Imitiert Eigenschaften von Knorpel und stabilisiert geschädigtes Gewebe während der Regeneration



**Abbildung 2.** E-Modul von PCL Scaffolds mit 5 Schichten und 5 %/ 10% Gelatine Infusionszeiten 40 °C

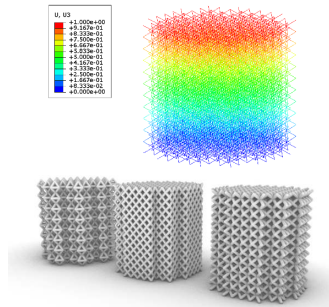
- Einbringung von Hydrogel erhöht E-Modul von Komposit-Scaffold signifikant verglichen zu reinem PCL-Scaffold (0,54 ± 0,06 MPa)
- Längere Zeit & erhöhte Temperatur verbessert Hydrogel Infusion
  - Homogenere Verteilung, gleichmäßigere Kraftverteilung
- Verringerung der Rauigkeit (Rz) durch Hydrogel



**Abbildung 3.** Konfokalmikroskopische Aufnahmen von Oberflächen von:  
A) Trockenem PCL Scaffold,  
B) Mit Hydrogel imprägniertem PCL Scaffold,  
C) Menschlichem Knorpel.

### SLA: Knochenphase

- Knochenphase aus additiv gefertigtem bioresorbierbarem Metall.
- Fördert Wachstum des Knochens und weißt anpassbare Degradationsdauer auf
- Automatisiertes Design mit Kopplung an Rhinoceros 3D und Abaqus über Python

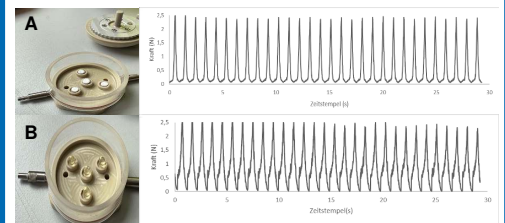


**Abbildung 3.** FEM-Simulation der Gitterstrukturen (oben) sowie verschiedene parametrisch generierte Gitterstrukturen (unten)

- Verlust der Steifigkeit in der Knochenphase aufgrund von biologischem Abbau
- Simulationen zum Einfluss der Degradation auf die Steifigkeit
  - Unter Verwendung von Materialmodellen
- Biomechanische Bewertung von Einfluss der Degradation auf die Steifigkeit des Implantats
  - Testung der Strukturen im Bioreaktor, der Bedingungen im nativen Gewebe simuliert
  - Anschließende Druckprüfung, um den Verlust an Steifigkeit zu bewerten.
- Das optimierte Design der Knochenphase wird entschieden:
  - Auf der Grundlage der mechanischen Eigenschaften
  - Unter Berücksichtigung der Abbaudauer
- Bewertung des Implantats durch Vergleich der Wachstumsrate des ersetzten Knochens mit der Abbaudauer des Implantats

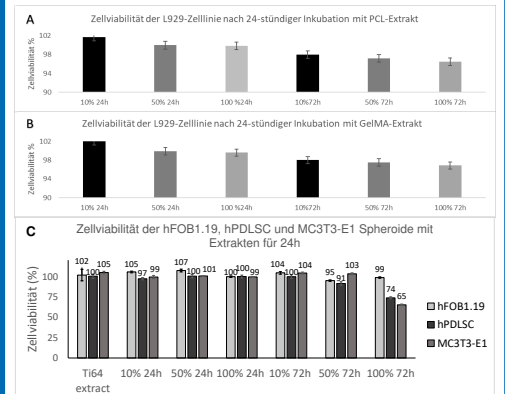
### ANATZ: Biologisch-Funktionelle Evaluierung

- Testung der PCL-Komponente unter trockenen und zellfreien Bedingungen
  - Stabiles und reproduzierbares Kraftprofil (~2,5 N)
- Testung der GelMA-Komponente unter feuchten und zellfreien Bedingungen
  - Gedämpftes Profil → viskoelastisches Verhalten



**Abbildung 4.** Mechanische Bewertung der A) PCL-Komponente der Knorpelphase, B) GelMA-Komponente der Knochenphase

- Indirekte Bewertung der Zellviabilität beider Phasen
  - Knorpelphase:** Mittels LDH Enzymtest
  - Knochenphase:** Mittels LDH Enzymtest und Sphäroiden



**Abbildung 5.** Bewertung der Zytokompatibilität von: A) PCL Komponente, B) GelMA Komponente, C) der Knochenphase mit drei Zelllinien unter Verwendung von Sphäroiden

**Acknowledgement** Die Autoren danken dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt 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 durch:



# DeDrug-Bio

## Autarke biohybride Filtersysteme zum Abbau von Arzneimittelrückständen

BIOLOGISIERUNG  
DER TECHNIK

V. D. Nguyen<sup>1</sup>, T. Heusinger von Waldegg<sup>2</sup>, U. Specht<sup>2</sup>, D. Mutz<sup>3</sup>, H.L. Menzel<sup>3</sup>,  
B. Stricker<sup>4</sup>, V. Kohlgrüber<sup>4</sup>, M. Mücke<sup>5</sup>

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

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

### Herausforderungen von Spurenstoffen im Abwasser

- Viele Spurenstoffe wie Diclofenac passieren Kläranlagen nahezu unverändert; im Ablauf liegen biol. wirksame Konzentrationen ( $\mu\text{g/L}$ ) an.
- Beispiel Seehausen: Zulauf/Ablauf  $3 \mu\text{g/L} \rightarrow 2,5 \mu\text{g/L}$ .
- EU verlangt vierte Reinigungsstufe<sup>1</sup>.
- Aktivkohle/Ozon hoher Energie- und Ressourcenbedarf.

### Zielstellung

- Stabiles, selbstregenerierbares System für selektiven Spurenstoffabbau.
- Schwamm-Vorbild als technische Habitat-Architektur.
- Erprobungsspurstoff: Diclofenac (im relevanten  $\mu\text{g/L}$ -Bereich).

### Vorbild – Abstraktion

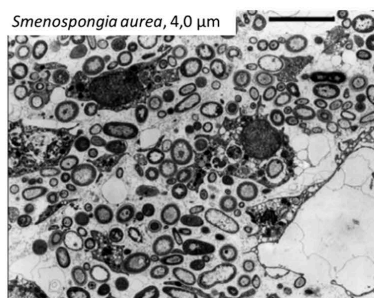
- Schwamm: Poren + ECM-Nischen  $\rightarrow$  Benetzung, Verweilzeit, Nährstoffversorgung, Einbettung.
- Realisierung: Laser-Kanäle + Mikrokammern auf techn. Substraten.
- Rauheit/Oberflächenenergie steuern Adhäsion.

### Randbedingungen / Lastenheft

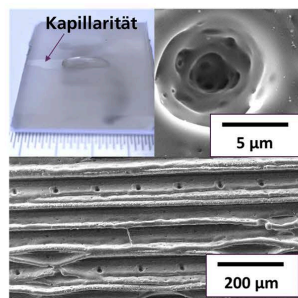
- Erfasst: Temperatur, Partikel, organische Belastung, pH, Leitfähigkeit, Stickstoff/Phosphor.
- Einsatzpunkt: Ablauf Nachklärung (definierte Strömung).

### Material & Oberflächentechnik

- Substrate-Screening: PET, PP, PC, PE  $\rightarrow$  PET (biokompatibel, stabil, günstig, lasertauglich).
- Femtosekunden-Laser formt Kanäle/Kammern; Plasma steuert Benetzung.
- Hebel: Chemie, Hydrophilie, Mikro-/Nanotopografie, Porendesign.



Mikroskopie eines Schwamms mit Poren, extrazellulärer Matrix und inkorporierten Bakterien<sup>2</sup>.



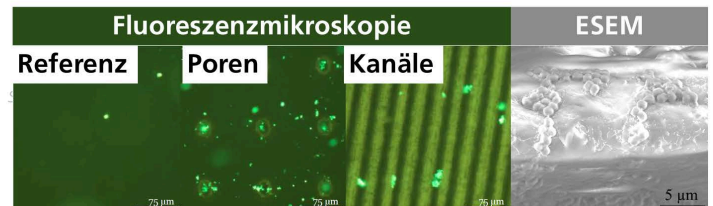
Laserinduzierte Schwamm-Architektur auf PET (REM): Kanäle mit gerichteter Benetzung und Mikrokammern als Nischen<sup>3</sup>.

### Biologie & Prüfstrategie

- Organismen: *Achromobacter spanius* (Bakterium), *Trametes versicolor* (Pilz).
- Praxisnah:  $3-4 \mu\text{g/L}$  Diclofenac.
- Tests: Chromatografie, Fluoreszenz-/Elektronenmikroskopie.

### Ergebnisse – Kolonisation (24 h, 28 °C)

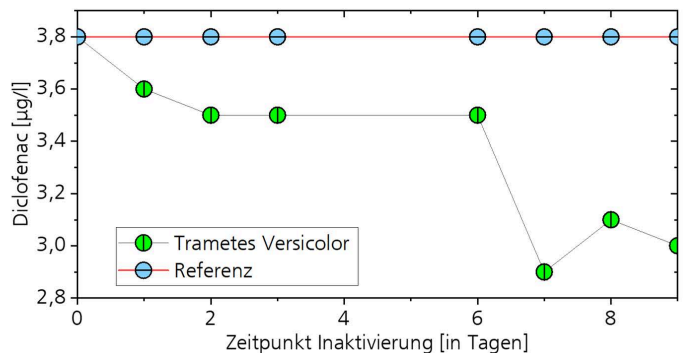
- 65 % der lebenden Zellen im Kanal korrelieren mit Nischen- und Kapillareffekten.
- Poren und Kanäle werden initial besiedelt



Kolonisationsexperimente mit *Achromobacter spanius* nach 24 h bei 28 °C: links Fluoreszenzmikroskopie mit Vitalfärbung (Referenz, laserinduzierte Poren und Kanäle); rechts Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM) von Kolonien im laserinduzierten Kanal.

### Ergebnisse – Abbauersuch (Batch, $\mu\text{g/L}$ )

- Start  $\approx 3-4 \mu\text{g/L}$ ; Kontrollen  $\approx 3,8 \mu\text{g/L}$  stabil.
- T. versicolor*:  $\sim 25\%$   $\downarrow$  in 7 Tagen ( $3,8 \rightarrow \sim 3,0 \mu\text{g/L}$ ).
- A. spanius*: bislang keine robuste Abnahme.
- Bedarf: Ko-Substrate, Induktion, Hydraulik, Habitatkopplung.



Gaschromatographie zur Messung des Diclofenacabbaus durch *Trametes versicolor* vergleichbar mit realen Abwasserkonzentrationen.

### Ausblick

- Demonstrator im Durchfluss-Technikum (realer Ablauf Bremen hanseWasser).
- MaterialDigital: Digitaler Zwilling, Laser-Material-Biologie Wechselwirkungsanalysen.
- Betrieb: Inokulum, Ko-Substrate, Start-up, Kokulturen.
- Ziel: hybride 4. Stufe, niedrige OPEX/CO<sub>2</sub>, Langzeitstabilität.

- European Union; Urban Wastewater Treatment Directive (Directive (EU) 2024/3019), 2024.
- M. Wehrh, Bakterielle Aufnahme, Selektivität und interne Prozessierung bei marinen Schwämmen (Porifera), 2006, Dissertation, Universität Würzburg.
- T. Hadler; Untersuchungen zur bio-inspirierten Laser-Oberflächenmodifikation von Polymeren zur Ansiedlung spezifischer Mikroorganismen. IFAM, Hochschule Bremen, 2025.

### Kontakt

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





# HEAL-X Bioink

## Entwicklung von Peptidnanofibrillen, Hydrogelen, Wirkstoffpartikeln und deren Zellreaktion

I. Schmidt<sup>1</sup>, P. Richthof<sup>2</sup>, T. Thummaraj<sup>3</sup>, M. Bagherabadi<sup>3</sup>, E. Arefaine<sup>1</sup>, T. Weil<sup>3</sup>, J. Gačanić<sup>3</sup>, A. Blaeser<sup>2</sup>, H. Hartmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der  
Universität Tübingen, 72770 Reutlingen, Deutschland

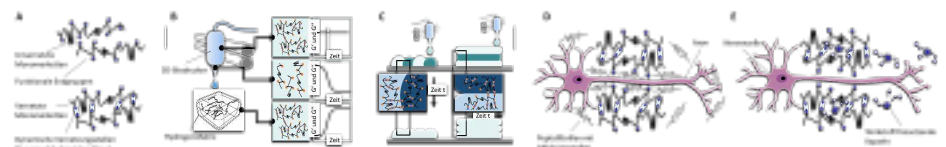
<sup>2</sup>Technische Universität Darmstadt, Institut für BioMedizinische  
Drucktechnologie, 64289 Darmstadt, Deutschland

<sup>3</sup>Max-Planck-Institut für Polymerforschung, Synthese von  
Makromolekülen, 55128 Mainz, Deutschland

### EINFÜHRUNG / PROJEKTIDEE

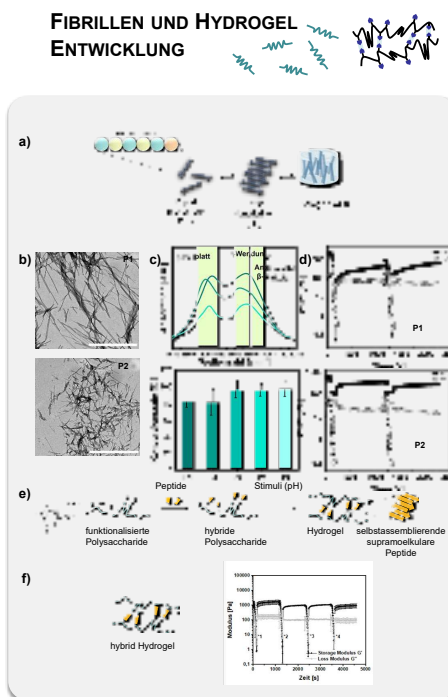
Ziel im Projekt HEAL-X Bioink ist die Entwicklung einer selbstheilenden, bioinspirierten und funktionalen **Hydrogel-Plattform** für das 3D-Bioprinting der nächsten Generation. Das Vorhaben ist durch supramolekulare, biochemische Wechselwirkungen inspiriert, die in der Natur in verschiedensten Organismen und Geweben beobachtet werden.

Einzelne Arbeitspakete befassen sich mit der Entwicklung von **Peptidnanofibrillen**, welche ebenfalls von natürlichen fibrillären, zelladhäsiven Strukturen inspiriert sind und als Leitmotive für Zellen innerhalb der 3D-Umgebung dienen sollen. Zudem wird angestrebt **Wirkstoffe** wie z.B. der Nervenwachstumsfaktor (NGF) zu immobilisieren, welche im Gel letztlich kontrolliert und über einen definierten Zeitraum freigesetzt werden um zelluläre Prozesse wie beispielsweise neuronale Differenzierung gezielt zu steuern.



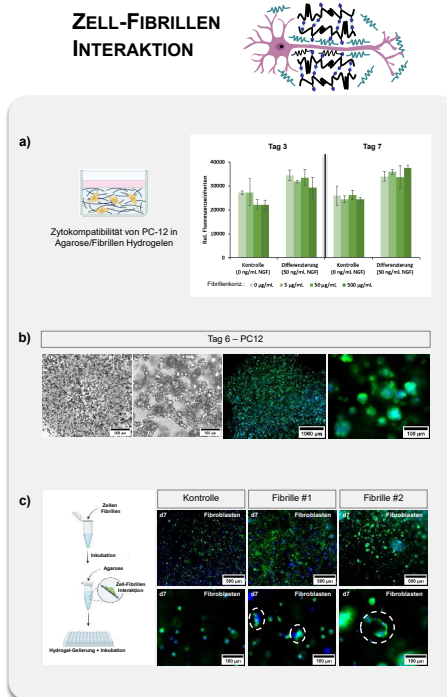
**Abbildung 1: Schematische Darstellung des HEAL-X Bioink Projekts.**  
Entwicklung eines selbstheilenden Hydrogels mit supramolekularen Wechselwirkungen zur Ermöglichung dynamischer Interaktionen. (A) Zeit- und prozessabhängige Scherkräfte und deren Einfluss auf die Viskosität während des 3D-Biodrucks. (B) Selbstheilungsverhalten des gedruckten Konstrukts nach dem Biodruck (DoD und µ-Extrusion). (C) Steuerung des Neuritenauswachsens durch die Einbindung von Peptidnanofibrillen mit geeigneten Adhäsionsstellen (D) und eingekapselten Wirkstoffen (E) in der BioTinte.

### ERGEBNISSE



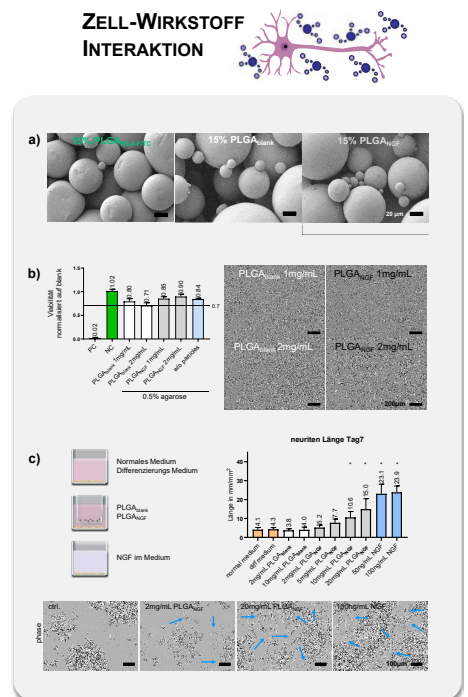
**Abbildung 2: Fibrillen und Hybrid Hydrogel Entwicklung**  
a) Schematische Abbildung der selbstorganisierenden Peptide und Nanofibrillen als supramolekulare Gelbildner. b) TEM-Aufnahmen unterschiedlicher Peptidfibrillen nach Fibrillation. Maßstabsbalken 1 µm. c) ATR-FTIR-Analysen der in den gebildeten PNFs vorhandenen Sekundärstrukturelemente mit hoher Konversionsrate. d) Aufeinanderfolgende Messungen von oszillierenden Dehnungsschweeps (0,01–1000 %) mit fester Frequenz (1 Hz), gefolgt von oszillierenden Zeitsweep-Messungen mit fester Dehnung (0,1 %) und Frequenz (1 Hz), die die thixotrope Natur des Peptidhydrogels demonstrieren. e) Schematische Darstellung der Synthese hybrider Polysaccharide und Hybridsynthese. f) Hydrogelbildung aus dem Hybrid.

- Unterschiedliche Aminosäuresequenzen ergeben unterschiedliche strukturelle Merkmale
- Hoher  $\beta$ -Faltblattanteil und hohe Konversionsrate
- Effiziente Selbstorganisation zu Peptid-Nanofibrillen
- Thixotropieverhalten über mehrere Zyklen



**Abbildung 3: Fibrillen-Interaktion von Fibroblasten und neuronalen Zellen (PC12)**  
a) PC12-Zytoplastizität von Peptidfibrillen in 3D nach 3 und 7 Tagen. b) Zellmorphologie von PC12 Zellen nach 6 Tagen. c) Schematischer Versuchsaufbau zur 3D-Kultivierung von Fibroblasten in Agarose mit Peptidfibrillen über 7 Tage, sowie entsprechende Fluoreszenzaufnahmen (DAPI/Akkin). Maßstabsbalken oben: 500 µm, unten: 100 µm.

- Peptidfibrillen sind in 3D-Setups zytoplastisch, ohne Einfluss auf die Zell-Proliferation
- Peptidsequenz beeinflusst Zellmorphologie
- Biofunktionalisierung von Hydrogelen mittels Peptidfibrillen möglich



**Abbildung 4: Wirkstoff-Zell Interaktion**  
a) REA-Aufnahmen der 15% PLGA-Partikel mit BSA-FITC, ohne Wirkstoff (blank) oder NGF. Maßstabsbalken 20 µm. b) Zytoplastizitätstest nach ISO 10993-5 und zugehörige Phasenkontrastaufnahmen von L929 Zellen nach der Inkubation mit flüssigen Extrakten nach 24 h. Maßstabsbalken 200 µm. c) Schematischer Versuchsaufbau der Stimulation von PC12-Zellen mit PLGA-Partikeln bzw. NGF im Medium. Quantifizierung nach 7 Tagen und zugehörige Phasenkontrastaufnahmen nach 7 Tagen. Maßstabsbalken 100 µm.

- Die W/O/W Doppel-Emulsionstechnik eignet sich zur Verkapselung von Proteinen wie BSA-FITC und Wachstumsfaktor NGF.
- PLGA-Partikel mit und ohne NGF sind zytoplastisch.
- PLGA<sub>NGF</sub> ermöglichen Differenzierung von PC12 Zellen.

### ZUSAMMENFASSUNG & FAZIT

Im Rahmen des HEAL-X Bioink-Projekts wurden erfolgreich verschiedene **selbstassemblierende Peptidnanofibrillen**, **Hybrid-Hydrogele** sowie **wirkstoffbeladene PLGA-Partikel** entwickelt. Unterschiedliche Aminosäuresequenzen führten zu variierenden strukturellen Eigenschaften der Fibrillen, wobei hohe  $\beta$ -Faltblattanteile und effiziente Selbstorganisation mit hohen Konversionsraten erzielt wurden. Die entwickelten Hybrid-Hydrogele zeigten über mehrere Zyklen hinweg thixotropes Verhalten und damit selbstheilende Eigenschaften. Zudem erwiesen sich die Peptidnanofibrillen in 3D-Kulturen als zytoplastisch, ohne dabei die Zellproliferation zu beeinträchtigen.

Es konnte gezeigt werden, dass sich Hydrogele durch Einbettung der Fibrillen biofunktionalisieren lassen. Darüber hinaus wurden PLGA-Partikel mit BSA-FITC, mit und ohne den Wirkstoff NGF, hergestellt. Zytoplastizitätstests gemäß ISO 10993-5 mit flüssigen Extrakten bestätigten die Zytoplastizität der Partikel. Zudem unterstützten die Partikel über einen Zeitraum von sieben Tagen das Neuriten-Auswachsen.

### DANKSAGUNG

Diese Arbeit wird durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt finanziell unterstützt. FKZ 13XP5207

Gefördert durch:

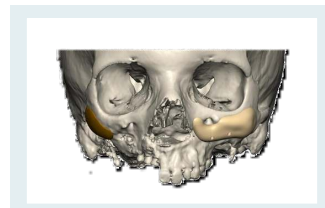
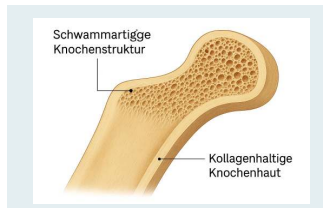


### Herausforderungen rekonstruktive Chirurgie

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 Modulfehlanspassungen, Empfindungsstörungen oder Interferenzen mit bildgebenden Verfahren zur Therapiekontrolle kommen.

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.

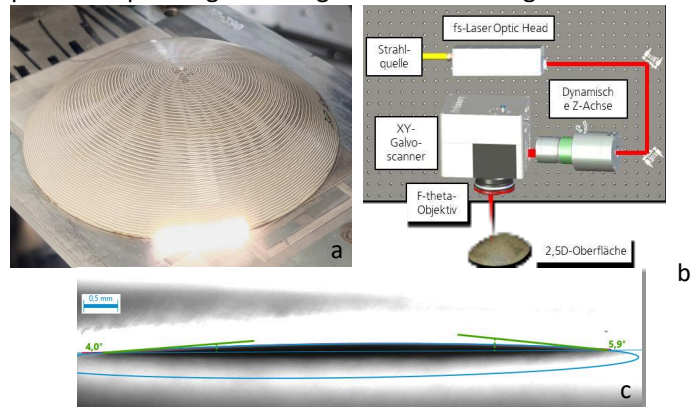
### Zielstellung Projekt

Um die Gewebs- und Knochenintegration 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, welche gleichzeitig additiviertes biphasisches Calciumphosphat im PEEK-Substrat freigelegt soll.

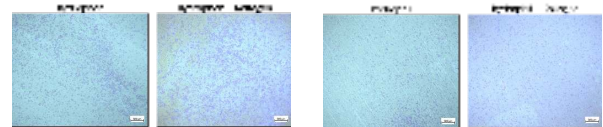
Die Knochennachbildung wird komplettiert durch eine Beschichtung mit kollagenartigem Protein auf dem strukturierten PEEK. Das Projekt wird in die Plattform MaterialDigital eingebunden.

### Erste Ergebnisse

Durch gezielte Laserbearbeitung und ein dynamisches Fokusmodul lassen sich dreidimensionale PEEK-Oberflächen hydrophil oder hydrophob einstellen. Dies ermöglicht eine präzise Anpassung an biologische Anforderungen.



Bisherige Ergebnisse zeigen, dass mittels funktionalisierter Oberflächen kollagenartiges Protein zur verbesserten Zellinteraktion angebunden werden kann. Mit einer Laserstrukturierung der Oberfläche soll zudem die Adhäsion des Zellgewebes verbessert und somit einer Dislokation des Implantats im Körper entgegengewirkt werden. Die modifizierte Oberfläche zeigt jedoch eine hohe Sensitivität gegenüber äußeren Einflüssen – insbesondere hinsichtlich biomechanischer und zellbiologischer Eigenschaften. Hierbei wurden hydrophobe und hydrophile Laserstrukturierungen getestet. Zusätzlich wurden die Proben mit kollagenähnlichem Protein beschichtet. Saos-2-Zellen wurden mit einer Konzentration von  $1 \cdot 10^5$  Zellen/ml auf den Proben ausgesät. Anschließend wurden die Zellen für 48 Stunden inkubiert, dann mit Glutaraldehyd (2,5 % v/v in PBS) 30 Minuten fixiert und mit Kristallviolett (1 % wässrig) für 20 min. gefärbt. Die Aufnahmen wurden mit dem Zeiss AxioScope 5 und einer 25-fachen Vergrößerung gemacht.



Diese biomechanischen und zellbiologischen Eigenschaften müssen im weiteren Projektverlauf weiter detailliert untersucht werden.

Holger Herget

MPL Metall-Pulver-Lackierung GmbH, Steinstraße 31, 73037 Göppingen

Holger.Herget@mpl-gmbh.de

Der Projektverbund aus drei KMU, die entlang der Wertschöpfungskette der industriellen Pulverbeschichtung tätig sind, und einem Polymerforschungsinstitut hat sich zum Ziel gesetzt, erstmals die industrielle Herstellung superhydrophober Pulverlack-schichten nachhaltig und prozesssicher zu ermöglichen.

### Projektziele

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 für eine haftfeste Beschichtung der Produkte und
- die Erarbeitung eines innovativen Beschichtungsprozesses, der die Selbstausbildung der superhydrophoben Oberflächen gewährleisten kann.

### Projektstruktur und Beiträge der Teilprojekte

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die Projektstruktur und zeigt die Schwerpunkte der Verbundpartner.

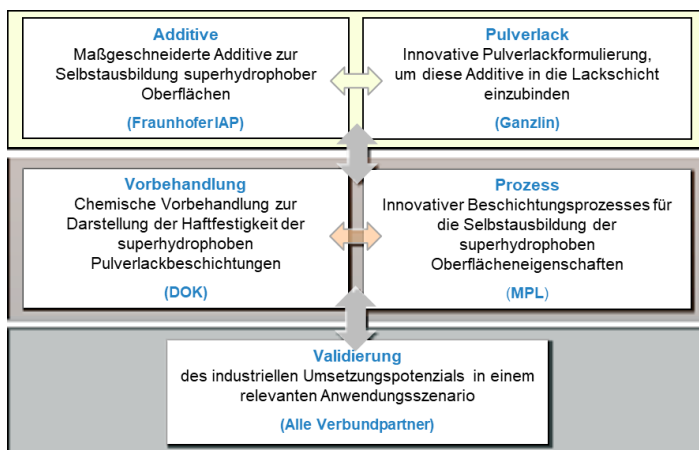


Abbildung 1: Projektstruktur des Verbundprojekts PLackLoS

Die Teilprojekte entsprechen den Schwerpunktthemen der Verbundpartner und untersuchen jeweils die nachfolgend skizzierten Lösungsbeiträge der projektierten Systemlösung.

### Teilprojekt: „Untersuchung von mikro- und submikroskali-gen Additiven für superhydrophobe Pulverlacke“

Passfähigkeit der Additive für adaptierte Pulverformulierungen – hydrophobe und mikrorauhe Funktionalisierung der Oberfläche – spontane Selbstanordnung der Additive an der Oberfläche während des Beschichtungsprozesses.

### Teilprojekt: „Untersuchung von Formulierungen für ein Pulverlacksystem mit superhydrophoben Eigenschaften“

Integration der mikroskaligen Additive in Pulverformulierungen – Untersuchung der Misch-, Extrusions- und Applikationsprozesse für die Beimengung der Additive (bes. Temperatur und Scherkräfte) – Stabilität der Pulverformulierungen – Laborversuche zur Funktionsprüfung der Beschichtungseigenschaften.

### Teilprojekt: „Untersuchung Zirkonat basierter Konversionsschichten für die Beschichtung metallischer Bauteile mit superhydrophoben Pulverlacken“

Nanometer dünne Schichten auf Zirkonium-Basis – Erhöhung der Härte des Gesamtschichtsystems – optimale Schichthaf-tung der Pulverlackbeschichtung.

### Teilprojekt: „Untersuchung der Prozesseigenschaften ei-nes Beschichtungssystems zur Darstellung neuartiger su-perhydrophober Pulverlacke“

Physikalische Grenzen des Beschichtungsprozesses für die untersuchten Lösungsansätze – Prozessfähigkeit der unter-suchten Rezepturen – Prozessbedingungen zur Darstellung superhydrophober Pulverbeschichtungen – Aufbau eines De-monstrators.

### Projektpartner:

MPL GmbH Pulverbeschichtung  
(Projektkoordinator)

Fraunhofer IAP

DOK Chemie GmbH

Ganzlin Beschichtungspulver GmbH

Assoziierter Partner: eiffo PartG

**MPL GmbH**  
Pulverbeschichtung

**Fraunhofer**  
IAP  
**D-O-K**  
Chemie GmbH  
**Ganzlin**  
Beschichtungspulver  
**eiffo**

Gefördert durch:



BIOLOGISIERUNG  
DER TECHNIK

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Programm „Biologisierung der Technik“ gefördert und vom Projektträger VDI-TZ betreut.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.



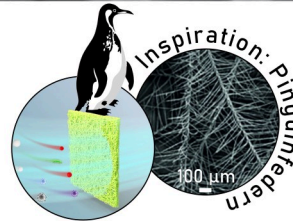
# PINGUIN 2: Pinguinfasern als Vorbild für neuartige Filtermedien zur Filterung von Aerosolen und Mikroplastik

C. Deng<sup>1</sup>, M. Izidoro Santos<sup>2</sup>, M. Dulder<sup>1</sup>, M. Langner<sup>3</sup>, J. M. de Souza e Silva<sup>2</sup>, U. Hirsch<sup>4</sup>, Piotr Pavlik<sup>5</sup>, M. Lelonek<sup>5</sup>, C. Schmelzer<sup>4</sup>, R. Wehrspohn<sup>2</sup>, A. Greiner<sup>1</sup>, J. Binzer<sup>3</sup>, H. Leubner<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Neue Materialien Bayreuth GmbH, <sup>2</sup> Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, <sup>3</sup> BinNova Microfiltration GmbH, <sup>4</sup> Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, <sup>5</sup> Smart Membranes GmbH

## Hintergrund

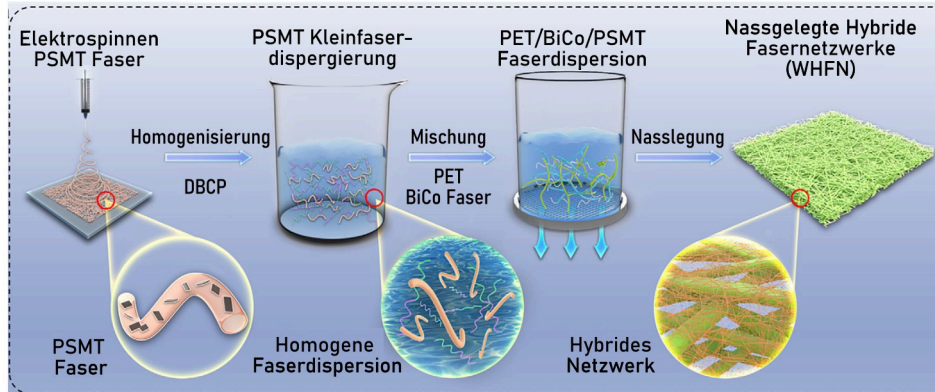
Die zunehmende Belastung durch Pathogene, Feinpartikeln und Mikroplastik erfordert neuartige Filtersysteme mit hoher Abscheideleistung bei gleichzeitig geringem Energiebedarf. Herkömmliche Faserfilter erreichen häufig keine ausreichende Effizienz bei Partikelgrößen < 2,5 µm, ohne einen hohen Druckverlust zu verursachen



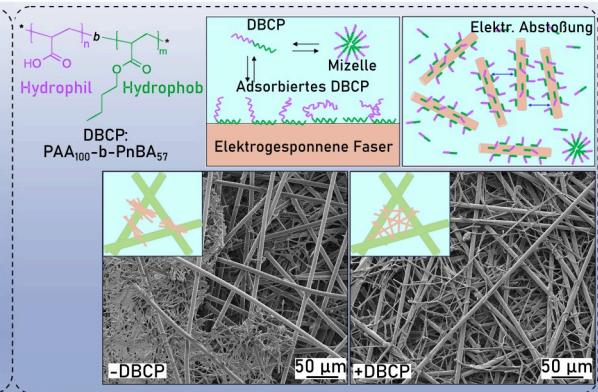
## Bioinspirierter Ansatz

Die Mikrostruktur von Pinguinfedern als (Bio)inspiration: ein hierarchisches Netzwerk aus groben Hauptfasern und feinen, senkrecht orientierten Fibrillen.

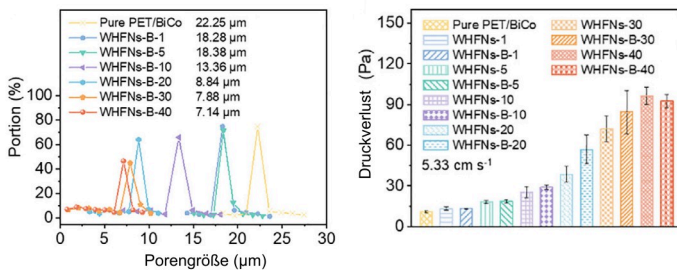
## Filterherstellung



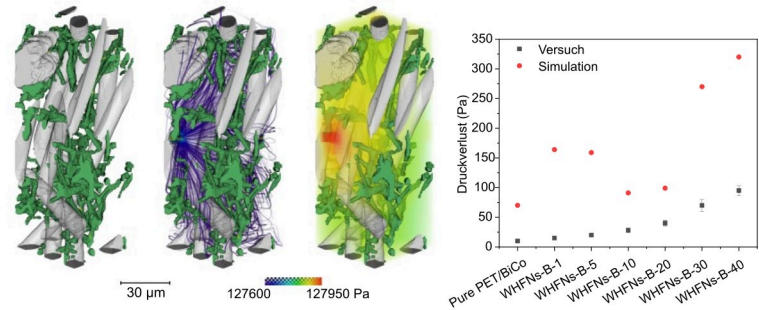
## Das Prinzip



## Ergebnisse



- Porengröße ≥ 7 µm, abhängig vom PSMT-Kurzfasergehalt
- Druckverlust < 100 Pa, auch nach 50 Betriebszyklen stabil



- 3D-Charakterisierung mit Nano-CT
- CT-basierte Simulationen für zukünftige Filteroptimierungen

## Laufende Arbeiten

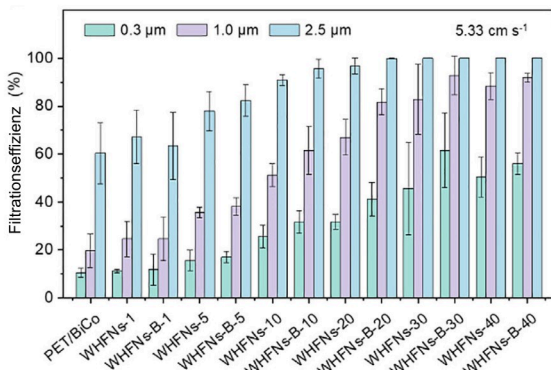
- Optimierung der Porengröße → Poren < 1 µm
- Kaskadenfiltrationstests gegen Mikroplastik: 1,9 µm Polystyrol (PS)
  - Effizienz > 86 % - Maximale Effizienz 5-30% PSMT
- Prozessskalierung - Elektrospinning-Pilotanlage
  - Nassvliesherstellung von Polyamid (PA)-Nanofaser
- Datenbank im Plattform MaterialDigital (PMD)
  - 3D-Mikrostruktur von Nano-CT-Aufnahmen
  - Leistungsdaten der Filtermaterialien

## Zusammenfassung und Ausblick

- Bioinspirierte Filtrationsplattform
- Leistungstarkes, energieeffizientes und skalierbares System
- Zukünftiger Fokus
- Materialoptimierung, Prozessskalierung und industrielle Anwendung

## Danksagung

Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) für die Projektförderung



- Hohe Filtrationseffizienz gegenüber Aerosolen
- 100 % Abscheideleistung für 2,5 µm-Partikel bei 20 % PSMT
- ≥ 80 % Abscheideleistung für 1,0 µm-Partikel bei 20 % PSMT



## Programmierbare Materialien mit optimaler Stoßdämpfung nach dem Vorbild menschlicher Bandscheiben

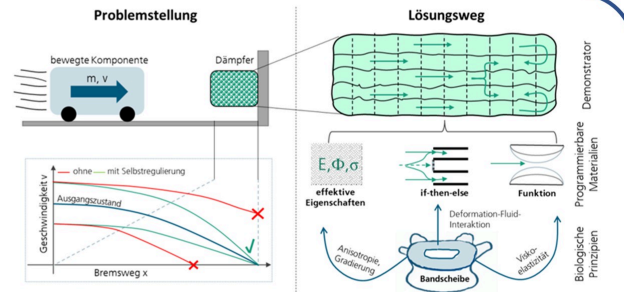
Dr. Max D. Mylo<sup>1</sup>, Dr. Franziska Wenz<sup>2</sup>, Daniel Bren<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik – IMTEK; <sup>2</sup>Fraunhofer Cluster of Excellence Programmierbare Materialien CPM; <sup>3</sup>Festo SE & Co. KG



### Zielsetzung und Problemstellung

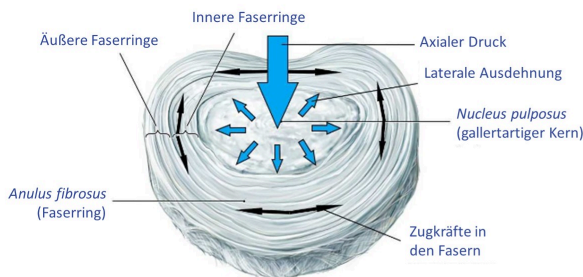
- Aktuelle Dämpfersysteme sind nicht in der Lage an variable Aufprallgeschwindigkeiten oder Massen anzupassen.
- Ziel: **Adaptive Dämpfer** mit Dämpfungsverhalten abhängig von der Anfangsgeschwindigkeit/Masse.
- Nutzung von bioinspirierten, **programmierbaren Materialien** um **Selbstregulierung** zu ermöglichen.



Problemstellung und Lösungsweg für eine selbstregulierende Dämpfung für optimales Bremsverhalten. Links: Lastfall und gewünschtes Zielverhalten. Rechts: Vorgehen im Projekt.

### Biologisierung

- Menschliche **Bandscheibe** als biol. Vorbild.
- Ermöglicht eine adaptive Dämpfung von Kräften – vom einfachen Laufen bis zu Saltos.
- **Druckkräfte** werden in Zugkräfte **umgewandelt**.
- Adaptiver Anteil an beteiligten Faserringen.



Struktureller Aufbau der Bandscheibe und skizzierte Wirkweise. Verändert nach Schünke *et al.*, 2022.

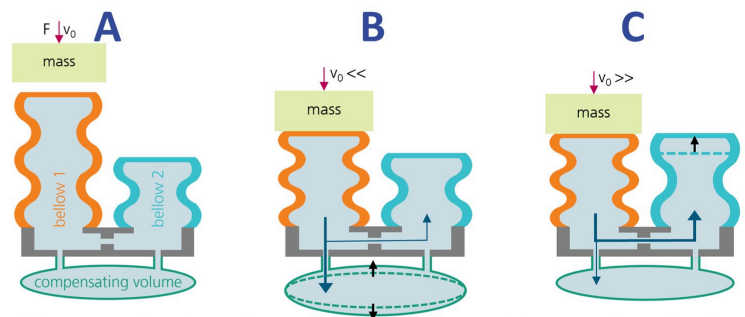
### Digitalisierung



- Leitung: Fraunhofer CPM und Uni Freiburg.
- Erstellung einer gemeinsamen **PMD-konformer Datenstruktur**.
- **Data-Journey** anhand eines beispielhaften Funktionsdemonstrator-Datensatzes.
- Identifikation und **Standardisierung** kritischer Schnittstellen, Prozess- und Materialparameter

### Lösungskonzept

- Entwicklung fünf verschiedener Dämpfer-Ansätze und Funktionsdemonstratoren.
- **Bewertungsmatrix** zur Auswahl mit 18 Kriterien.
- Vielversprechendste Lösung: Flüssigkeitsgefülltes **Doppel-Faltenbalg** System mit Ausgleichsvolumen.
- Abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit und auftretender Kraft wird Energie direkt dissipiert (Fluidtransport in Ausgleichsvolumen) oder als potentielle Energie im zweiten Balg gespeichert (Fluidtransport zwischen den Balgen).



Wirkungsweise im Konzept des programmierbaren Stoßdämpfers, A: Ausgangszustand, B: Fall 1 mit geringer Aufprallgeschwindigkeit, C: Fall 2 mit hoher Aufprallgeschwindigkeit.

- **Biologisierung der Dämpfung:** Analog zur Bandscheibe werden im Doppelbalg Fluidbewegungen abhängig von den auftretenden Kräften adaptiv gesteuert und damit zusätzliche Dämpferelemente hinzugeschaltet.

### Kontakt



Dr. Max David Mylo  
Universität Freiburg - IMTEK  
Mail: max.mylo@livmats.uni-freiburg.de

Dr. Franziska Wenz  
Fraunhofer IWM, Freiburg  
Mail: franziska.wenz@iwm.fraunhofer.de

Daniel Bren (Verbundkoordinator)  
Festo, Esslingen  
Mail: daniel.bren@festo.com

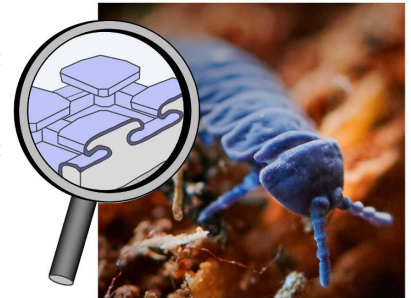


# SATORIS

## Superamphiphobe, Robuste Oberflächenstrukturen für Optische Systeme

### Problemstellung und biologisches Vorbild

Optische Oberflächen wie Brillengläser werden durch bioorganische und fetthaltige Ablagerungen beeinträchtigt. Gängige Schutzbeschichtungen sind zwar robust und transparent, jedoch meist nicht superamphiphob oder enthalten gesundheitlich bedenkliche PFAS. Nanostrukturierte Oberflächen könnten Superamphiphobie erzeugen, sind aber derzeit mechanisch nicht dauerhaft beständig. Als vielversprechende Lösung dient die Natur: Collembolen besitzen eine Körperoberfläche mit robuster, nanoskaliger Wabenstruktur und pilzförmigen Überhängen. Diese biologische Struktur ist beständig gegen Benetzung durch verschiedenste Lösungsmittel und ölige Substanzen – genau die Eigenschaften, die für optische Oberflächen benötigt werden.



### Simulation (ZEISS & TU Dresden)

- **Simulationsumgebung etabliert:** ZEISS hat eine validierte Simulationsumgebung zur Bestimmung der optischen Eigenschaften (Transmission, Reflexion) von Nanostrukturen aufgebaut.
- **Optimale Geometrien identifiziert:** Erste Studien zeigten, dass für Strukturhöhen unter 150 nm würfel- oder zylinderförmige Geometrien optisch vorteilhafter sind als pyramidale, um die Ziel-Transmission von >98 % zu erreichen.
- **Parametrische Simulation entwickelt:** Es wurde eine Simulation implementiert, die den periodischen Abstand der Strukturen berücksichtigt. Damit konnte für eine Vielzahl von Geometrien ein antireflektives Verhalten nachgewiesen werden.
- **Fertigungstoleranzen definiert:** Durch Tests mit Abweichungen vom Idealzustand wurden Anforderungen an die Genauigkeit der Herstellung abgeleitet.
- **Benetzungstabilität simuliert:** Ein 2D-Modell bestätigt, dass ausgeprägte Überhänge und größere Kontaktwinkel die Stabilität gegenüber eindringenden Flüssigkeiten signifikant erhöhen.

### Herstellung (IPF)

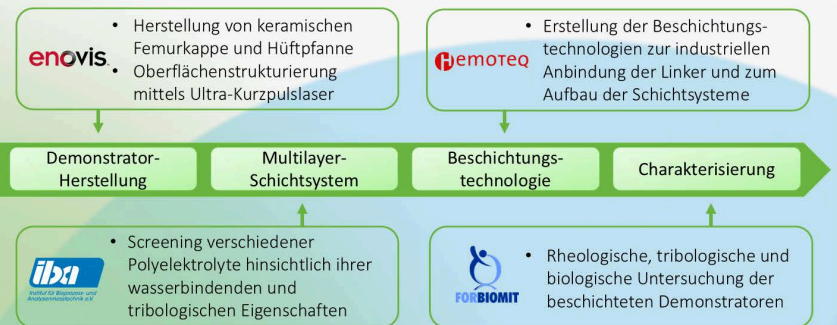
- **Alternative 1 - Reaktives Ionentiefenätzen (RIE):**
  - Es wird an der direkten Strukturierung von Quarzglas mittels eines mehrstufigen Ätzprozesses gearbeitet.
  - Erste definierte Loch-Arrays mit Überhangbildung wurden durch isotropes Ätzen mit  $\text{SF}_6 + \text{O}_2$  Plasma erfolgreich hergestellt.
  - Die Methode ist sehr präzise, aber aufgrund der zeitintensiven Maskenerstellung derzeit auf Flächen im  $\text{mm}^2$ -Bereich limitiert.
- **Alternative 2 - Emulsionen Templating:**
  - Dieser skalierbare und potenziell kostengünstige Ansatz wird als Alternative für große Flächen verfolgt.
  - Mithilfe von Nanoemulsionen als Template wurden bereits erfolgreich Oberflächen mit Überhangstrukturen im Zielgrößenbereich erzeugt.
  - Die aktuelle Herausforderung ist die unzureichende Transparenz durch Lichtstreuung. Die Optimierung konzentriert sich auf die Emulsionszusammensetzung und die Abscheidung dünnerer Schichten mittels Spin-Coating

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

J.M. Börke<sup>1\*</sup>, D. Thiele<sup>2</sup>, J. Waletzko<sup>2</sup>, A. Jonitz-Heincke<sup>2</sup>, R. Bader<sup>2</sup>, C. Witt<sup>3</sup>, A. Hartmann<sup>3</sup>,  
M. Liebelt<sup>3</sup>, T. Oberbach<sup>3</sup>, D. Grafarend<sup>4</sup>, K. Wiemer<sup>4</sup>, H. Rothe<sup>1</sup>, G. Hildebrand<sup>1</sup>, K. Liefelth<sup>1</sup>

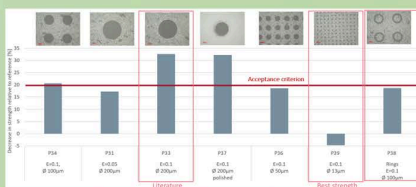
### PROJEKTIDEE:

Unser Ziel ist die Entwicklung neuartiger Beschichtungen für **künstliche Hüftgelenke** und **Stents**, um deren **Biokompatibilität** und **Tribologie** zu verbessern. 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. Durch die **Strukturierung der Prothesenoberfläche** soll zudem die Anhaftung der Beschichtung verbessert und ein **stabiles Flüssigkeitsreservoir** geschaffen werden.



**enovis**

- Laserstrukturierung Keramik



Biaxiale Festigkeit nach ASTM C1499



Demonstratoren keramische Hüftpfanne & Femurkappe

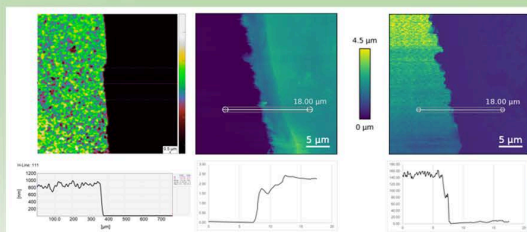
**iba**

- Screening möglicher Polyelektrolyte
- Pin-on-Disc Versuche unterschiedlicher PEMs
- Tribologische Optimierung durch stabile Anbindung und wasserbindenden Oberschicht



**hemoteq** a brand of **FREUDENBERG MEDICAL**

- Demonstrator zur Beschichtung mittels Sprühverfahren
- Up-Scaling und Optimierung der Beschichtungstechnologie
- Beschichtung erster Stent-Prototypen

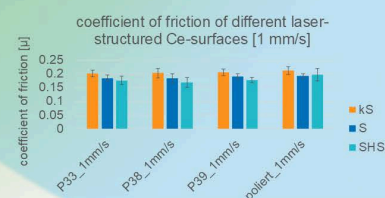


**FORBIOMIT**



Universitätsmedizin  
Rostock

- Rheologische Evaluierung von Schmiermedien
- Pin-on-Disc Versuche unterschiedlicher laserstrukturierter Keramikoberflächen
- Mikroskopische Analyse von Verschleißspuren
- Vorversuch Abriebsimulation über 1,5 Mio. Zyklen



### FAZIT UND HERAUSFORDERUNGEN:

Die mechanischen Eigenschaften der Keramik werden durch die Laserstrukturierung nicht beeinträchtigt. Im Rahmen des Projektes wurde eine hochkomplexe Beschichtung identifiziert, die die tribologischen Anforderungen an künstliche Gelenke erfüllt. In den folgenden Projektabschnitten wird die Beschichtung auf Keramiken aufgebracht. Zu diesem Zweck wird die vielversprechende Beschichtungsmethode für Keramiken und Stents mittels Sprühverfahren optimiert. Anschließend werden die beschichteten Prototypen auf Verschleiß und Hämostompatibilität und der anfallende Abrieb auf zytotoxische Effekte getestet.

\*Präsentierende Autorin

<sup>1</sup>Institut für Bioprozess- und Analysemesstechnik e.V., Rosenhof, 37308 Heilbad Heiligenstadt

<sup>2</sup>Mathys Orthopädie GmbH, An den Trillers Büschen 2, 07646 Mörsdorf

<sup>3</sup>Hemoteq AG, Adenauerstr. 15, 5246 Würselen

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

<b>A</b>		Gryshchuk, Oleksandr	11, 33	Menzel, Hannah	13, 34
Abel, Andreas	9, 32	Gätchen, Linda	17	Meyer, Daniel	9, 32
Arefaine, Elsa	35	Gätjen, Linda	36	Micke, Michael	13
<b>B</b>		<b>H</b>		Micke, Micheal	34
Bader, Rainer	27, 41	Hartmann, Axel	27, 41	Mutz, Daniel	13, 34
Bagherabadi, Baran	15	Hartmann, Hanna	15, 35	Mylo, Max	23, 39
Bagherabadi, Mohadeseh	35	Hassenbach, Peter	2	<b>N</b>	
Binzer, Jürgen	21, 38	He, Chao	17, 36	Nalbant, Belma	11, 33
Blaeser, Andreas	15, 35	Herget, Holger	19, 37	Nguyen, Viet Duc	13, 34
Borcherding, Kai	17, 36	Heusinger von Waldegge, Tim	13, 34	Nolte, Nane	17, 36
Braun, Steffen	17, 36	Hildebrand, Gerhard	27, 41	<b>O</b>	
Bren, Daniel	23, 39	Hirsch, Ulrike	21, 38	Oberbach, Thomas	27, 41
Bucher, Felicitas	7, 31	HofzumaHaus, Norma	17	<b>P</b>	
Börke, Julia Marie	27, 41	Hofzumahaus, Norma	36	Pawlik, Piotr	21, 38
<b>C</b>		<b>I</b>		Plura, Jessica	7, 31
Cervantes Gonzales, Mireya	11,	Izidoro Santos, Murilo	21, 38	Prätorius, Simon	25
Yareth	33	<b>J</b>		<b>Q</b>	
<b>D</b>		Jaeger, Raimund	5, 30	Quintanilha, Richard	25
Deng, Chao	21, 38	Jahr, Holger	11, 33	<b>R</b>	
Dulder, Marie	21, 38	Jonitz-Heincke, Anika	27, 41	Reiser, René	5, 30
<b>E</b>		<b>K</b>		Richthof, Philipp	15, 35
Emonts, Caroline	11, 33	Klein, Stefan	9, 32	Rothe, Holger	27, 41
Erb, Rainer	3, 9, 32	Klein, Vanessa	17, 36	Rudolph, Jessica	9, 32
<b>F</b>		Kohlgrüber, Vera	13, 34	<b>S</b>	
Friedrichs, Jens	25, 40	Kolano, Benjamin	5, 30	Schenderlein, Matthias	19
<b>G</b>		<b>L</b>		Schmelzer, Christian	21, 38
Gacanin, Jasmina	35	Langner, Markus	21, 38	Schmidt, Isabelle	15, 35
Gaćanin, Jasmina	15	Lelonek, Monika	21, 38	Schwonburg, Thomas	5, 30
Glabbatz, Piet	5, 30	Leubner, Holger	21, 38	Shettigar, Pranav	11, 33
Grafahrend, Dirk	27, 41	Liebelt, Martin	27, 41	Sievers, Ernst-Udo	19, 37
Greiner, Andreas	21, 38	Liefeith, Klaus	27, 41	Specht, Uwe	13, 34
Grigoriev, Dmitry	19	<b>M</b>		Steer, Peter	5, 30
Grom, Stefanie	17, 36	Martins de Souza e Silva,	21,	Stricker, Birthe	13, 34
Groß, Sabine	9, 32	Juliana	38	<b>T</b>	

Thiele, Daniel	27, 41	<b>W</b>		Wicker, Kai	25
Thummaraj, Thunchanok	15, 35	Waletzko, Janine	27, 41	Wiemer, Katharina	27, 41
Trehin, Pierre	7, 31	Weber, Wilfried	7, 31	Witt, Carolin	27, 41
<b>V</b>		Wehrspohn, Ralf	21, 38	Wolfram, Tobias	17, 36
Vetyskova, Veronika	7, 31	Weil, Tanja	15, 35	<b>V</b>	
Voigt, Axel	25	Wenz, Franziska	23, 39	von Strauwitz, Tilman	25, 40
		Werner, Carsten	25		