

# Mehr als Bionik - Biofunktionelle Polymere als innovative neue Materialien

## More than bionics - biofunctional polymers as innovative new materials

Sophia Rosencrantz, Fraunhofer IAP, Potsdam, Deutschland

Joachim Storsberg, Fraunhofer IAP, Potsdam, Deutschland

Ruben R. Rosencrantz, BTU Cottbus-Senftenberg, Senftenberg, Deutschland; Fraunhofer IAP, Potsdam, Deutschland

### Kurzfassung

Biofunktionelle Polymere integrieren biologische Funktionsprinzipien in synthetische Materialien und schaffen damit eine neue Materialklasse mit gezielt einstellbaren Eigenschaften. Durch die Integration von Zuckermolekülen (Glykanen), Enzymen oder biomimetischen Strukturen entstehen Hochleistungspolymere mit einzigartigen Anwendungsperspektiven in Medizintechnik, Sensorik und funktionalen Beschichtungen. Der Beitrag zeigt aktuelle Forschungsergebnisse zu Glykopolymeren, wirkstofffreisetzungsfähigen Kontaktlinsen, 3D-biogedruckten Implantaten und biofunktionalisierten Bulk-Materialien. Diese Materialien gehen über reine Bionik hinaus: Sie kombinieren synthetische Polymerchemie mit molekular-biologischen Funktionsmechanismen und eröffnen disruptive Innovationspotenziale für die Materialindustrie.

### Abstract

Biofunctional polymers integrate biological functional principles into synthetic materials, creating a new class of materials with precisely tunable properties. By incorporating sugar molecules (glycans), enzymes or biomimetic structures, high-performance polymers are created with unique application perspectives in medical technology, sensor technology and functional coatings. This contribution presents current research results on glycopolymers, drug-eluting contact lenses, 3D-bioprinted implants and biofunctionalized bulk materials. These materials go beyond pure bionics: they combine synthetic polymer chemistry with molecular biological functional mechanisms and open up disruptive innovation potentials for the materials industry.

## 1 Von der Natur lernen - mehr als Bionik

Die Bionik kopiert Strukturen und Mechanismen der Natur für technische Anwendungen, vom Lotuseffekt bis zum Klettverschluss. Biofunktionelle Polymere gehen jedoch einen entscheidenden Schritt weiter: Sie integrieren die molekulare Erkennungs- und Wechselwirkungsprinzipien biologischer Systeme direkt in synthetische Materialien. Dabei werden natürliche Funktionsbausteine wie Zucker (Glykane), Peptide oder Enzyme mit Polymeren kombiniert, um Materialien mit völlig neuen Eigenschaftsprofilen zu schaffen. Biofunktionelle Materialien sind definiert als Materialien, die aus Biomasse hergestellt sind und/oder mit Biomasse wechselwirken. Diese Definition umfasst sowohl die stoffliche Herkunft als auch die funktionelle Interaktion auf molekularer Ebene. Die biologische Wechselwirkung kann dabei auf verschiedenen Ebenen stattfinden: von der Zellerkennung über Proteinbindung bis hin zu enzymatischer Katalyse.

### 1.1 Glykopolymere: Synthetische Nachbildung natürlicher Mucine

Glykane sind die komplexeste und vielfältigste Klasse von Biomolekülen. Sie bilden die Glykokalyx, eine dichte Zu-

ckerschicht auf allen menschlichen Zellen, und sind verantwortlich für fundamentale biologische Prozesse wie Zell-Zell-Kommunikation, Immunantworten und Pathogenabwehr. Zuckerstrukturen sind im menschlichen Körper allgegenwärtig: Sie umgeben die Zellen wie ein Gerüst, das sie einerseits schützt und andererseits Interaktionen mit anderen Kompartimenten ermöglicht. Die sogenannten Glykane treten als Glykolipide, Proteoglykane oder Glykoproteine auf.

Mucine, die natürlichen „Schleimproteine“, bestehen aus einem Proteinrückgrat mit dicht angeordneten Zuckerketten und sind für ihre außergewöhnlichen tribologischen Eigenschaften sowie ihre Schutz- und Lubrikationsfunktion bekannt. Die strukturelle Komplexität der Oligosaccharide ermöglicht es ihnen, als Informationsträger zu fungieren – viele Proteine besitzen spezifische Zuckerstrukturen, die entscheidend zur Funktion des Proteins beitragen.

Glykopolymere sind synthetische Polymere mit kovalent gebundenen Zuckerstrukturen. Sie imitieren die multivalente Präsentation von Glykanen auf Mucinen, ersetzen aber das Proteinrückgrat durch ein chemisch stabiles, synthetisches Polymerrückgrat. Zwei komplementäre Synthesewege sind etabliert: die Polymerisation von Glykomonomeren und die post-polymerisations-Funktionalisierung bestehender Polymere mit Zuckern. Durch chemische Sulfatierung können anionische, kationische oder zwitterioni-

sche Glykopolymere mit gezielt einstellbaren Eigenschaften herstellen. Neuste Arbeiten zu sulfatierten Glykopolymeren zeigen, dass diese Strukturen als hervorragende Mucin-Mimetika dienen können.

Diese Glykopolymere zeigen außergewöhnliche Eigenschaften, die sie für industrielle Anwendungen attraktiv machen: Sie sind vollständig biokompatibel und zeigen ausgezeichnete Verträglichkeit mit Zellen und Geweben. Ihre tribologischen Eigenschaften übertreffen in vergleichenden Tests sogar die der kommerziell eingesetzten Hyaluronsäure. Die multivalente Präsentation der Zuckerstrukturen ermöglicht die spezifische Erkennung von Lektinen und anderen glykan-bindenden Proteinen, ein Mechanismus, der für Diagnostik und gezielte Wirkstofffreisetzung genutzt werden kann. Gleichzeitig bieten synthetische Glykopolymere eine deutlich höhere chemische und thermische Stabilität als natürliche Mucine, was ihre Verarbeitung und Lagerung erheblich vereinfacht.

## 2 Biofunktionelle Kontaktlinsen

### 2.1 Wirkstofffreisetzende Kontaktlinsen mit Glykopolymerbeschichtung

Ein herausragendes Anwendungsbeispiel für biofunktionelle Polymere sind drug-eluting Kontaktlinsen. Bei der konventionellen topischen Applikation von Augentropfen werden weniger als 5% des Wirkstoffs tatsächlich vom Auge aufgenommen, der überwiegende Teil wird durch Tränenfluss und Lidschlag weggewaschen oder systemisch absorbiert. Gleichzeitig klagen etwa 30% der Kontaktlinsenträger über Augenirritationen, die häufig durch Reibung zwischen Linse und Augenoberfläche verursacht werden. Hier kann ein biofunktionelles Liposom-Polymer-System Abhilfe schaffen, das beide Probleme simultan adressiert.

Die Kontaktlinse wird mittels Layer-by-Layer (LbL) Selbstorganisation mit Glykopolymeren beschichtet. Bei diesem Verfahren werden abwechselnd entgegengesetzt geladene Glykopolymer-Elektrolyte auf die Oberfläche aufgebracht, wobei jede Schicht durch elektrostatische Wechselwirkungen stabilisiert wird. Die Synthese der Glykopolymer-Elektrolyte erfolgt schutzgruppenfrei und in wässriger Lösung, um möglichst wenige Syntheseschritte durchführen zu müssen.

Diese mucin-mimetischen Beschichtungen reduzieren die Reibung mit dem Auge signifikant, in tribologischen Tests zeigen diese Polymere bessere Ergebnisse als die kommerziell eingesetzte Hyaluronsäure. Der Mechanismus basiert auf der hydrophilen, stark hydratisierten Natur der Zuckerketten, die eine Wasserschicht an der Oberfläche binden und so die Reibung minimieren.

In die Glykopolymer-Matrix können zusätzlich wirkstoffgefüllte Liposomen eingebettet werden. Whispering Gallery Mode (WGM) Spektroskopie und Quartz Crystal Microbalance mit Dissipationsmonitoring (QCM-D) Messungen bestätigen, dass die Liposomen in der Beschichtung intakt bleiben. Die adsorbierte Masse, pH-Stabilität und Integrität der Glykopolymer-Beschichtungen sowie der eingebetteten Liposomen wurden durch diese markierungsfreien Charakterisierungsmethoden verifiziert. Die

Glykopolymer-Dünnschichten mit und ohne Liposomen sind im physiologischen pH-Bereich stabil. Die Liposomen ermöglichen eine gleichmäßige Wirkstofffreisetzung über längere Zeiträume.

Dieses System vereint somit drei therapeutische Vorteile: verlängerte Wirkstofffreisetzung für verbesserte Bioverfügbarkeit, erhöhter Tragekomfort durch reduzierte Reibung, und hohe Biokompatibilität durch die naturinspierte Glykopolymer-Chemie.

## 3 Enzyme als Additive in der Kunststoffverarbeitung

Proteine und Enzyme als therapeutische Wirkstoffe reagieren empfindlich auf Temperaturschwankungen, pH-Änderungen und mechanische Belastungen. Biofunktionelle Ansätze können zur Stabilisierung von Biomolekülen in verschiedenen Formulierungen eingesetzt werden..

### 3.1 Immobilisierung und Formulierung für industrielle Anwendungen

Für industrielle Anwendungen wurden systematisch Methoden entwickelt, um Enzyme so zu formulieren, dass sie auch extreme Verarbeitungsbedingungen überstehen. Dies ist besonders relevant für die Integration von Enzymen in Kunststoffe, aber auch für die Entwicklung stabiler industrieller Enzymformulierungen.

Die Adsorption von Enzymen an anorganischen Trägern mit großer Oberfläche hat sich als besonders effektive Stabilisierungsmethode erwiesen. Trägersubstanzen wie Kaolin, Siliziumdioxid oder Zeolithe bieten mehrere Vorteile: Sie sind günstig und in großen Mengen verfügbar, erfordern keine kovalente Modifikation des Enzyms, und ihr Einbau in Polymere ist ein Standardverfahren der Kunststoffverarbeitung. Die Adsorption an diese Träger stabilisiert Enzyme gegen Temperatur, pH-Änderungen und mechanische Scherung. In umfangreichen Studien wurde gezeigt, dass so stabilisierte Enzyme die thermoplastische Kunststoffverarbeitung bei Temperaturen bis zu 160°C überstehen können, und enzymatisch aktiv bleiben. Die thermische Stabilität der Enzyme wird durch die Einbettung in den Kunststoff sogar um etwa 40 K gesteigert, wahrscheinlich, weil der Kunststoff zunächst thermische Energie absorbiert, bevor diese auf das Enzym einwirken kann.

Diese Erkenntnisse sind nicht nur für biofunktionalisierte Kunststoffe relevant, sondern auch für die Formulierung von Enzympräparaten für industrielle Prozesse, Waschmittel, Lebensmittelverarbeitung und andere Anwendungen, bei denen Enzyme unter herausfordernden Bedingungen stabil bleiben müssen. Insbesondere von Interesse ist aber die Tatsache, dass auf diese Weise depolymerisierende Enzyme in Kunststoffe eingearbeitet werden können und so eine Art Selbstzerstörungsmechanismus integriert werden kann. Die biologische Abbaubarkeit solcher enzymadditiver Polymere kann deutlich verbessert werden.

## 4 3D-Biodruck von Knorpelimplantaten

Knorpelschäden haben ein geringes Heilungspotenzial, da Knorpelgewebe nicht durchblutet ist und somit keine regenerativen Stammzellen oder Wachstumsfaktoren über den Blutkreislauf erreichen können. Unbehandelte Knorpeldefekte führen häufig zu Arthrose, einer degenerativen Gelenkerkrankung, für die es derzeit keine effektive kausale Therapie gibt. Um personalisiert Knorpelimplantate herzustellen, ist der 3D-Biodruck prädestiniert. Allerdings müssen hierfür neue Materialien entwickelt werden, die der natürlichen Umgebung der Knorpelzellen nahekommt. Auch hier können biofunktionalisierte Polymere helfen.

### 4.1 Glykopolymer-basierte Biotinten

Neuartige Biotinten enthalten körpereigene Knorpelzellen (Chondrozyten) der Patienten, die aus einer kleinen Gewebeprobe isoliert und im Labor vermehrt werden. Diese Zellen werden in ein Glykopolymer-Hydrogel eingebettet, das als druckbare Biotinte dient. Glykopolymere sind für diese Anwendung besonders geeignet, da sie die natürliche Umgebung der Knorpelzellen, die extrazelluläre Matrix des Knorpels, biomimetisch nachbilden können. Die extrazelluläre Matrix des Knorpels besteht zu einem wesentlichen Teil aus Proteoglykanen, die ein Proteinrückgrat mit dicht angeordneten Glykosaminoglykanen (sulfatierten Zuckerketten) besitzen. Synthetischen Glykopolymere können diese Struktur nachahmen: Die Zuckerketten interagieren mit den Zelloberflächenrezeptoren der Chondrozyten und fördern Zelladhäsion, Proliferation und die Aufrechterhaltung des chondrogenen Phänotyps. Im Gegensatz zu vielen anderen Hydrogel-Systemen, in denen Chondrozyten zu Fibroblasten-ähnlichen Zellen differenzieren, könnten Glykopolymer-Matrices die Produktion von knorpelspezifischen Matrixproteinen wie Kollagen Typ II und Aggrecan unterstützen. Die Biotinten können während oder nach dem Druck durch verschiedene Mechanismen vernetzt werden: photochemisch, enzymatisch oder ionisch. So kann die gewünschte Form und mechanische Stabilität erzeugt werden. Die Vernetzungsdichte und damit die mechanischen Eigenschaften lassen sich präzise einstellen, um den Anforderungen an die Implantatstelle gerecht zu werden.

### 4.1 Personalisierte Implantate und klinische Perspektiven

Der 3D-Biodruck ermöglicht es, patientenspezifische Implantate mit exakt angepasster Geometrie herzustellen. Basierend auf MRT- oder CT-Bildgebung kann die genaue Form des Knorpeldefekts erfasst und ein passgenau angepasstes Implantat gedruckt werden. Die Glykopolymer-Matrix dient dabei nicht nur als mechanisches Gerüst, sondern auch als bioaktives Umfeld, das die Chondrozyten in ihrer natürlichen Funktion unterstützt und die Integration mit dem umgebenden Gewebe fördert.

## 5 Anwendungsperspektiven und Marktpotenzial

Biofunktionelle Polymere adressieren mehrere Wachstumsmärkte mit erheblichem Innovationspotenzial: Medizintechnik und regenerative Medizin: Der globale Markt für 3D-Bioprinting wächst mit über 20% CAGR. Personalisierte Knorpelimplantate, wirkstofffreisetzende ophthalmische Systeme und bioaktive Beschichtungen für Implantate haben hohes Marktpotenzial bei gleichzeitig verbesserter Patientenversorgung.

Pharmazeutische Formulierung: Die Stabilisierung von Protein-Therapeutika und mRNA-Impfstoffen ist eine Schlüsselherausforderung der modernen Pharmazie. Glykopolymer-basierte Formulierungsstrategien können die Haltbarkeit und Lagerstabilität empfindlicher Biomoleküle signifikant verbessern.

Funktionale Beschichtungen: Antimikrobielle, anti-adhäsive oder drug-eluting Beschichtungen für medizinische Devices, Sensoren und technische Oberflächen. Der Markt für funktionale Beschichtungen im Gesundheitsbereich beträgt mehrere Milliarden Euro jährlich.

Intelligente Materialien: Sensormaterialien mit integrierter Erkennungsfunktion für Point-of-Care-Diagnostik, Umweltmonitoring oder Lebensmittelqualität. Die Integration biologischer Erkennungsmechanismen ermöglicht hochspezifische Sensoren ohne komplexe Elektronik.

Nachhaltige Hochleistungspolymere: Biofunktionalisierte, biobasierte Polymere mit kontrolliertem/verbessertem Abbauverhalten oder adaptiven Eigenschaften für Verpackung, Bauwesen und Mobilität.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Biofunktionelle Polymere repräsentieren eine neue Materialklasse, die systematisch biologische Funktionsprinzipien mit synthetischer Polymerchemie vereint. Die Materialien gehen weit über klassische Bionik hinaus: Sie nutzen molekulare Erkennung, multivalente Wechselwirkungen und enzymatische Katalyse für völlig neue Materialeigenschaften, die mit konventionellen Ansätzen nicht erreichbar wären.

Die enge Kooperation zwischen angewandter Forschung am Fraunhofer IAP und universitärer Grundlagenforschung an der BTU Cottbus-Senftenberg schafft optimale Bedingungen für die Entwicklung solcher neuer Materialien.

Die Zukunft der Polymermaterialien liegt in der intelligenten Integration biologischer Funktionen. Biofunktionelle Polymere werden in den kommenden Jahren in immer mehr Anwendungsfeldern konventionelle Materialien ergänzen oder ersetzen, von der personalisierten Medizin über pharmazeutische Formulierungen und funktionale Oberflächen bis zu nachhaltigen Hochleistungspolymeren für die Kreislaufwirtschaft.

## 7 Literatur

[1]