



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

HTAD

Materialinnovationen für die Medizin der Zukunft



Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

Technologie und Gesundheit – diese Kombination hat riesiges Potential für Millionen Patientinnen und Patienten, nicht zuletzt für unsere Wirtschaft.

Deshalb ist die Gesundheitsforschung eines unserer strategischen Forschungsfelder der Hightech Agenda Deutschland. Darin geht es um mehr Wettbewerbsfähigkeit, mehr Wertschöpfung und mehr Souveränität. Mit unserer Hightech Agenda setzen wir gezielt auf Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz und auf die Hebelwirkung von innovativen Materialien beim Transfer von Forschungsleistung in die Industrie. Dafür braucht es ein enges Miteinander von Forschung und Unternehmen, um den Wirtschafts- und Medizinstandort Deutschland nach vorne zu bringen.

Ein Beispiel: Dank Verfahren wie dem Bioprinting lassen sich schon heute komplexe lebende Gewebestrukturen herstellen, um tierversuchsfreie Testsysteme für neue Medikamente, etwa gegen Krebs, zu entwickeln. Die Zukunftsvision: Künftig könnte geschädigtes Körpergewebe bis hin zu ganzen Organen mithilfe von Bioprinting individuell hergestellt und im Körper ersetzt werden – eine echte Materialinnovation und zugleich ein immenser Fortschritt für die personalisierte Medizin.

Unser großes Ziel ist es, Diagnostika und Therapien so passgenau wie möglich auf die Betroffenen abzustimmen. Dabei sollen auch geschlechts- und altersspezifische Unterschiede stärker in den Blick rücken. Ein Schlüssel dafür liegt in der bioinspirierten und digitalisierten Materialforschung, deren zukünftiges Potenzial für das Bioprinting in dieser Broschüre beleuchtet wird.

Zugleich widmen wir uns im Wissenschaftsjahr 2026 sehr breitenwirksam der „Medizin der Zukunft“. In der Gesundheitsforschung geht es nicht allein um technische



Aspekte, darum ist es mir wichtig, bei der Gestaltung neuer Technologien eine gesellschaftliche Debatte anzuregen, die auch ethische, rechtliche und soziale Aspekte von Anfang an einbezieht. So stärken wir die Rolle der Wissenschaft und im Ergebnis unser aller Gesundheit – das höchste Gut.

Ich wünsche Ihnen eine inspirierende Lektüre.

A handwritten signature in white ink that reads "Dorothee Bär". The signature is fluid and cursive.

Dorothee Bär MdB
Bundesministerin für Forschung,
Technologie und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

1	Materialforschung als Schlüsseltechnologie für Gesundheit und Lebensqualität	2
1.1	Materialinnovationen für die Medizin der Zukunft	2
1.2	Medizinische Anwendungsfelder der Materialforschung.....	5
1.3	Digitale Materialforschung für die Medizintechnik.....	6
2	Bioinspirierte Materialforschung für die Medizin der Zukunft	8
2.1	Bioprinting	10
2.2	Biohybride und lebende Materialsysteme	17
3	Forschungsförderung auf nationaler und europäischer Ebene	20
3.1	Forschungsförderung des BMFTR.....	20
3.2	Schlaglichter aus der institutionellen Forschung.....	24
3.3	Materialforschungsaktivitäten auf europäischer Ebene	30
4	Glossar	31
5	Links	32
6	Literatur	32
	Impressum	33



1 Materialforschung als Schlüsseltechnologie für Gesundheit und Lebensqualität

Innovative Materialien sind das Fundament des technologischen Fortschritts und damit auch für unseren hohen Lebensstandard und unsere Gesundheit. Werkstoffe setzen früh in der Wertschöpfungskette an und ermöglichen durch gezielt eingestellte Eigenschaften neue und verbesserte Produkte in fast allen Branchen und gesellschaftlichen Bedarfsebenen. Ein Großteil aller Produktinnovationen basieren auf neuen Werkstoffeigenschaften. Die Materialforschung liefert essenzielle Beiträge zu den wichtigen strategischen Forschungsfeldern der Hightech Agenda Deutschland und ist damit unverzichtbar für Wettbewerbsfähigkeit und technologische Souveränität in Deutschland und Europa. Das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFT) fördert anwendungsorientierte Materialforschung im Rahmen des Fachprogramms „Materialinnovationen für die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft (Mat2Twin)“. Auch in anderen BMFT-Förderbereichen gibt es wichtige Bezüge zu neuen Materialentwicklungen. Im Kontext medizinischer Anwendungen betrifft dies die Fachprogramme zur Gesundheitsforschung, Medizintechnik und der Zukunft der Wertschöpfung sowie den KI-Aktionsplan der Bundesregierung. Wesentliche Beiträge zur Materialforschung kommen darüber hinaus aus dem Wissenschaftssystem. Neben der universitären Forschung sind hier vor allem die institutionell geförderten Forschungseinrichtungen der Max-Planck-Gesellschaft, der Helmholtz- und Leibniz-Gemeinschaft sowie der Fraunhofer-Gesellschaft zu nennen, die auch ihre leistungsfähigen Forschungsinfrastrukturen einbringen.

Die Europäische Kommission adressiert auf europäischer Ebene die sektorübergreifende Bedeutung fortschrittlicher Materialien (englisch: Advanced Materials, s. **Kasten**) durch einen seit 2024 eingerichteten Technologierat und einen für 2026 geplanten Advanced Materials Act, der unter anderem auf verkürzte Time-to-Market, bessere Zirkularität und beschleunigte Zertifizierungen zielt. Dadurch werden günstige Rahmenbedingungen für Innovation und Wettbewerbsfähigkeit geschaffen und die umfangreichen Aktivitäten der europäischen Forschungsförderung flankiert (s. **Kapitel 3.3**).

Als **Advanced Materials** werden gemäß einer Arbeitsdefinition der OECD [1] gezielt hergestellte Werkstoffe mit folgenden Eigenschaften bezeichnet:

- Neue oder verbesserte funktionelle Eigenschaften und/oder
- Gezielt erzeugte oder verbesserte strukturelle Eigenschaften

1.1 Materialinnovationen für die Medizin der Zukunft

Materialinnovationen spielen aufgrund ihres Querschnittscharakters eine Schlüsselrolle für die Medizin der Zukunft. Fortschrittliche Materialien bilden für medizintechnische und pharmazeutische Anwendungen die unmittelbare Schnittstelle zum Menschen. Von Werkstoffeigenschaften hängt es ab, wie künstliche Implantate in den Organismus eingebunden

werden und die Selbstheilung unterstützen oder wie Wirkstoffe vom Körper aufgenommen und zum Krankheitsherd transportiert werden. Die moderne Materialforschung bedient sich zunehmend biologischer Komponenten und Prinzipien aus dem Baukasten der Natur, um von hochspezifischen und leistungsfähigen Lösungen zu profitieren, die sich in der Evolution herausgebildet haben. So werden beim Bioprinting lebende Zellen mit biogenen oder künstlichen Gerüststoffen verarbeitet, um komplexes Körpergewebe nachzuahmen. Synthetische Materialien werden mit Biomaterialien und lebenden Komponenten zu Biohybridmaterialien bzw. lebenden Materialien kombiniert, um deren Funktionalität zu verbessern und neue Anwendungen zu erschließen.

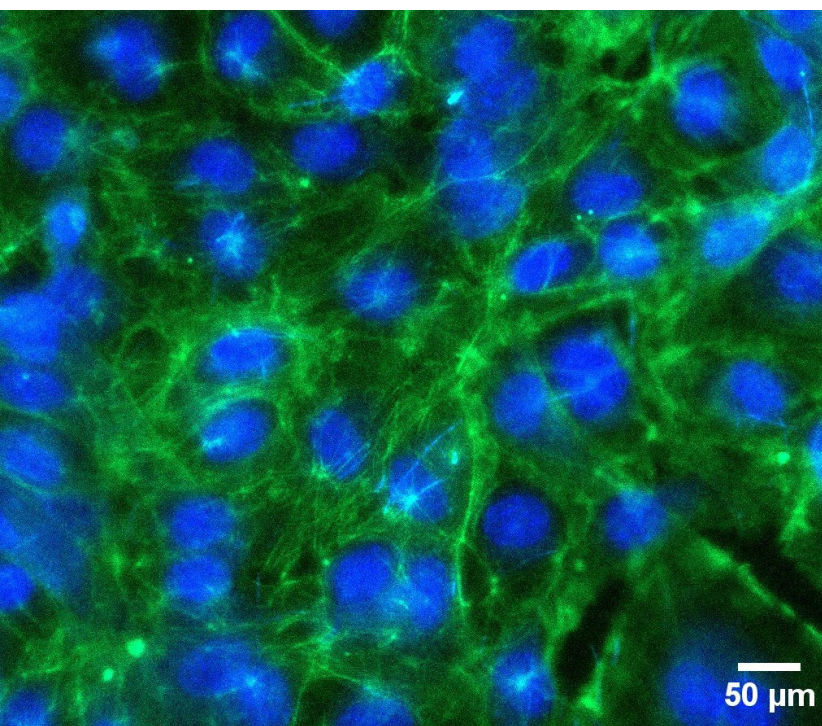
Aus dem Zusammenspiel innovativer Materialplattformen, der Nutzung biologischer Prinzipien und der Digitalisierung resultiert ein enormes Potenzial für eine schnelle und effiziente Entwicklung medizinischer Anwendungen. Ein eindrucksvolles Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit ist die Nutzung der sogenannten RNA-Technologie, die bei der Entwicklung von Impfstoffen während der Corona-Pandemie eingesetzt wurde. Die Zeitspanne von der Sequenzierung des Virusgenoms bis zur Zulassung eines neuartigen RNA-Impfstoffes konnte auf weniger als ein Jahr gesenkt und damit zahlreiche Menschenleben gerettet werden. Das Funktionsprinzip der RNA-Technologie basiert darauf, dass RNA-Moleküle gezielt in Zellen geschleust werden, um entsprechend der codierten

Informationen spezifische Proteine herzustellen. Auf diese Weise lassen sich fast alle biochemischen Prozesse im Körper beeinflussen, z. B. um Krankheiten zu heilen oder Zielstrukturen für das Immunsystem zu generieren. Für den effizienten Transport therapeutischer RNA in die Zellen sind Trägersysteme beispielsweise auf Basis von Lipidnanopartikeln erforderlich. Erst durch die Kombination mit innovativen Materiallösungen können universelle biologische Lebensbausteine wie RNA zur gezielten Steuerung hocheffizienter und spezifischer Lebensprozesse für medizinische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Weitere Anwendungen wie der Einsatz in der Krebstherapie sind in Entwicklung.

Eine Vielzahl weiterer Materialplattformen werden erforscht, bei denen synthetische Materialien mit biologischen Komponenten und Funktionen verknüpft werden. Im Rahmen eines BMFTR geförderten Projekts wurde beispielsweise eine Materialplattform etabliert, bei der Hydrogele mit DNA-Strängen vernetzt werden. Hieraus können Materialien mit schaltbarer Viskoelastizität als dreidimensionale Gerüststrukturen für das Bioprinting hergestellt werden, die eine gezielte Steuerung des Wachstums und der Differenzierung bei der Zell- und Organoidkultur ermöglichen. Ein weiteres Anwendungsfeld ist der sensitive Nachweis von spezifischen Nukleinsäure-Sequenzen ohne vorhergehende Vervielfältigung. Dies bietet Potenziale für kostengünstige Schnelltests und Vor-Ort-Diagnostik zum Nachweis von Krankheitserregern wie Viren (**s. Projektbeispiel proDNAmat, S.18**). An vielen Stellen ebnet die Materialforschung so den Weg für eine individuelle Diagnose und Therapie von Krankheiten.

Trotz der vielversprechenden technologischen Ansätze steht unser Gesundheitssystem künftig vor enormen Herausforderungen. Durch eine alternde Bevölkerung – bis 2035 werden in Deutschland fast ein Drittel aller Bürgerinnen und Bürger ein Alter von

Mikroskopieaufnahme gefärbter Körperzellen



65 Jahren überschritten haben – werden altersbedingte Volkskrankheiten wie Demenz, Krebs oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen weiter zunehmen. Die Folgen des Klimawandels verschärfen die Belastung der Bevölkerung aufgrund von Hitzestress und der vermehrten Ausbreitung von Krankheitserregern. Die Aufnahme von Schadstoffen wie Feinstaub, Mikroplastik und gesundheitsschädlichen Chemikalien über die Atemluft, Trinkwasser und Lebensmittel erhöht das Risiko von Krankheiten wie Allergien oder Autoimmunerkrankungen. Nicht alle Herausforderungen für unser Gesundheitswesen lassen sich allein durch technologische Lösungsansätze meistern. Bei der Gestaltung der Medizin der Zukunft sind auch ethische, rechtliche und soziale Fragestellungen zu betrachten,

beispielsweise wenn künstliche Implantate und Sensoren im menschlichen Körper zur Leistungs-optimierung eingesetzt werden und die Grenzen zwischen Leben und Technik zunehmend verschwimmen. Ebenso sind ein gleichberechtigter Zugang zu modernen medizinischen Technologien, regulatorische Fragestellungen und die Finanzierbarkeit eines gemeinwohlorientierten Gesundheitssystems zu berücksichtigen.

Ethische, rechtliche und soziale Aspekte des Bioprintings

Bioprinting hat das Potenzial, individualisierte Therapien und die regenerative Medizin grundlegend zu verändern. Eine besondere Rolle spielt dabei der Umgang mit hybriden und lebenden Materialien, da beim Bioprinting auch lebende Zellen, teilweise von Patientinnen und Patienten selbst, verdruckt werden können.

Der Einsatz von Bioprinting wird je nach Anwendungsfeld kontrovers diskutiert. Eine zentrale Debatte betrifft das sogenannte Human Enhancement, also die mögliche Verbesserung menschlicher Fähigkeiten durch biotechnologische Eingriffe. Denkbar wären beispielsweise gedruckte Organe mit erhöhter Widerstandsfähigkeit. Auch wenn solche Anwendungen derzeit nur in Zukunftsszenarien diskutiert werden, werfen sie grundlegende Fragen nach den gesellschaftlichen Grenzen technischer Eingriffe in den menschlichen Körper sowie nach möglichen neuen Formen sozialer Ungleichheit auf.

Darüber hinaus ergeben sich rechtliche und regulatorische Herausforderungen. Bioprinting-Produkte können je nach Anwendung als Arzneimittel für neuartige Therapien oder als Medizinprodukte eingestuft werden. Gleichzeitig sind bestehende Zulassungsverfahren häufig auf standardisierte Massenprodukte ausgerichtet und lassen sich nur begrenzt auf individualisierte, patientenspezifische Lösungen übertragen.

Weitere offene Fragen betreffen das Patentrecht, die Produkthaftung sowie den Datenschutz. So ist beispielsweise nicht abschließend geklärt, wem ein gedrucktes Organ rechtlich zugeordnet werden kann oder wer im Falle von Fehlfunktionen oder unerwarteten medizinischen Komplikationen verantwortlich ist. Darüber hinaus werden bei der Herstellung patientenspezifischer Gewebe sensible medizinische Daten verarbeitet, was besondere Anforderungen an den Prozess stellt.

Bioprinting gilt als Zukunftstechnologie, die zunehmend den Übergang von der Forschung in klinische Anwendungen vollzieht. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, Gestaltungsoptionen zur Schaffung verlässlicher regulatorischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen frühzeitig in Innovationsprozesse zu integrieren. Auf diese Weise kann die Technologieentwicklung sicher, transparent und gesellschaftlich verantwortungsvoll gestaltet werden.

Institut für Innovation und Technik

Weitere Informationen: iit-berlin.de/publikation/bioprinting-fuer-medizinische-anwendungen

1.2 Medizinische Anwendungsfelder der Materialforschung

Im Rahmen der Materialforschung des BMFTR werden eine Vielzahl von Projekten gefördert, um die Potenziale von Materialinnovationen für die Medizin der Zukunft zu nutzen und die wachsenden Herausforderungen im Gesundheitswesen zu adressieren.

Eine Übersicht zu medizinischen Anwendungsfeldern und Beispielen aus aktuell geförderten Projekten verschiedener Maßnahmen ist in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

Anwendungsfeld	Beispiele innovativer Materialforschungsansätze für die Medizintechnik	Projektbeispiele*
Implantate	<ul style="list-style-type: none"> Multifunktionale Beschichtungen erhöhen die Verschleißfestigkeit und Lebensdauer künstlicher Gelenke, unterdrücken Infektionen oder unterstützen das Einwachsen in den Knochen. Additiv gefertigte poröse Werkstoffstrukturen, beispielsweise aus Polymeren oder Magnesium, optimieren die Biokompatibilität von Knochenersatzimplantaten oder können geschädigtes Knorpelgewebe ersetzen. Elastische und blutverträgliche Polymerfasern erhöhen die Lebensdauer textiler Blutgefäßimplantate (Stents). 	<ul style="list-style-type: none"> SELF-X-FOR-IMPLANTS OSTEO-FUNK CarboMod TeXlastins
Wirkstofftransport/-freisetzung	<ul style="list-style-type: none"> Funktionalisierte Polymerhüllen transportieren größere Wirkstoffmoleküle selektiv zu Krankheitsherden (z. B. Tumorzellen). Bioinspirierte Polymerdepots geben im Organismus Wirkstoffe kontrolliert über einen verlängerten Zeitraum ab. DNA-funktionalisierte Polymere dienen als temperaturschaltbare Transportcontainer, die Wirkstoffe gezielt in Tumorzellen freisetzen. 	<ul style="list-style-type: none"> TransFunk Billiard BioTherNa
Zell- und Organoidkultur/Biodruck	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogel-basierte Biotinten mit mikroverkapselten Wirkstoffen oder integrierten Mikrofasern ermöglichen ein kontrolliertes und gerichtetes Zellwachstum in 3D-gedruckten Gewebestrukturen. Mit sichtbarem Licht vernetzbare Biotinten können direkt am Patienten verdruckt werden, um Gewebeschäden zu heilen. Polymerkapseln setzen bioaktive Substanzen kontrolliert frei, um Zellen gezielt zu vermehren und zu differenzieren. Funktionalisierte Polymere werden als widerstandsbasierte Temperatursensoren in Zellkulturgefäße integriert, um Stoffwechselaktivitäten zu untersuchen. 	<ul style="list-style-type: none"> HEAL-X Bioink BlindZero CRiPS Fiber4Ink T-Sense-3D
Diagnostische Schnelltests	<ul style="list-style-type: none"> Programmierbare DNA-vernetzte Hydrogele ermöglichen die Auftrennung, Isolierung und Markierung von DNA und RNA aus biologischen Proben für Schnelltests und Diagnoseverfahren. 	<ul style="list-style-type: none"> proDNAMat
Gesundheitsüberwachung	<ul style="list-style-type: none"> 3D-gedruckte bioelektronische Arraysysteme auf Polymersubstraten ermöglichen als elektronische Schnittstelle zum Körpergewebe die Messung von Gehirnströmen. 	<ul style="list-style-type: none"> 3DBioEI
Körperliche Hilfsmittel	<ul style="list-style-type: none"> 3D-gedruckte Ohrpaspstücke (Otoplastiken) mit funktionaler Oberflächenstrukturierung sorgen für eine optimierte Haftung und Flüssigkeitsabweisung beispielsweise bei individuell angepasstem Gehörschutz. 	<ul style="list-style-type: none"> SkinJob
Hygiene und Desinfektion	<ul style="list-style-type: none"> Polymermodifizierte Phosphorderivate werden zur Desinfektion bei In-vivo-Anwendungen und für Oberflächenbeschichtungen von medizinischem Equipment (Filter, Masken, Instrumente) erforscht. 	<ul style="list-style-type: none"> PathoBlock

* Informationen zu den geförderten Projekten finden sich in der Tabelle auf den Seiten 22 bis 23.



1.3 Digitale Materialforschung für die Medizintechnik

Der Einsatz digitaler Methoden wie Modellierung, Simulation und maschinelles Lernen gewinnt in der medizinischen Forschung zunehmend an Bedeutung. Beispiele sind die Früherkennung von Krankheiten anhand der KI-gestützten Analyse von Daten aus bildgebenden Verfahren oder die beschleunigte Wirkstoffentwicklung auf Basis leistungsfähiger Simulations- und Modellierungstools, die biologische Wirkungen von Molekülen und Materialien immer präziser vorhersagen können. Indem biologische Wirksamkeit und Nebenwirkungen individuell für Patientinnen und Patienten berücksichtigt und geschlechts- und altersspezifisch optimiert werden, können Gesundheitsbelastungen abgemildert und die Lebensqualität erhöht werden. Hieraus ergeben sich auch Potenziale für Kosteneinsparungen im Gesundheitswesen und für die Erforschung von Medikamenten für seltene Erkrankungen, deren Entwicklung bei konventioneller Vorgehensweise oftmals nicht wirtschaftlich ist.

Das Konzept der Digitalisierung der Materialforschung geht aber weit darüber hinaus. Im Rahmen der BMFTR-Förderinitiative MaterialDigital sind für viele Materialklassen Ontologien ([s. Glossar](#)) und Standards in Bezug auf die Erhebung und den Umgang mit Forschungsdaten nach FAIR-Prinzipien ([s. Glossar](#)) weiterentwickelt worden, die der Forschungscommunity über die Plattform MaterialDigital (PMD) zur Verfügung stehen. Anknüpfungspunkte zur Biologie und Anwendungen in den Lebenswissenschaften gab es im Rahmen der bisherigen Forschung allerdings wenig. Auf Initiative des BMFTR soll sich das künftig ändern und die Konzepte der digitalen Materialforschung auch für medizinische Anwendungen nutzbar gemacht werden. Die Grundlagen für die Einbindung der bioinspirierten Materialforschung in die Plattform MaterialDigital werden derzeit im Rahmen des Begleitprojektes MVD erarbeitet ([s. Kasten S. 7](#)).

Digitalisierte Materialforschung für die Medizin der Zukunft: Das Begleitprojekt MaterialVital-Digital (MVD)

Das Ziel von MVD ist es, die Forschung zu Engineered Living Materials (ELM) und biohybriden Materialien durch Einführung und Entwicklung semantischer Standards, elektronischer Laborbücher und die Anbindung an Bioinformatik-Plattformen wie Galaxy oder Datenrepositorien (z. B. CKAN) unter Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur der Plattform MaterialDigital zu unterstützen.

Durch die Digitalisierung der gesamten Forschungs- und Entwicklungskette können wertvolle Daten mehrfach genutzt und innovative Produktentwicklungsprozesse beschleunigt werden. Damit dies gelingt, setzt MVD auf eine enge Begleitung der Forschungsprozesse und die Entwicklung gemeinsamer Datenstandards. So wird sichergestellt, dass Daten aus unterschiedlichen Disziplinen verständlich, auffindbar und wiederverwendbar sind (FAIR-Prinzipien).

In einem ersten Schritt werden mithilfe von drei Anwendungsszenarien erste Ansätze der digitalen Infrastruktur für die Zielgruppe entwickelt. Diese

werden dann im folgenden Verlauf anhand der wissenschaftlichen Projekte der MaterialVital-Initiative erprobt und verbessert. Damit die Tools und Workflows auch genutzt werden, ist die niederschwellige Bedienbarkeit durch Forschende verschiedener Fachrichtungen von großer Bedeutung. Um dies zu unterstützen, wird außerdem ein großes Augenmerk auf Schulung und Verbreitung der Lösungen gelegt.

An dem Projekt beteiligt sind das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM (Projektkoordination, Ontologieentwicklung, Durchführung von Datenanalysen, Erstellung von Anwendungsleitfäden, Bereitstellung von Infrastruktur), das Leibniz-Institut für Neue Materialien INM (Bereitstellung von spezifischen Anwendungsfällen und Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen) sowie die Universität Freiburg (Betreiberin der deutschen Galaxy-Plattform, Omics-Datenanalyse, Entwicklung von Prozessabläufen).

Begleitprojekt: MaterialVital-Digital (MVD)
(FKZ: 13XPM513A-C)

Versuchsaufbau Roboter-unterstützter 3D-Druck





2 Bioinspirierte Materialforschung für die Medizin der Zukunft

Der gesellschaftliche und technologische Wandel macht auch vor der Materialforschung nicht halt. Mit den sich ändernden Anforderungen steigt auch die zu beherrschende Komplexität in der Material- und Werkstoffforschung, was zwangsläufig dazu führt, dass wir unser Repertoire an Inspirationsquellen erweitern müssen. Eine dieser Inspirationsquellen, die wir dank neuer wissenschaftlicher Untersuchungen und Verfahren zunehmend besser verstehen, ist die belebte Natur. So verfügen lebende Organismen über die Fähigkeit, ihren Aufwand an Energie und Ressourcen zu reduzieren, intelligente Strategien der Informationsverarbeitung und des Recyclings zu entwickeln sowie Stoffwechselreaktionen auf engstem Raum optimal und zeitlich koordiniert ablaufen zu lassen. Unser zunehmendes Verständnis von Aufbau und Funktion natürlicher Materialien sowie biologische Prozesse und Prinzipien eröffnet uns unter dem Schlagwort „Biologisierung der Technik“ neue Perspektiven für

innovative technische Lösungen. Bereits heute profitiert die Technik von der Natur. Zum Beispiel durch die Nutzung biogener Ausgangsmaterialien wie Biopolymere oder durch das Nachahmen von biologischen Materialstrukturen und Bauplänen im Kontext des Forschungsfeldes der Bionik. Das Ziel der „Biologisierung“ der Materialforschung geht weit darüber hinaus. Hier geht es darum, die in biologischen Systemen vorkommenden Prozesse und Prinzipien zu verstehen, sie für technische Anwendungen nutzbar zu machen und aus ihnen neue Eigenschaften für technische Materialien sowie die darauf basierenden Produkte nach dem Prinzip der Bioinspiration – teils in abstrahierter Form – abzuleiten. Für den Bereich „Gesundheit und Lebensqualität“ ist die Biologisierung einer der wichtigsten Innovationstreiber. Aktuelle Forschungsaktivitäten adressieren hierbei den Einsatz biohybrider und lebender Materialien.

BioTrans – Transfer bioinspirierter Materialinnovationen in die Medizin der Zukunft

Bioinspirierte Materialien eröffnen besondere Perspektiven für die Medizin, weil sie Funktionen bereitstellen können, die im Körper etabliert sind. Sie reichen von selbstheilenden Implantat-Oberflächen über antimikrobielle Beschichtungen bis hin zu biohybriden Materialien für die regenerative Therapie. Solche Innovationen können Heilungsprozesse unterstützen, Komplikationen reduzieren und die Lebensqualität von Patientinnen und Patienten nachhaltig verbessern.

In der BMFTR-Fördermaßnahme „Biologisierung der Technik: Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“ wird dieses Spektrum in konkreten Verbundprojekten sichtbar. CarBoMD entwickelt additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate zur Behandlung von Arthrose. HEAL-X Bioink arbeitet an selbstheilenden Hydrogelen für das 3D-Bioprinting, um funktionale Strukturen für zellkompatible Umgebungen beim 3D-Druck von Gewebe oder schließlich auch Organen zu drucken. OSTEOFUNK adressiert den thermoplastischen Kunststoff PEEK (Polyetheretherketon) als polymerbasierte Alternative zu Titanimplantaten und nähert das Material dem biologischen Vorbild Knochen an. BILLARD entwickelt ein bioinspiriertes, polymerbasiertes Depot, das die Wirksamkeit von Medikamenten gegen Netzhaut-

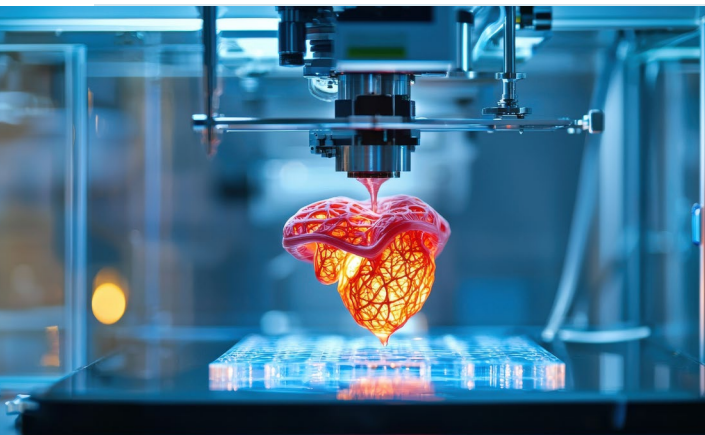
Gefäßerkrankungen verlängert und belastende Injektionsintervalle reduzieren könnte. SELF-X-FOR-IMPLANTS überträgt die Wasserschmierung aus natürlichem Knorpel auf maßgeschneiderte Implantat-Beschichtungen mit Selbstheilungs-Potenzial, um Entzündungen durch Partikelabrieb zu vermindern.

Damit diese Entwicklungen den Weg aus der Forschung in die klinische Anwendung finden, braucht es auch gezielte Vernetzung, Koordination und Transferstrukturen. Hier setzt das Begleit- und Transferprojekt BioTrans an, das die geförderten Verbundprojekte systematisch untereinander sowie mit der Industrie, regulatorischen Expertinnen und Experten, dem wissenschaftlichen Nachwuchs und internationalen Kompetenzzentren vernetzt. Ziel ist es, Synergien zu heben, neue Forschungsimpulse zu identifizieren und dabei zu unterstützen, dass die Biologisierung der Technik durch bioinspirierte Materialinnovationen wirksam zur Medizin der Zukunft beiträgt.

Begleitprojekt: Wissens- und Technologietransfer bioinspirierter Lösungsansätze in Industrie und Gesellschaft (BioTrans), FKZ 13XP5205A-C
Weitere Informationen: biologisierung-der-technik.de

UV-Vernetzung einer Hydrogelstruktur





Die Vision: Organe aus dem Drucker

Mehr als 8.000 Patientinnen und Patienten warten allein in Deutschland auf eine Organspende. Für viele kommt die Hilfe zu spät. Statistisch sterben in unserem Land pro Tag drei Menschen, weil kein Spenderorgan für eine lebensrettende Operation zur Verfügung steht. Künftig könnte sich das Problem angesichts der demografischen Entwicklung und einer stagnierenden Organspende-

bereitschaft noch verschärfen. Hoffnungen liegen neben Fortschritten bei der Xenotransplantation, d. h. der Übertragung von Gewebe und Organen tierischen Ursprungs, vor allem auf dem Bioprinting. Eine damit verbundene Vision ist es, künftig komplette funktionierende künstliche Organe zu erzeugen, die für Transplantationen am Menschen genutzt werden können. Auch wenn 3D-gedruckte Organteile wie Haut oder Knorpel teilweise schon erfolgreich klinisch eingesetzt werden, ist dieses Ziel mit den derzeit zur Verfügung stehenden Materialien und Methoden noch weit entfernt. Den vollständigen Aufbau und das komplexe Zusammenspiel ausdifferenzierter Zelltypen und -strukturen von Organen nachzustellen und längerfristig am Leben zu halten, gelingt mit dem Bioprinting erst ansatzweise. Für weitere Fortschritte sind noch grundlegende technische Herausforderungen in Bereichen der Materialforschung und Prozesstechnik zu lösen. Ebenso müssen die Kenntnisse hinsichtlich der Abläufe und der Steuerung zellbiologischer Prozesse erweitert werden. Belastbare Prognosen, wann künstliche Organe aus dem Drucker verfügbar sein werden, gibt es derzeit noch nicht.

2.1 Bioprinting

Beim Bioprinting werden lebende Zellen zusammen mit gerüstbildenden Hilfsstoffen zu größeren Gewebestrukturen dreidimensional verdruckt. Seit den Anfängen vor rund 20 Jahren hat sich das Forschungsfeld dynamisch entwickelt und die Zahl an wissenschaftlichen Publikationen und Patenten ist in den letzten Jahren stark angestiegen. Die mittels Bioprinting erzeugten Gewebestrukturen werden zunehmend komplexer und funktionaler. Auch wenn es noch ein langer Weg zur Entwicklung künstlicher Organe ist, hat das Bioprinting bereits heute eine große Bedeutung für die medizinische Forschung [2]. Dies betrifft vor allem den Einsatz von Gewebe- und Organmodellen, die Potenziale bieten, um Tierversuche bei der pharmazeutischen Wirkstoffforschung und für die Medikamentenzulassung zu reduzieren oder teilweise zu ersetzen. Tierversuche sind teuer und wegen ethischer Bedenken umstritten, aber aufgrund der Medizingesetzgebung bislang international im Zuge der Medikamentenzulassung zwingend erforderlich. Diese gesetzliche Vorgabe wurde Anfang 2023 durch die US-Arzneimittelbehörde FDA (Food and Drug Administration) aufgeweicht, indem allgemein auf nicht

klinische Tests verwiesen wird, die neben Tierversuchen auch In-vitro-Versuche und virtuelle Tests umfassen. Fachleute sind sich einig, dass sich dadurch kurzfristig nichts an der Praxis im Zulassungsverfahren ändern wird, aber ein starker Anreiz für die Entwicklung alternativer Verfahren wie „Organ-Chips“ und künstliche Testgewebe gesetzt wird.

Die internationale Forschungslandschaft im Bioprinting wird derzeit von China und den USA mit den meisten aktiven Instituten, wissenschaftlichen Publikationen und Patenten angeführt [3]. Auch in Deutschland wächst das Interesse am Bioprinting. Relevante Forschungsaktivitäten finden sich im außeruniversitären Bereich, wie dem Karlsruher Institut für Technologie, dem Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik, den Leibniz-Instituten für Interaktive Materialien und für Neue Materialien oder dem Max-Planck-Institut für medizinische Forschung. In der universitären Forschung sind beispielsweise das Naturwissenschaftliche und Medizinische Institut in Reutlingen, die Universitäten in Heidelberg, Erlangen-Nürnberg und Würzburg sowie die technischen Universitäten in Aachen, Darmstadt und Dresden zu nennen. Seit einigen Jahren schlägt das BMFTR mit



Nahaufnahme 3D gedruckter Hydrogele. Die Hydrogele können in herkömmlichen Zellkulturgefäßen gelagert und kultiviert werden.

ersten Pilotprojekten zum Bioprinting die Brücke zur kommerziellen Nutzung und konkreten medizintechnischen Anwendungen. Die Industrie engagiert sich zunehmend im Bioprinting, was sich in Forschungs-kooperationen großer Konzerne sowie dem Entstehen einer Start-up-Szene zeigt (s. [Abschnitt Kommerzialisierung ab S. 14](#)).

Materialien und Druckverfahren

Grundlage für das Bioprinting sind verdruckbare Materialien, sogenannte Biotinten, die neben vernetzbaren Ausgangsubstanzen zur Ausbildung einer Gerüststruktur auch lebende Zellen und weitere Hilfsstoffe beinhalten. Als gerüstbildende Polymere werden vor allem sogenannte Hydrogele eingesetzt, die selbst wasserunlöslich sind, aber einen hohen Wasseranteil binden können und entsprechend quellfähig sind. Im Bioprinting eingesetzte Hydrogele können natürlichen oder synthetischen Ursprungs sein. Natürliche Hydrogele wie Kollagen, Gelatine, Chitosan oder Alginat, die aus tierischen und pflanzlichen Zellen gewonnen werden, zeichnen sich durch eine gute Biokompatibilität und Ähnlichkeit mit der natürlichen extrazellulären Matrix aus, sind aber mechanisch wenig stabil und können Probleme hinsichtlich Reproduzierbarkeit, Sterilität und Immunreaktionen verursachen. Synthetische Hydrogele wie Polyethylenglykol oder Polylactide lassen sich gezielt und reproduzierbar hinsichtlich der gewünschten mechanischen Eigenschaften einstellen, sind aber in der Regel eingeschränkt in der Biokompatibilität und weniger gut für die Zellkultur geeignet. Zur Optimierung der Eigenschaften werden oftmals natürliche und synthetische Bestandteile zu hybriden Hydrogelen kombiniert. Die im Druckprozess eingesetzten flüssigen Biotinten werden nach dem Druck durch

Vernetzungsreaktionen zu Gerüststrukturen stabilisiert, von den Zellen besiedelt und zur Bildung ausdifferenzierter biologischer Gewebe weiter kultiviert.

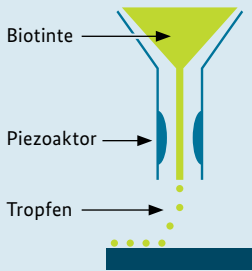
Hinsichtlich der Verarbeitung sind auf dem Markt eine Reihe von 3D-Drucktechnologien erhältlich, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien basieren und sich in den erzielbaren Eigenschaften unterscheiden. Den größten Anteil haben hierbei der sogenannte Extrusions- und Inkjetdruck, bei dem die Materialien als viskoser Flüssigkeitsstrang oder als Tröpfchen verdruckt werden. Ebenfalls relevant sind laserbasierte Verfahren, bei denen Laser für die Positionierung von Zellen bzw. für die Aushärtung von Gewebestrukturen genutzt werden. Letztere eignen sich aufgrund der hohen räumlichen Auflösung für den Druck besonders für feine und komplexe Gewebe- und Gefäßstrukturen.



Montage eines Mikroextrusionsdruckers

Überblick zu marktgängigen Bioprintverfahren

INKJET

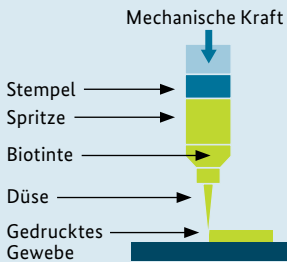


Prinzip
 Biotinten werden als winzige Tintentropfen nach dem Prinzip eines herkömmlichen Tintenstrahldruckers schichtweise über mehrere Druckköpfe auf ein Substrat aufgetragen.

- Vorteile**
- + Gute Skalierbarkeit durch gleichzeitiges Verdrucken verschiedener Materialien mit mehreren Druckköpfen
 - + Hohe Materialeffizienz
 - + Schnell und kostengünstig
- Nachteile**
- Auflösung begrenzt (ab ca. 50 µm, abhängig vom Düsendurchmesser)
 - Reduzierte Zellüberlebensrate durch Druck- und Scherkräfte (abhängig vom Düsendurchmesser)
 - Nur Biotinten mit geringer Viskosität und Zelldichte

Anwendung
 Einfache Gewebemodelle für Zell- und Pharmaforschung

EXTRUSION

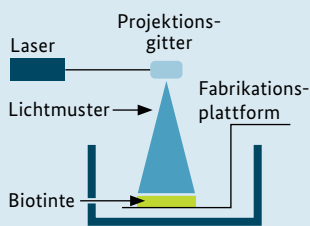


Prinzip
 Biotinten werden durch die mechanische Kraft eines Spritzenstempels als Materialstrang über mehrere Düsen schichtweise auf ein Substrat aufgetragen.

- Vorteile**
- + Einfache Druckmethode
 - + Vielseitigkeit bei den druckbaren Materialien (hohe Viskosität und Zelldichte)
 - + Skalierbarkeit durch mehrere Düsen.
- Nachteile**
- Begrenzte Auflösung (ca. 100 µm)
 - Ausschließlich viskose Flüssigkeiten druckbar
 - Relativ langsam

Anwendung
 Einfache Gewebemodelle für Zell- und Pharmaforschung

STEREOLITHOGRAPHIE

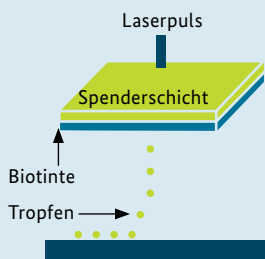


Prinzip
 Ein biokompatibles Harz wird mit Zellen und photosensitiven Vernetzungsmolekülen gemischt und in eine Druckplattform gegossen. Durch UV-Lichtbestrahlung erfolgt die Vernetzung. Der Gewebeaufbau erfolgt Schicht für Schicht.

- Vorteile**
- + Hohe Druckgenauigkeit und Auflösung
 - + Hohe Zelldichte
 - + Keine Einschränkung bzgl. Viskosität
- Nachteile**
- Mögliche Zellschädigung durch UV-Härtung in Abhängigkeit von Wellenlänge
 - Kein paralleler Druck mehrerer Zellarten

Anwendung
 Komplexe Gerüststrukturen mit Kanälen

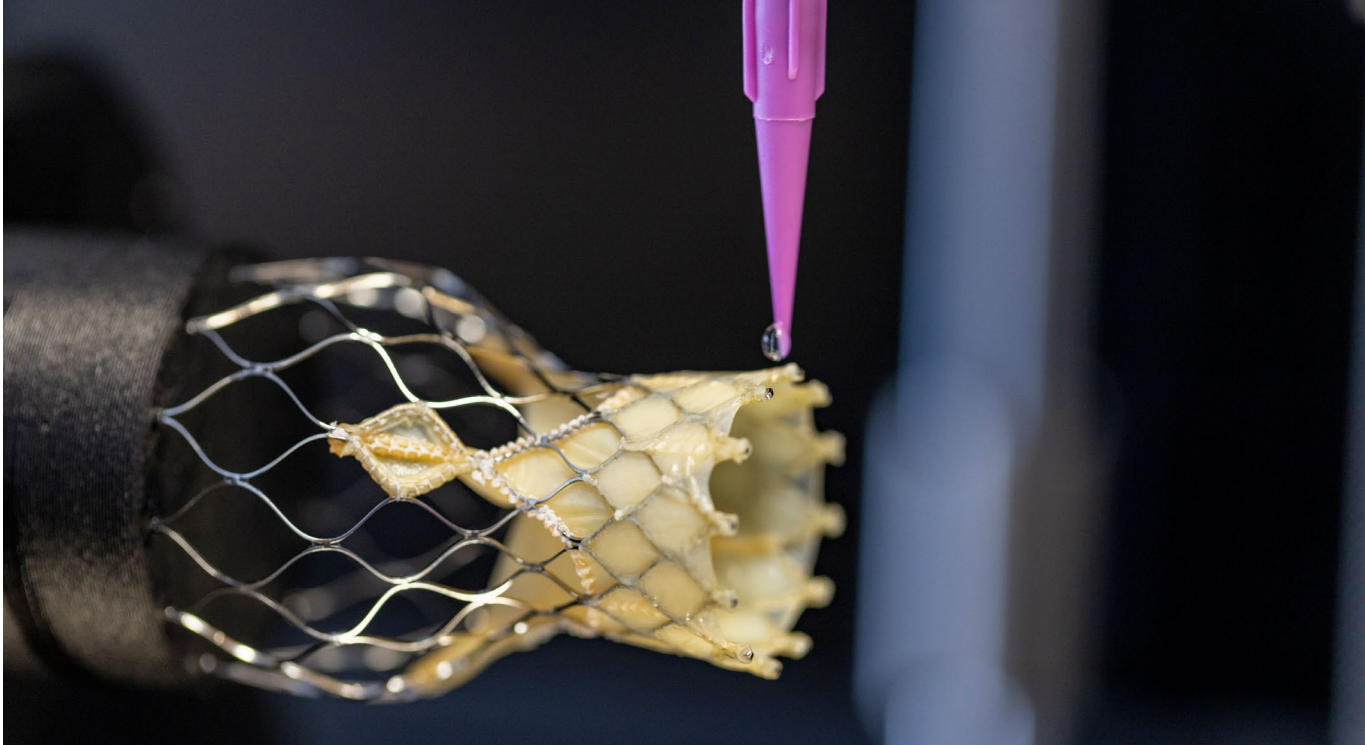
LASERUNTERSTÜTZTES BIOPRINTING



Prinzip
 Mittels Laser wird eine Absorptionsschicht eines zellbeladenen Hydrogels erhitzt. Zwischen der Hydrogelschicht und der vom Laser getroffenen Schichtstelle bildet sich eine Gasblase, die einen Teil des Hydrogels auf einen Substrathalter „druckt“.

- Vorteile**
- + Hohe Druckgenauigkeit/Auflösung
 - + Druck von flüssigen und festen Materialien
 - + Hohe Zelldichte/Überlebensrate der Zellen
 - + Mehrere Arten von Zellen verdruckbar
- Nachteile**
- Hohe Kosten
 - Ggf. thermische Schädigungen durch Laserpulse

Anwendung
 Präzise Zelldeponierung



Mikroextrusionsdruck auf ein rotierendes Gefäßimplantat

Anwendungen und Potenziale

Ein großer Teil aktueller Studien befasst sich mit der Herstellung spezifischer Gewebe wie Knochen, Knorpel, Haut oder anderer Organe. Erste klinische Anwendungsfälle wie die Transplantation einer 3D-gedruckten Ohrmuschel aus patienteneigenen Zellen oder der Ersatz von Gewebe einer Luftröhre sind bereits umgesetzt. Das Hauptanwendungsfeld des Bioprintings liegt aber in der Herstellung von Zell- und Organoidmodellen zur Aufklärung von Krankheitsmechanismen und dem Wirkstoffscreening. Hierbei werden geeignete Gewebemodelle gedruckt, um spezifische Wirkstoffe und neue Behandlungsmethoden beispielsweise zur Krebstherapie

zu testen. Diese dienen als In-vitro-Testsysteme für Medikamentenkandidaten, um deren Wirksamkeit und Toxizität zu prüfen, bevor sie am Menschen getestet werden. So können Wirkstoffe schneller und kostengünstiger auf ihre Eignung und mögliche Nebenwirkungen geprüft werden, was den Entwicklungsprozess bis zur klinischen Prüfung beschleunigt. Darüber hinaus bieten sich durch den Druck patienteneigener Zellgewebe Potenziale für individualisierte Therapieformen. Die Wirksamkeit und Verträglichkeit von Medikamenten bei betroffenen Patientinnen und Patienten kann vorab – anhand körpereigener Zellmodelle – getestet werden. Auch außerhalb

Erfolgsbeispiel aus der Forschungsförderung: BMFTR-Projekt legt Basis für die Standardisierung im Bioprinting

Der Einsatz des 3D-Drucks ist aktuell einer der am schnellsten wachsenden Bereiche in der biomedizinischen Wissenschaft, in denen Fachleute aus den Ingenieur- und Naturwissenschaften sowie aus der klinischen Forschung zur Zukunft der Gesundheitsversorgung beitragen. Das interdisziplinäre Forschungsfeld steckt in vielerlei Hinsicht noch in den Kinderschuhen. Normung und Standardisierung sind unerlässlich, um die kommerzielle Umsetzung und medizintechnische Zulassung biogedruckter Produkte voranzutreiben. Die Basis hierfür wurde durch das BMFTR-Förderprojekt SOP_Bioprint gelegt, aus dem im Jahr 2021 der VDI-Richtlinienausschuss 5708 zum Bioprinting mit dem Ziel gegründet wurde, den Bedarf an Standardprüfmethoden und Qualitätskontrollen zu benennen und notwendige Standards zu definieren. In der Gremienarbeit wird die Anwendung des Druckprodukts – Strukturen, die der

regenerativen Medizin, der Bereitstellung von Testsystemen für die pharmazeutische Industrie sowie für grundlegende zellbiologische Studien (z. B. Krankheitsmodelle) dienen können – stets berücksichtigt. Der Richtlinienausschuss ist hierfür bewusst anwendungsorientiert ausgerichtet. So decken die interdisziplinär zusammengesetzten Mitglieder die Wertschöpfungskette von Forschungseinrichtungen und Herstellern bis zu Anwendern und einer Prüfgesellschaft ab. Im Fokus der ersten 2025 veröffentlichten Richtlinie des VDI-Richtlinienausschusses 5708 stehen die verschiedenen Druckphasen, inklusive Biotinten-Formulierung, Qualifizierung des Drucksystems, Prozessdurchführung und -kontrolle sowie die unmittelbar anschließende Produktcharakterisierung, von der Geometrie bis zu biologischen Aspekten [4]. Eine darauf aufbauende international gültige ISO-Richtlinie ist derzeit in Arbeit.

medizinischer Anwendungen bietet das Bioprinting Einsatzpotenziale, wie in der Lebensmittelindustrie beispielsweise zur Erzeugung von künstlichem Fleisch oder in der Biotechnologie bei der Herstellung biohybrider Sensoren oder Systeme.

Forschungstrends

Zu den aktuellen Herausforderungen des Bioprinting zählt es, die verdruckten Zellen über den für die Reifung und Ausdifferenzierung erforderlichen Zeitraum mit Nährstoffen zu versorgen und am Leben zu erhalten. Hierzu wird an Faserstrukturen geforscht, die in die Zellmatrix eingebunden werden und die Funktion von Blutgefäßen zur Nährstoffversorgung von Geweben übernehmen können. Weitere Forschungsansätze adressieren das gleichzeitige Drucken mehrerer Zelltypen und Materialien, die Erzeugung von Hinterschneidungen und Hohlkörpern sowie die Erhöhung der Robustheit und Präzision des Druckprozesses. Ein aktueller Trend ist der sogenannte 4D-Druck, bei dem die Zeit als vierte Dimension für die gezielte zeitliche und räumliche Reifung der gedruckten Gewebe genutzt wird. Dies gelingt, indem zusätzliche Wachstums- und Differenzierungsfaktoren für die Zellen mit hoher Ortsauflösung verdrukt werden. Mit diesen Forschungsansätzen versucht man zunehmend komplexere Zell- und Organoidmodelle zu generieren, um die Funktion natürlicher Gewebe und Organe besser nachahmen zu können.

Black Drop Biodrucker GmbH

Medikamententestung, Entwicklung von Organoiden und Implantaten oder Smart Food – das sind nur einige Themen, mit denen sich das Team von Black Drop tagtäglich beschäftigt. Black Drop ist ein im Jahr 2017 gegründetes Start-up, das sich auf die Erforschung neuer 3D-Biodruckprozesse und Biotinten spezialisiert hat. Das Unternehmen bietet sowohl kundenspezifische Hard- und Softwarelösungen als auch die zugehörigen Biotinten an. In einem interdisziplinären Team arbeiten Fachleute aus dem Ingenieurwesen, der Biochemie, Medizin und Softwareentwicklung an neuen 3D-Biodrucktechnologien. Im Rahmen von nationalen und internationalen Forschungsprojekten ist Black Drop außerdem an der Entwicklung neuer Therapiemöglichkeiten für die Regenerative Medizin beteiligt.

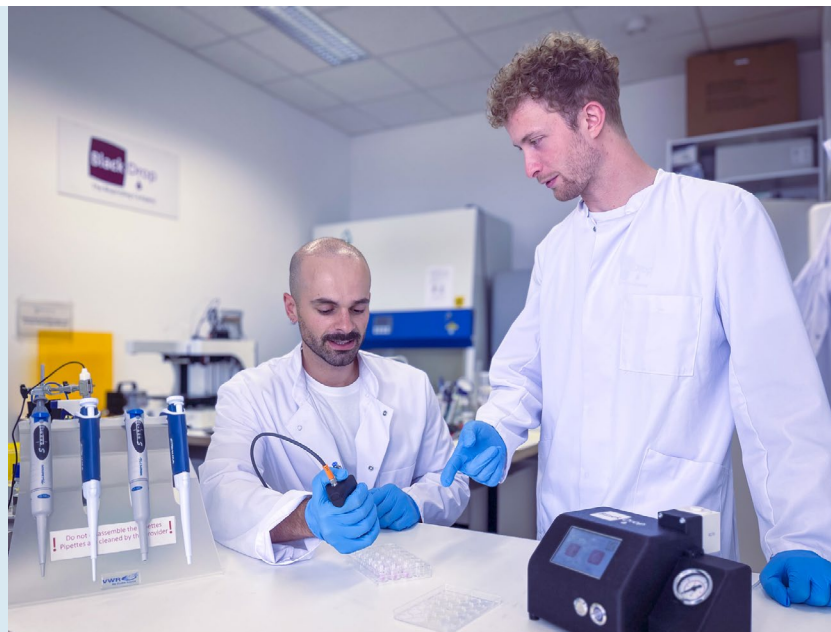
Kommerzialisierung

Seit den 2010er Jahren haben die ersten Kommerzialisierungsaktivitäten im Bioprinting mit der Ausgründung von Start-ups und der Verfügbarkeit von geeigneten Druckern und Materialien eingesetzt. Für 2025 wurde das weltweite Marktpotenzial bereits auf 1,7 Milliarden US-Dollar geschätzt – mit jährlichen Wachstumsraten von rund 20% bis 2033 [5]. In einer Marktanalyse wurden 2024 weltweit 135 aktive Unternehmen im Bioprinting identifiziert, davon neun Start-ups in Deutschland [6]. Die meisten Bioprinting-Unternehmen sind in den USA angesiedelt, gefolgt von Europa. Angesichts des deutlichen zahlenmäßigen Übergewichtes bei Publikationen und Patentanmeldungen ist zu erwarten, dass für die weitere Entwicklung des Technologiefeldes Akteure aus Asien, vor allem aus China, eine führende Rolle einnehmen werden. Die Geschäftsmodelle der Unternehmen basieren überwiegend auf dem Verkauf von Bioprintern und Biotinten und teilweise auf dem Vertrieb spezifischer Forschungsdienstleistungen wie der Herstellung bestimmter Gewebe, Gerüststrukturen oder Beratung.

Start-ups im Porträt

Bei der Entwicklung hochinnovativer Forschungsfelder wie dem Bioprinting spielen Unternehmensausgründungen eine wichtige Rolle. Im Folgenden werden zwei Bioprinting-Start-ups, die sich im Rahmen der Forschungsförderung des BMFTR engagieren, in Kurzportraits vorgestellt.

Handgeführter Drop-on-Demand Biodruckprozess zur Herstellung lebender 3D-Gewebemodelle



Interview mit Jannik Stadler, Standortleiter Black Drop Biodrucker GmbH

Für die Medizin der Zukunft werden weltweit große Erwartungen an das Bioprinting gestellt. Wie ist aus Ihrer Sicht der Stand der Technologie aktuell im Hinblick auf die Forschung und die Kommerzialisierung?

Geforscht wird aktuell mehr denn je! Gerade erst sind in den USA neue Programme mit höchst ambitionierten Zielen auf den Weg gebracht worden: An ausgewählten Spitzenuniversitäten werden mehr als 170 Millionen Dollar in die Züchtung biogedruckter Organ-Komponenten (u. a. Herz, Leber, Niere) investiert [7]. Aus dem Grunde begrüßen wir es sehr, dass Europa und Deutschland mit gezielten Programmen dagegenhalten. Die Förderprogramme des BMFTR sind hierbei besonders wichtig, da sie Industrie und Grundlagenforschung zusammenbringen. Neben dem ambitionierten Ziel der gedruckten Organe, rückt das Feld der In-vitro-Testsysteme in den Fokus. Hier geht es um die sensorintegrierte Hochdurchsatzproduktion von Miniaturorganen, die als Ersatz für Tierversuche eingesetzt werden können. Im Kern eine Ingenieursaufgabe und damit ein Bereich mit hohem Potential für unseren Standort. Im Hinblick auf die Kommerzialisierung werden bereits erste Biodrucker erfolgreich in Kliniken genutzt, um implantierbares Gewebe herzustellen. Der Schwerpunkt liegt aktuell noch auf dem Druck weniger komplexer Gewebetypen wie Hautäquivalenten, bestimmten Teilen des Herzgewebes oder der Hornhaut.

Wie hat sich Ihr Unternehmen in den letzten drei Jahren entwickelt? Haben sich Änderungen in der Ausrichtung der Geschäftsfelder ergeben? Wie sehen Sie die Wachstumschancen?

Ein zentraler Meilenstein war die erfolgreiche Markteinführung eines Biodruckers, der durch seinen modularen Ansatz für vielfältige Gewebetypen geeignet ist. Im Bereich der In-vitro-Testsysteme haben wir einen Mikrofluidikchip auf den Markt gebracht, der speziell für den tropfenbasierten 3D-Biodruck optimiert wurde. Er ermöglicht die Wirkstofftestung in 3D in einem vollautomatisierten Workflow und hat das Potenzial, die Organ-on-Chip-Testung maßgeblich weiterzuentwickeln. Mit der Etablierung der Auftragstestung konnten wir zudem ein weiteres wachsendes Geschäfts-



feld erschließen. Für alle drei Bereiche sehen wir in den kommenden Jahren hohes Wachstumspotenzial, insbesondere im Feld der biogedruckten Organ-on-Chip-Systeme.

Gibt es bereits Ansätze für die Entwicklung konkreter medizintechnischer Produkte aus biogedruckten Geweben?

Wir verfolgen derzeit drei Ansätze. Der erste ist die Biofunktionalisierung bestehender Implantate durch eine biogedruckte Schicht, die die Gewebeategration unterstützt und Fremdkörperreaktionen minimiert. Der zweite Ansatz ist die direkte Herstellung und Kultivierung biologischer Gewebe mittels 3D-Biodruck, wobei wir insbesondere im kardiovaskulären Bereich an der gezielten Beeinflussung der Zellorientierung arbeiten. Der dritte Ansatz umfasst den 3D-Biodruck von Bio- beziehungsweise Drug-Carriern in Form von Hydrogelblöcken mit eingekapselten Zellen oder Wirkstoffen. Diese werden implantiert und können ihre therapeutische Fracht lokal kontrolliert freisetzen.

Was sehen Sie als die größten Herausforderungen für die weitere Entwicklung des Bioprintings an?

Hier ist ganz klar die Translation von Forschungs- zu industriellen Produktionsprozessen zu nennen. Neben der Entwicklung geeigneter, klinisch zugelassener Biotinten ist insbesondere die Professionalisierung der Post-Kultivierung eine wesentliche Herausforderung. Das, was aus dem Drucker kommt, ist meist nur ein Zwischenprodukt und muss – je nach Gewebetyp – über Tage oder Wochen, in Einzelfällen bis zu 28 Tage, kultiviert werden. Währenddessen müssen Geometrie und Funktion erhalten bleiben oder sich gezielt entwickeln. Hier können insbesondere Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz entscheidende Impulse geben.

Interview mit Dr. Tobias Lam, Technischer Leiter und Mitgründer der Cellbricks GmbH

Wie ist aus Ihrer Sicht aktuell der Stand des Bioprintings?

Die Erwartungen an die Bioprinting Technologie sind definitiv hoch. Viele Studien rund um die regenerative Medizin bestätigen das immense Potenzial. Dennoch ist das Bioprinting eine eher junge Technologie, die sicherlich nicht alle Herausforderungen der modernen Medizin lösen wird. In den kommenden Jahren erwarten wir die Kommerzialisierung vielseitiger Produkte, die von zellfreien Präparaten bis hin zu komplexen biologischen Geweben ein breites Spektrum umfassen werden.

Wie hat sich Ihr Unternehmen in den letzten drei Jahren entwickelt?

Das Bioprinting hat sich in der Forschung bereits bewiesen und teilweise sogar als alltägliches Werkzeug etabliert. Doch einen entscheidenden Unterschied erwarten wir in der Medizin. Wir haben uns in den letzten drei Jahren stark am Feld der regenerativen Therapien ausgerichtet, um die Patientenversorgung mit unserer Technologie nachhaltig prägen zu können.

Gibt es bereits Ansätze für die Entwicklung konkreter medizintechnischer Produkte aus biogedruckten Geweben?

Ja. Wir haben ein Gewebeprodukt für die Versorgung tiefer Wunden entwickelt, mit dem wir zeitnah in klinischen Studien zur Behandlung chronischer und traumatischer Wunden am Markteintritt arbeiten. Parallel laufen in der Cellbricks GmbH, aber auch in anderen Unternehmen weltweit, weitere Programme, die Gewebeprodukte z. B. für die rekonstruktive Chirurgie und im Bereich chronischer Lebererkrankungen hervorbringen werden.



Wie ist aktuell das Interesse von Investoren und der Pharmaindustrie am Thema Bioprinting?

Finanzierung ist wie bei jedem Unternehmen, das Neuland betritt, ein anhaltendes Thema. Weltweit haben sich Investoren in den letzten Jahren eher zurückhaltend gegenüber Hochrisikoinvestitionen im Biotech-Sektor verhalten, wodurch staatliche Förderungen umso entscheidender für den Markteintritt sind. Erfreulicherweise vermerken wir seit einigen Monaten wieder einen Wandel und Pharmaunternehmen zeigen großes Interesse an Technologien wie unserer zur Herstellung therapeutischer Gewebeprodukte.

Was sehen Sie als die größten Herausforderungen für die weitere Entwicklung des Bioprintings an?

Das Thema Bioprinting umfasst viele Forschungsfelder und Anwendungsfälle, die sich von der Grundlagenforschung über die Entwicklung von z. B. Krebsmedikamenten bis hin zu therapeutischen Gewebeprodukten erstrecken. Um die Technologie als Ganzes im Alltag der Medizin zu etablieren, erfordert es eine breit aufgestellte Zugänglichkeit zur Technologie an Universitäten, Kliniken und Unternehmen sowie eine bewusste Erarbeitung ihrer Standardisierung und Zulassung. Mit der Biofabrikation menschlicher Gewebe zur therapeutischen Anwendung beschreiten wir und die Zulassungsbehörden Neuland. Es gilt nun, dieses aus den Laboren und Tierstudien zum Patienten zu bringen.

Cellbricks GmbH

Die Cellbricks GmbH stellt mit Hilfe additiver Fertigung therapeutische Implantate und Gewebe her. Entwickelt wurde ein Multi-Material-Biodruckersystem, das die stereolithographische Biofabrikation funktionsfähiger, menschlicher Gewebe im klinischen Umfeld ermöglicht. Die Mission des Unternehmens ist es, Patientinnen und Patienten durch eine klinische Anwendung dieser Technologie eine bessere Behandlung zu bieten. Weltweit besteht ein hoher Bedarf an Gewebeersatz bis hin zur vollständigen Organtrans-

plantation. Zurzeit ist man lediglich in der Lage, Hartgewebe durch Materialien wie Metalle, Keramiken oder Kunststoffe zu ersetzen. Die Expertise im Tissue Engineering kombiniert mit der Technologieplattform, bestehend aus 3D-Biodrucker, Biomaterialien und Software, ermöglichen die Herstellung völlig neuartiger, regenerativer Gewebeprodukte, die sich aktuell im Bereich Wundheilung, rekonstruktiver Chirurgie und perspektivisch zur Behandlung chronischer Lebererkrankungen in der klinischen Zulassung befinden.



2.2 Biohybride und lebende Materialsysteme

Biohybride Materialien kombinieren Biomoleküle wie Eiweiße, Fette, Nukleinsäuren oder Kohlenhydrate mit synthetischen Materialien, die nicht in der Natur vorkommen. Der Mehrwert biohybrider Materialien liegt in der gezielten Kombination der vorteilhaften Eigenschaften biologischer Komponenten wie Spezifität, Selektivität oder Selbstorganisation mit der Robustheit und Kontrollierbarkeit synthetischer Materialien.

Lebende Materialien im Sinne der BMFTR-Forschungsförderung sind Materialsysteme, die durch die Kombination von lebenden Komponenten mit nicht-lebenden Komponenten entstehen. Bei lebenden Komponenten handelt es sich um vollständige Zellen

wie Bakterien, Algen, Pilze oder Säugerzellen, die in natürliche oder synthetisch hergestellte Materialien integriert werden. Dies verbindet Vorteile lebender Materialien, wie Adaptivität, Programmierbarkeit oder Selbstheilung, mit strukturellen oder anderen unterstützenden Eigenschaften der nicht-lebenden Komponente. Dadurch wird die Funktionalität der lebenden Systeme technisch ausgenutzt und erweitert. Beispiele für den Einsatz lebender Materialien in der Medizin sind genetisch modifizierte lebende Mikroorganismen und Zellen, die Wirkstoffe für therapeutische Zwecke am oder im menschlichen Körper herstellen und gezielt freisetzen können. Um schädliche Nebeneffekte durch die Freisetzung der Mikroben zu vermeiden, werden diese beispielsweise in polymere Container verkapselt. Diesen sogenannten „Lebenden therapeutischen Materialien“ (engl. Engineered Living Therapeutics) wird ein großes Potenzial zugeschrieben.

Biohybride Materialien: Chancen und Herausforderungen für die Medizin der Zukunft

Biohybride Materialien sind von Prinzipien der Natur inspiriert und bestehen unter anderem aus lebenden Zellen, die in ständiger Interaktion mit ihrer Umgebung stehen. Ziel ist es, Materialien mit lebensähnlichen Eigenschaften zu entwickeln, die wie biologische Systeme beispielsweise auf Reize reagieren sowie Selbstheilung und Abbaubarkeit integrieren. Zusammen mit den Produktionsmethoden wie Bioprinting können lebende Materialien zu Schlüsseltechnologien für eine zukunftsfähige Gesundheitsversorgung werden. So lassen sie sich anwenden, um die Wundheilung zu beschleunigen, Therapien zu individualisieren, die Arzneimittelentwicklung zu beschleunigen oder Tierversuche zu vermeiden. Auch die Entwicklung digitaler Patientenzwillinge und die Herstellung menschlicher Organe sind mögliche Anwendungsbereiche.

Trotz großer Fortschritte in der Forschung an biohybriden Materialien bestehen weiterhin technische Entwicklungsbedarfe, etwa bei der Automatisierung und Skalierung der Produktionsverfahren oder bei der Herstellung

komplexer Strukturen mit verschiedenen Zelltypen. Auch regulatorisch sind Fragen offen. Es fehlen klare Vorgaben, um biohybride Materialien wirtschaftlich tragfähig einsetzen zu können. So ist noch unklar, ob Produkte auf Basis solcher Materialien einzeln geprüft werden müssen oder ob die Zulassung des Produktionsverfahrens genügt. Die vorklinische Testung ist ebenfalls anspruchsvoll: Mausmodelle sind nur begrenzt geeignet und Großtierversuche aufwendig. Die bereits bestehende Expertise hierzulande sollte daher genutzt werden, um Deutschland im Feld der biohybriden Materialien auch international stärker zu positionieren. Zudem ist ein frühzeitiger gesellschaftlicher Diskurs über Forschungs- und Anwendungsmöglichkeiten wichtig, um die Bevölkerung über Chancen und Herausforderungen zu informieren.

acatech- Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Weitere Informationen:

acatech.de/publikation/materialforschung-impulsgeber-natur

In einem Flagship-Report des World Economic Forums wurde die Technologie auf Platz 4 der „Top 10 Emerging Technologies of 2025“ eingestuft [8]. Anwendungen, wie in Implantate eingebettete Mikroorganismen, die direkt im Körper benötigte Wirkstoffe erzeugen, sind zum jetzigen Zeitpunkt allerdings noch visionär. Ein

schon näher an der Anwendung einzuordnendes Beispiel sind selbstbefeuchtende Kontaktlinsen, bei der in der Linse verkapselte Bakterien kontinuierlich Hyaluronsäure zur Augenbefeuchtung als Ersatz für Augentropfen herstellen (s. **Kasten INM S. 27**).

Nukleinsäure-vernetzte Hydrogele als biohybride Materialplattform für biomedizinische Diagnostik und 3D-Gewebekultur

Die Arbeitsgruppe von Dr. Elisha Krieg entwickelte im Rahmen des BMFTR-geförderten NanoMatFutur-Projektes „proDNAmat“ eine neuartige Materialklasse für biomedizinische Anwendungen. Das Materialsystem, genannt „DyNAtrix“, besteht aus organischen Polymeren, die durch synthetische DNA-Stränge quervernetzt werden. In dieses weiche Netzwerk können lebende menschliche Zellen eingebettet und über lange Zeiträume untersucht werden. Die ungewöhnlichen DNA-Quervernetzer bilden hierbei ein Schlüsselement: Ihr vorhersagbares Bindungsverhalten erlaubt es, wichtige Eigenschaften des Materials maßgeschneidert auf die Bedürfnisse der eingebetteten Zellen zu optimieren und über den gesamten Entwicklungszeitraum weiter anzupassen.

Seine besondere „Programmierbarkeit“ hebt DyNAtrix von konventionellen Zellkulturmaterialien ab. Letztere werden häufig aus tierischen Geweben gewonnen, sind dadurch wenig anpassbar und weisen ansatzabhängige Variationen auf, was Ihren Nutzen in der medizinischen Forschung stark einschränkt. Das neue Materialsystem ist hingegen frei von tierischen Bestandteilen, selbst-

heilend und als Biotinte zur Erstellung komplexer Gewebemodelle durch 3D-Druck geeignet. Ein erstes wichtiges Anwendungsfeld liegt in der Erforschung der Frage, in welcher Weise mechanische Gewebeeigenschaften das Verhalten und die Entwicklung von Zellen beeinflussen.

Die Forschungsergebnisse führten bereits zu mehreren Publikationen, unter anderem in der Fachzeitschrift Nature Nanotechnology [9]. Für die Forschung erhielten Dr. Krieg und vier seiner Studenten mehrere Preise, etwa den Innovationspreis 2024 auf dem Jahresempfang des Leibniz-Institut für Polymerforschung. DyNAtrix wurde zum Patent angemeldet und als internationale Marke geschützt. Als nächstes strebt die Arbeitsgruppe eine Ausgründung an. Das Team hofft, dass die Materialplattform neue Möglichkeiten zum Modellieren von Krankheiten, zum Testen neuer Therapien und zum Erforschen entwicklungsbiologischer Prozesse in der Petrischale schaffen wird.

Weitere Informationen: werkstofftechnologien.de/projekte/nachwuchsfoerderung/nachwuchsgruppen-gesundheit/dr-elisha-krieg-prodnamat



Interview mit NanoMatFutur-Forscher Dr. Elisha Krieg

Was sind die besonderen technologischen Vorteile der von Ihnen im Rahmen der BMFTR-Nachwuchsförderung entwickelten Materialplattform?

Mit DyNAtrix können Biologen lebende Zellen in einer präzise kontrollierten Umgebung außerhalb des Organismus untersuchen. Zellen reagieren sehr empfindlich auf die mechanischen Eigenschaften ihrer Umgebung. Herkömmliche Zellkulturmatrizen können diese Mechanik nicht realistisch nachbilden. Das merken die Zellen und verhalten sich anders, was die Aussagekraft von Forschungsergebnissen beeinträchtigt. Die mechanischen Eigenschaften können hingegen mithilfe der DNA-Nanotechnologie präzise kontrolliert werden. Diese Eigenschaften bleiben auch über den gesamten Verlauf der Zellkultur dynamisch anpassbar. Die Materialplattform ist rein synthetisch, kommt also ganz ohne Komponenten tierischen Ursprungs aus.

Welche Anwendungspotenziale sehen Sie für die Medizin der Zukunft?

DyNAtrix hat das Potenzial, verlässlichere Forschungsergebnisse zu liefern und gleichzeitig ethisch fragwürdige Praktiken in der biomedizinischen Forschung überflüssig zu machen. Es können auch neue biologische Fragestellungen untersucht werden, zum Beispiel wie sich mechanische und biochemische Einflüsse auf die Entwicklung von gesundem und krankem Gewebe auswirken. Es ist schon lange bekannt, dass bestimmte Krankheiten, wie etwa Krebs, die mechanischen Eigenschaften des betroffenen Gewebes verändern. Wie aber wirken sich diese Veränderungen auf die Zellen aus? Mit der neuen Materialplattform können derartige mechanobiologische Fragestellungen aktiver und kontrollierter untersucht werden, um Ursachen und Wirkungen zu erkennen, was auch dabei helfen kann, neue Therapieansätze zu finden.

Welche Strategie verfolgen Sie zur Kommerzialisierung der Technologie? Was sind die nächsten Schritte zur Vermarktung?

Wir haben uns zunächst darauf konzentriert, die Technologie so einfach wie möglich in der Anwendung zu machen, um die Umstellung von etablierten Zellkulturmatrizen für Anwender zu erleichtern. Sehr wichtig war die Zusammenarbeit mit Early Adopters, also unabhängigen Anwendern, die uns Feedback gegeben haben und bei der Optimierung helfen konnten. Außerdem wollten wir demonstrieren, dass DyNAtrix nicht nur



eine bestimmte Anwendungsnische bedient, sondern eine breit nutzbare Basistechnologie für die Life Sciences darstellt. Auch anspruchsvolle menschliche Organoiden können nun über längere Zeiträume kultiviert und untersucht werden. Damit kommen prinzipiell auch Anwendungen in neuartigen Arzneimittelscreenings in Betracht. Der nächste und wichtigste Schritt für uns ist nun die Gründung des Unternehmens und die Etablierung des Vertriebssystems, damit wir anfangen können, den Markt zu validieren und echten Umsatz zu erzielen.

Wie schätzen Sie das Umfeld für eine Start-up-Gründung in Deutschland ein? Wo liegen die größten Herausforderungen und welche Unterstützungsangebote helfen?

Es hat sich vieles verbessert, was die Unterstützungsangebote angeht. Öffentliche Förderungen für Unternehmensgründungen gibt es mittlerweile sehr viele. Zudem gibt es ein sehr gutes Angebot von Workshops und Beratungen, von denen wir enorm profitieren. Aber: meiner Einschätzung nach brauchen wir unbedingt Vereinfachungen und einen radikalen Bürokratieabbau, insbesondere beim Gründungsprozess und bei den Steuern. Es wäre schön, wenn sich Gründer auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren können, damit die hohe Innovationskraft aus der deutschen Forschung schneller in wirtschaftliche Anwendungen übersetzt werden kann.



3 Forschungsförderung auf nationaler und europäischer Ebene

3.1 Forschungsförderung des BMFTR

Innerhalb der Materialforschung fördert das BMFTR eine Vielzahl von Projekten im Anwendungsfeld Gesundheit und Lebensqualität. Dies betrifft einschlägige thematische Bekanntmachungen wie beispielsweise die Förderrichtlinien zu „Werkstoffplattform Biomaterialien“ oder „Bioinspirierte Material- und Werkstoffforschung“. Relevante Materialforschungsaktivitäten zu Gesundheitsthemen werden aber auch durch Querschnittsaktivitäten, wie die KMU- und die Nachwuchsförderung, adressiert. Eine Übersicht zu laufenden Forschungsprojekten dieser Maßnahmen findet sich in der Tabelle auf den Seiten [22](#) bis [23](#). Ab 2025 erfolgte eine Neuausrichtung der Förderung im Rahmen des Materialforschungsprogramms „Materialinnovationen für die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft (Mat2Twin)“. In diesem Zusammenhang wurde als ein neuer Forschungsschwerpunkt die Material-Hub-Initiative „MaterialVital: Materialinnovationen für ein gutes und sicheres Leben“ ins Leben gerufen.

Material-Hub-Initiative „MaterialVital“

Durch Materialinnovationen das gesellschaftliche Wohlergehen stärken – das ist das Leitmotiv der Material-Hub-Initiative „MaterialVital“. Ziel des Hubs „MaterialVital“ ist die gezielte Förderung von Forschung und Entwicklung in den Materialwissenschaften, um aktuellen und zukünftigen gesellschaftlichen Bedürfnissen gerecht zu werden. Durch eine ganzheitliche, akteursübergreifende Vernetzung von Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft soll ein missionsorientiertes und innovationsfreundliches Umfeld geschaffen werden, das die Entwicklung neuartiger Materialien mit verbesserten Funktionalitäten beschleunigt. Diese Materialinnovationen bilden die Basis für neue Technologien, die unsere Lebensweise prägen, Gesundheit und Sicherheit fördern und so zu Wohlstand und Lebensqualität beitragen.

Wichtige Aspekte sind die Nachhaltigkeit von Materialien und Herstellungsprozessen sowie deren Normung und Standardisierung, aber auch die Materialicherheit und die regulatorischen Rahmenbedingungen. Die Verwertung und Skalierung der Ergebnisse bis hin zum Technologietransfer in die industrielle Anwendung sind ebenfalls wesentliche Bestandteile des stufenweise

MaterialVital: Materialinnovationen für ein gutes und sicheres Leben			
Durch Materialinnovationen das gesellschaftliche Wohlergehen stärken	Forschung im Material-Hub	Technologietransfer im Material-Hub	Marktreife
Individuelle und gesellschaftliche Lebensqualität steigern	Neue, fortschrittliche Materialien für Wohlergehen und Sicherheit	FuE-Transfer in die industrielle Entwicklung	Innovative (Vor-)Produkte und Prozesse
Wohlstand und Gesundheit fördern	1) Biohybride und lebende Materialien 2) Bioprinting 3) noch offen	Skalierung der Lösungsansätze	Nutzen für Gesellschaft und Industrie
Technologische Souveränität sichern			

und längerfristig angelegten Hub-Konzepts. Ein weiteres zentrales Ziel ist die enge Vernetzung aller im Rahmen des Hubs geförderten Projekte sowie die Anbindung an die Förderinitiative „MaterialDigital“, um Methoden und Standards der digitalen Materialforschung auch in lebenswissenschaftlichen Anwendungen nutzbar zu machen.

Im Rahmen des ersten Moduls der Material-Hub-Initiative „MaterialVital“ fördert das BMFTR Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu biohybriden und lebenden Materialsystemen mit neuen, vorteilhaften Funktionalitäten. Für die nächste in 2026 geplante Fördermaßnahme ist eine Fokussierung auf Materialinnovationen im Bereich Bioprinting beabsichtigt.

MatConnect – Brücken bauen für den Transfer biohybrider und lebender Materialien in die Medizin

Biohybride und lebende Materialien eröffnen neue Perspektiven für die Medizin der Zukunft – von intelligenten Implantaten über neuartige Diagnostikansätze bis hin zu lebenden therapeutischen Systemen. Ihr Potenzial reicht weit über einzelne Anwendungen hinaus, stellt Forschung und Anwendung jedoch zugleich vor besondere Herausforderungen, etwa in Bezug auf Transferpfade, Standardisierung, Regulierung und gesellschaftliche Akzeptanz.

Hier setzt das Projekt “Wissenschaft, Transfer und Vernetzung für das MaterialVital-Innovationsökosystem (MatConnect)” als begleitende Maßnahme der Material-Hub-Initiative „MaterialVital“ an. Ziel des Verbundprojekts ist es, die im Hub geförderten Forschungsverbünde systematisch zu vernetzen und ihre Ergebnisse gezielt in Richtung Anwendung, unter anderem im Bereich Medizintechnik, transferfähig zu machen. Ein besonderer Fokus liegt auf transferorientierten Aktivitäten mit Blick auf medizintechnische Anwendungen. Dazu zählen beispielsweise strukturierte Austauschformate zwischen Forschung, Industrie und Start-ups sowie die Entwicklung konkreter Use-Case-Szenarien. Eine begleitende Innovationssystem-Studie wertet zudem Publikations-

und Patentlandschaften aus und bündelt die Ergebnisse in einer interaktiven Akteurskarte, um Transferpfade, Akteure, Technologien und Anwendungsfelder systematisch zu kartieren und so neue Kooperationspotenziale sichtbar zu machen.

Ein weiteres zentrales Element von MatConnect ist die frühzeitige Auseinandersetzung mit regulatorischen und normativen Fragestellungen, insbesondere im Bereich lebender Materialien. So wird das Leibniz-Institut für Neue Materialien (INM) federführend Expertennetzwerke für Regulatorik aufbauen, regulatorische Lücken analysieren und praxisnahe Leitfäden erarbeiten, um Orientierung für Forschung, Industrie und Aufsichtsbehörden zu schaffen und den Marktzugang zukünftiger Anwendungen zu erleichtern. Durch diese Herangehensweise trägt MatConnect dazu bei, das Innovationspotenzial biohybrider und lebender Materialien verantwortungsvoll zu erschließen.

Weitere Informationen: isi.fraunhofer.de/de/competence-center/wissenstransfer/projekte/matconnect.html

Projektbeispiele aus der BMFTR-Förderung

Projektdate	Materialklasse/Technologie Technische Ziele	Medizinisches Anwendungsfeld und Nutzen
Fördermaßnahme Bioinspirierte Materialforschung		
BILLARD: Bioinspiriertes Polymer-basiertes Depot zur Verlängerung der Wirksamkeit von Medikamenten gegen Gefäßerkrankungen der Netzhaut Laufzeit bis 2027, FKZ 13XP5212 Koordination: INM Saarbrücken	Biopolymere (Proteine) Synthese geeigneter Biopolymere mit der Fähigkeit Wirkstoffe kontrolliert abzugeben. Formulierung und Einkapselung von Wirkstoffen in implantierbare Polymerdepots.	Anwendungsfeld: Behandlung von Augenerkrankungen Nutzen: Verbesserte Heilung von Gefäßerkrankungen der Netzhaut. Durch das Medikamentendepot reduziert sich die Zahl notwendiger Wirkstoffinjektionen und damit die gesundheitliche Belastung.
CarBoMD: Additiv gefertigte Metall-Polymer-Implantate für verbesserte subchondrale Integration Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5206A-C Koordination: RWTH Aachen, Institut für Textiltechnik	Metall/Polymer-Verbundmaterialien, 3D-Druck Bioinspirierte Nachahmung von Knochen- und Knorpelgewebe durch Nanofaser beschichtete resorbierbare poröse Magnesiumimplantate mit Hydrogelfüllung.	Anwendungsfeld: Knorpelimplantate Nutzen: Verbesserte Heilung von Knorpeldefekten bei Gelenkerkrankungen durch individuell gefertigte Implantate.
HEAL-X Bioink: Selbstheilende, bioinspirierte Hydrogel-Plattform für das Next Generation 3D-Bioprinting Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5207A-C Koordination: NMI Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut an der Universität Tübingen	Druckbare funktionalisierte Hydrogele, Bioprinting Synthese Hydrogel-basierter Biotinten mit reversibel vernetzenden Bindungsstellen und integrierten mikrokapselten Wirkstoffen für ein gerichtetes Zellwachstum.	Anwendungsfeld: Zell-/Gewebekultur, Bioprinting Nutzen: Verbesserte Gewebemodelle zur Modellierung von Krankheitsbildern und für In-vivo-Implantate.
OSTEO-FUNK: Biologisierung von PEEK für die chirurgische Therapie Laufzeit bis 2027, FKZ 13XP5208A-C Koordination: Karl Leibinger Medizintechnik GmbH & Co. KG	Biologisch funktionalisierte Polymerwerkstoffe, 3D-Druck Nachahmung natürlicher, schwammartiger Knochenstrukturen mittels 3D-gedruckte Polymere. Durch Beschichtung mit Biopolymeren und Kalziumphosphat wird die Integration und Selbstheilung bei Knochenimplantaten unterstützt.	Anwendungsfeld: Knochenimplantate Nutzen: Individuell gefertigter Knochenersatz mit erhöhter Biokompatibilität verbessert die Rekonstruktion bei Fehlbildungen und Schäden im Schädel-/Gesichtsbereich sowie Brustkorb/Wirbelsäule.
SELF-X-FOR-IMPLANTS: Hydratisierte Polyelektrolyt-Multilayer-Architekturen mit Self-Healing Potential für die Implantologie Laufzeit bis 2027, FKZ 13XP5209A-D Koordination: Mathys Orthopädie GmbH	Multilagen-Beschichtungssystem aus selbstorganisierenden Biomolekülen Entwicklung von Multilagen-Beschichtungssystemen auf Basis selbstorganisierender Biomoleküle für Implantatwerkstoffe mit einstellbaren funktionellen Eigenschaften. Je nach Anwendungsfall können reibungsmindernde, adhäsionshemmende oder antibakterielle Wirkungen erzielt werden.	Anwendungsfeld: Gelenkimplantate, Stents Nutzen: Durch reibungsmindernde Beschichtungen wird die Lebensdauer künstlicher Gelenke erhöht. Bei Stents wird das Risiko von Gefäßverschlüssen und Infektionen reduziert.
Fördermaßnahme ProMat_KMU		
CRIPS: Innovative Deliverysysteme für bioaktive Substanzen zur verbesserten Kultivierung und Differenzierung induzierter pluripotenter Stammzellen Laufzeit bis 2027, FKZ 13XP5219A-B Koordination: MyBiotech GmbH	Nanopartikeläre biopolymerbasierte Verkapselungsmaterialien für Wirkstoffe Entwicklung von Nanokapseln zur gezielten und zeitgesteuerten Freisetzung von Wirkstoffen für die Kultivierung und Differenzierung von Stammzellen.	Anwendungsfeld: Zellkultur Verbesserung der Kultivierung und Differenzierung humaner Stammzellen für die Entwicklung neuer, personalisierter Therapie- und Diagnoseansätze.
Fiber4Ink: Faser-modulierte Biotintenplattform für topographisch, molekular und elektrisch gerichtetes Zellwachstum Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5203A-F Koordination: Black Drop Biodrucker GmbH	Hydrogele mit integrierten Mikrofasern, Bioprinting Durch die Integration von Mikrofasern in druckbare Hydrogele wird in biogedruckten Zellkulturen ein gerichtetes Wachstum stimuliert, das die Ausdifferenzierung und Reifung von Gewebemodellen nach natürlichem Vorbild verbessert.	Anwendungsfeld: Zell-/Gewebekultur Bioprinting Nutzen: Verbesserte Gewebemodelle zur Modellierung von Krankheitsbildern und für In-vivo-Implantate.
SkinJob: Funktionsorientierte Oberflächenstrukturierung von Otoplastiken Laufzeit bis 2027, FKZ 13XP5223A-E Koordination: pro3dure medical GmbH	Photovernetzende Polymerharze für neuartiges 3D-Druck-Verfahren Entwickelt werden Polymerharze, mit denen durch laserbasierte Photopolymerisation präzise 3D-Körper mit funktionaler Oberflächenstrukturierung hergestellt werden können.	Anwendungsfeld: Otoplastiken Nutzen: Maßgeschneiderte Ohrpassstücke (Otoplastiken) mit verbessertem Tragekomfort und Hygiene beispielsweise bei individuell gefertigtem Gehörschutz.

Projektdaten	Materialklasse/Technologie Technische Ziele	Medizinisches Anwendungsfeld und Nutzen
<p>T-Sense-3D: Chemische Synthese und Formulierung Temperatur-sensitiver Polymerkomposite zur Stoffwechselanalyse in 3D-Gewebemodellen Laufzeit bis 2027, FKZ 13XP5222A-E Koordination: FEW Chemicals GmbH</p>	<p>Polymere mit temperatursensitiven Nanopartikel-additiven Polymere mit Nanopartikeladditiven werden als widerstandsbasierte Temperatursensoren in Zellkulturgefäße integriert, um den zeitlichen Temperaturverlauf in 3D-Gewebemodellen zu messen. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die Stoffwechselaktivitäten im Zellsystem.</p>	<p>Anwendungsfeld: Zellkultur, Wirkstoffforschung Nutzen: Aufklärung von biologischen Mechanismen in Zellmodellen für eine verbesserte Zellkultur und Wirkstoffforschung.</p>
<p>TransFunk: Zielgerichteter Transport von Nukleinsäure-Analoga durch funktionalisierte dendritische Vektorsysteme zur Erforschung neuer Tumorthapeutika Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5200A-B Koordination: nanoPET Pharma GmbH</p>	<p>Funktionalisierte Polymere als Wirkstofftransporter RNA-bindende Wirkstoffe bilden Konjugate mit funktionalisierten hypervernetzten Polymeren, die von Zellen direkt über die Membran aufgenommen werden können. Angebundene Fluoreszenzmarker ermöglichen eine analytische Auswertung in Zellexperimenten.</p>	<p>Anwendungsfeld: Drug-Delivery Nutzen: Verbesserte Therapien durch den Transport spezifischer Wirkstoffmoleküle in erkrankte Zellen beispielsweise bei Krebs.</p>
<p>Fördermaßnahme NanoMatFutur</p>		
<p>proDNAmat: Programmierbare DNA-basierte Nanomaterialien für biomedizinische Diagnostik und individualisierte Medizin Laufzeit bis 2025, FKZ 13XP5098 Durchführung: Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.</p>	<p>Programmierbare DNA-vernetzte Hydrogele als Materialplattform DNA-vernetzte Hydrogele ermöglichen eine gezielte Auftrennung, Isolierung und Markierung von DNA und RNA aus biologischen Proben für Sequenzierungs-/und Diagnoseverfahren. Im Bioprinting bieten Hydrogel-Matrizes aufgrund ihrer dynamisch steuerbaren mechanischen Eigenschaften Vorteile bei der Zellkultur.</p>	<p>Anwendungsfeld: Diagnostik, Zellkultur, Bioprinting Nutzen: Universelle Materialplattform mit breiten Einsatzpotenzialen in Diagnostik und Therapie, z. B. für kostengünstige und empfindliche Schnelltests zur Detektion von Krankheitserregern oder für verbesserte Zellkulturmedien.</p>
<p>BlindZero: In-vivo-Bioprinting-Keratoplastik mit biokompatibler, natürlicher Bioinks, die unter sichtbarem Licht vernetzen Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5135 Durchführung: Zentrum für Molekulare Biologie der Universität Heidelberg</p>	<p>Mit sichtbarem Licht vernetzbare Hydrogelmatrizes für Biotinten Entwicklung von Hydrogelmatrizes, die mit sichtbarem Licht vernetzt werden können. Mit patienteneigenen Zellen zu Biotinten formuliert, können diese direkt am Auge von Patienten verdruckt werden, um eine neue Hornhaut zur Heilung von Sehdefekten aufzubauen.</p>	<p>Anwendungsfeld: Bioprinting, Gewebeersatz Nutzen: Individuell angepasstes Ersatzgewebe für Hornhautschäden am Auge.</p>
<p>BioTherNa: Biomimetische thermo-responsive Nanomaterialien für effektivere Krebstherapien Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5113 Durchführung: Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme</p>	<p>DNA-funktionalisierte verzweigte Polymere DNA-vernetzte Polymere werden als temperatursensitive Transportcontainer für Wirkstoffe erforscht. Bei erhöhten Temperaturen zerfällt die Struktur und setzt die Wirkstoffe frei. So können Wirkstoffe gezielt bei Krebszellen freigesetzt werden, die aufgrund stärkerer Stoffwechselaktivität eine höhere Temperatur aufweisen.</p>	<p>Anwendungsfeld: Drug-Delivery Nutzen: Potenziale für schonendere Krebstherapien mit weniger Nebenwirkungen für Patientinnen und Patienten.</p>
<p>TeXlastins: Bioinspirierte materialgetriebene Textilien für kardiovaskuläre Implantate Laufzeit bis 2026, FKZ 13XP5136 Durchführung: Universitätsklinikum Aachen – Institut für Biomedizinische Technologien</p>	<p>Bioinspirierte Polymerfasern Gentechnisch hergestellte Seidenproteine werden mit biomimetischen Polymereinheiten verknüpft und zu Fasern versponnen, die als Basis für biokompatible Textilgewebe eingesetzt werden. Die Materialien eignen sich aufgrund der hohen Elastizität und geringen Neigung zu Verklumpungen durch Blutkörperchen im Blutkontakt für den Einsatz als Blutgefäßersatz.</p>	<p>Anwendungsfeld: Implantate Nutzen: Innovative textile Blutgefäß-implantate mit hoher Haltbarkeit und Zuverlässigkeit beispielsweise für Stents.</p>
<p>PathoBlock: Biologisch abbaubare multifunktionale Nanosysteme zur Blockade von Pathogenen und zur Prävention von Infektionen Laufzeit bis 2028, FKZ 13XP5191 Durchführung: Freie Universität Berlin – Institut für Chemie und Biochemie</p>	<p>Polymermodifizierte zweidimensionale Phosphormaterialien Zweidimensionale Materialien aus schwarzem Phosphor dienen als Trägersubstrat für Polymerketten mit biozider Wirkung. Durch Wechselwirkung mit den Polymerketten werden die Zellmembranen von Bakterien und Viren selektiv zerstört. Es soll eine Materialplattform mit ausreichender Stabilität und Biokompatibilität für medizinische Einsatzzwecke entwickelt werden.</p>	<p>Anwendungsfeld: Hygiene Nutzen: Hochwirksame antivirale und antibakterielle Mittel zum Einsatz als desinfizierende und keimtötende Sprays und Lotionen auch bei resistenten Krankheitserregern.</p>
<p>3DBioEI: 3D-Bioelektronik – Neue chemische Konzepte zum Druck dreidimensionaler, elektronischer Medizintechnik Laufzeit bis 2029, FKZ 13XP5237 Durchführung: Universität Potsdam, Institut für Chemie</p>	<p>Dreidimensional gedruckte bioelektronische Array-systeme aus leitfähigen Polymeren Auf Basis neuartiger biokompatibler Photopolymere werden hochpräzise dreidimensionale Elektrodenarrays mittels Stereolithographie entwickelt. Die Elektrodenarrays mit hoher mechanischer Flexibilität können als elektronische Schnittstelle individuell auf zu untersuchendes neuronales Gewebe angepasst werden.</p>	<p>Anwendungsfeld: Sensorik, Körperüberwachung Nutzen: Potenziale für individuell anpassbare Elektroden-systeme zur Messung von Körperfunktionen, z. B. zur Analyse von Hirnströmen für die Erforschung neuronaler Erkrankungen.</p>

3.2 Schlaglichter aus der institutionellen Forschung

Neben der Projektförderung des BMFTR liefert auch die institutionelle Forschungsförderung wichtige Beiträge

zur Entwicklung innovativer Materiallösungen für die Medizin der Zukunft. Im Folgenden werden einige Schlaglichter zu Forschungsaktivitäten von Helmholtz- und Leibniz-Instituten präsentiert, die sich in der Materialforschung für die Medizintechnik engagieren.

Interaktive Materialien als Schlüssel für neue medizinische Therapien

Wie präzise, wirksam und schonend medizinische Therapien künftig sein können, hängt zunehmend von der Entwicklung neuartiger und hochleistungsfähiger Materialien ab. Am DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien in Aachen steht die Entwicklung von Materialien im Fokus, die nicht nur passiv eingesetzt werden, sondern gezielt mit biologischen Systemen interagieren können und therapeutische Prozesse aktiv unterstützen sollen.

Im Zentrum der Forschung stehen materialbasierte Ansätze, die Geweberegeneration fördern, Wirkstoffe kontrolliert freisetzen oder gezielt im Körper aktiviert werden können. So entwickelt das DWI interaktive Biomedizin-Materialien, die mit Zellen „kommunizieren“ und Heilungsprozesse steuern können – etwa zur Unterstützung regenerativer Therapien. Darüber hinaus entstehen materialbasierte Gewebemodelle, die es ermöglichen, Krankheitsbilder realitätsnah nachzubilden und grundlegende Krankheitsmechanismen besser zu verstehen. Weitere Forschungsarbeiten zielen darauf ab, Wirkstoffe orts- und zeitgenau mithilfe von Ultraschall zu aktivieren, um ihre Wirksamkeit zu erhöhen und Nebenwirkungen zu reduzieren. Diese anwendungsbezogene Grundlagenforschung eröffnet neue

Perspektiven für therapeutische Systeme, bei denen Materialeigenschaften direkt zur Funktionalität beitragen.

Entsprechend erfolgt die Entwicklung der Materialien konsequent mit Blick auf ihre spätere Anwendung und Integration in biomedizinische Systeme. Ein zentraler Baustein hierfür ist das am DWI angesiedelte Leibniz Joint Lab first in Translation (fiT), eine institutseigene Infrastruktur- und Serviceeinheit, die den Transfer von der Grundlagenforschung in präklinische und perspektivisch klinische Anwendungen gezielt unterstützt und beschleunigt.

Mit dieser interdisziplinären Herangehensweise leistet das DWI einen Beitrag zur Entwicklung innovativer Therapien, die präziser, personalisierter und schonender sind. Langfristig eröffnen interaktive Materialien neue Möglichkeiten, Krankheiten gezielter zu behandeln, um die Lebensqualität von Patientinnen und Patienten nachhaltig zu verbessern.

DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien Aachen
dwi.rwth-aachen.de

Mithilfe der Stop-Flow-Lithographie werden Gel-Stäbchen hergestellt, die bereits während des Vorgangs magnetisch ausgerichtet werden.



Digitale Implantat-Forschung: Simulation, KI und personalisierte Medizintechnik

Die Forschenden des Helmholtz-Zentrums Hereon entwickeln medizinische Implantate der Zukunft. Diese können sich etwa im Körper auflösen, wenn sie einen Bruch fixiert und ihre Aufgabe erfüllt haben. Oder sie können patientenspezifisch angepasst im menschlichen Herzen eingesetzt werden, den Blutfluss regulieren und somit Schlaganfällen vorbeugen.

Die digitale Implantat-Forschung denkt diese Forschung weiter und bewegt sich an der Schnittstelle von personalisierter Medizin, Materialwissenschaft und datengetriebener Simulation und Modellierung. Virtuelle Implantatmodelle, die anhand von anatomischen und physiologischen Patientendaten, beispielsweise CT- oder MRT-Aufnahmen, in detailgetreue 3D-Umgebungen eingebaut werden, ermöglichen Analysen, mit denen mechanische Belastungen, Biokorrosion und Geweberegeneration simuliert werden können. So lassen sich Schwachstellen identifizieren und Materialien oder Implantate optimieren noch bevor ein reales Implantat gefertigt wird.

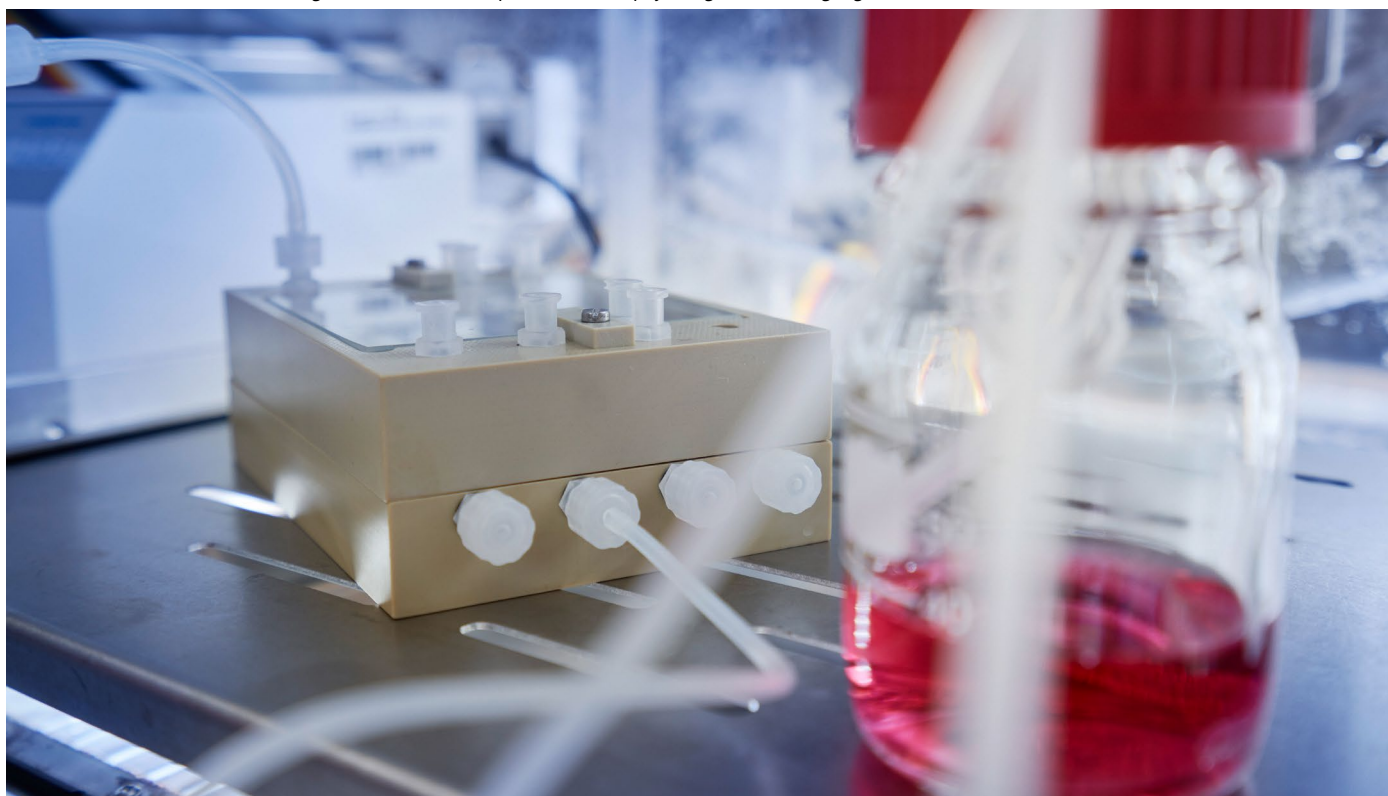
Entscheidend für die Entwicklung ist die Integration von Material- und Zell- beziehungsweise Patientendatenbanken in Simulationsplattformen. Durch wissens- sowie datenbasierte digitale Zwillinge von zum Beispiel metallischen Knochen- oder Polymer-Implantaten für

die Herzchirurgie kann die Interaktion zwischen Gewebe und Implantat realistisch abgebildet werden. Die Einbeziehung der chemischen und biologischen Prozesse, etwa bei Korrosion oder gezielten Oberflächenveränderung unter Beanspruchung, ermöglicht bessere Vorhersagen zum Implantatverhalten und dem gewünschten Ergebnis. Zudem entwickelt das Hereon Konzepte für minimalinvasive Implantationen. Robotisch geführtes Einsetzen, kombiniert mit Live-Simulationen und sensorischen Echtzeitdaten, senkt die Risiken. Das macht es Chirurgen in Zukunft leichter, im Operationsaal die richtigen Entscheidungen zu treffen.

Langfristig sollen digitale Prozesse ihren Weg in die Zulassung finden: Bevor Implantate in tierexperimentelle oder klinische Studien gehen, müssen sie umfangreiche virtuelle Prüfungen durchlaufen. Diese Simulationen können präklinische Tests ersetzen oder ergänzen sowie Entwicklungszyklen verkürzen und Kosten minimieren. In Summe fördert die digitale Implantat-Forschung die Realisierung einer personalisierten, zuverlässigen und effizienten Gesundheitsversorgung – durch individuelle Implantate, realitätsnahe Simulationen und smarte Datenanalysen.

Helmholtz-Zentrum Hereon
[hereon.de](https://www.hereon.de)

Bioreaktor, um den Abbau von Magnesium-basierten Implantaten unter physiologischen Bedingungen zu messen



Von Nanomodulen, lichtinduzierten Polymeren und Holzknochen: Hoffnung aus dem Labor

Erst exzellente Forschung, neue Materialien und Technikentwicklung machen die Medizin der Zukunft möglich – mit noch effizienteren Therapien, präziseren Bildgebungsverfahren, haltbareren Prothesen. Diese Forschung treibt das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) voran, interdisziplinär gebündelt in den KIT-Zentren Materialien für Technik und Lebenswissenschaften (MaTeLiS) sowie Health Technologies (HealthTech).

Ein erster Fokus liegt auf der Nanomedizin. Forschende entwickeln Nanomodule, die als bildgebende Kontrastmittel agieren oder Wirkstoffe zielgerichtet transportieren und freisetzen. Andere erfinden neuartiges Gewebe, das künftig zu einer Herzklappe 3D-gedruckt werden könnte.

Ein zweiter Schwerpunkt ist die Medizindiagnostik. Kleine Sensorplatten sollen bald mehrere bioaktive Moleküle auf einmal messen und langwierige, teure Labornachweise überflüssig machen. In anderen Projekten werden neuartige Membranen für medizinische Schnelltests, z. B. durch die Integration lichtinduzierbarer intelligenter Polymere, konstruiert oder eine Software

entwickelt, um die Lungendurchblutung aus MRT-Daten automatisiert zu bestimmen. Dies hilft, Therapieeffekte besser zu bewerten.

Einen dritten Schwerpunkt bilden Innovationen rund um Implantate. Forschende untersuchen, wie Ermüdung oder Korrosion zum Bruch von Hüftgelenken führen und arbeiten an neuen Materialien und Fertigungsverfahren für patientenindividuelle Implantate und Prothesen. Die Arbeiten könnten u.a. Lösungen für größere Knochendefekte ermöglichen, etwa über Holzteile, die mit Bioglas angereichertem Gelatine-Hydrogel gefüllt sind. Wenn der Knochen in diesem „Gerüst“ regeneriert ist, baut sich der Fremdkörper wieder ab.

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Beteiligte Institute: Institut für Nanotechnologien (INT), Institut für Angewandte Materialien (IAM), Institut für Produktionstechnik (wbk) und Institut für Technische Chemie und Polymerchemie (ITCP).

materials.kit.edu

healthtech.kit.edu

Sensorfolien-Rohling nach dem Thermoformen. Mit Hilfe des thermogeformten Polymers ist es möglich, Sauerstoff an jeder beliebigen Stelle einer 3D-Kultur optisch, ohne Analytverbrauch und in Echtzeit zu messen.



Zukunft im Blick – Biointelligente Materialien in der Augenmedizin

Ein Schwerpunkt der Forschung am INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien liegt auf biointelligenten Materialien für die Biomedizin. Aus dem Zusammenspiel von biologisch programmierten lebenden und nicht-lebenden Komponenten entstehen neuartige therapeutische Materialien, die vielversprechende Ansätze für die Medizin der Zukunft bieten. Aktuell fokussiert sich das INM besonders auf Anwendungen für die Langzeittherapie von Augenerkrankungen – dem trockenen Auge und Gefäßerkrankungen der Netzhaut.

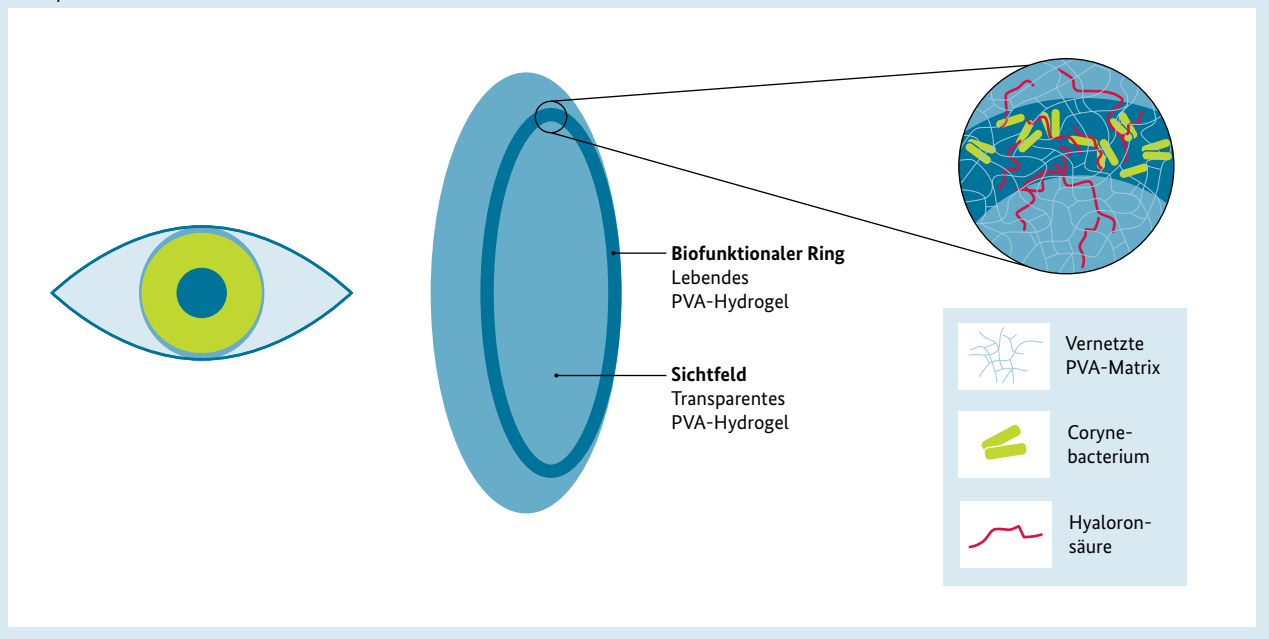
Immer mehr Menschen leiden unter dem trockenen-Auge-Syndrom. Zur Befeuchtung des Auges verabreichen sie sich Tropfen ins Auge, deren Wirkung allerdings nur kurz anhält. Am INM wird an einer nachhaltigen Alternative geforscht: die selbstbefeuchtende Kontaktlinse. In die Linse sind speziell programmierte Mikroorganismen eingeschlossen, die Hyaluronsäure – Goldstandard bei der Befeuchtung des Auges – über mehrere Wochen produzieren und freisetzen und das Auge damit kontinuierlich befeuchten. Erste Prototypen werden bereits hergestellt und erprobt. Langfristig könnte das Prinzip auch für die nachhaltige Abgabe von Augenmedikamenten genutzt werden.

Gefäßerkrankungen der Netzhaut sind eine der Hauptursachen für Erblindung in Industrieländern. Sie werden aktuell durch Injektionen spezieller Medikamente alle vier bis sechs Wochen direkt in den Glaskörper des Auges behandelt. Längere Injektionsintervalle würden die Belastung für die Patienten und das Risiko für Komplikationen senken. Am INM wird an einem neuartigen bioinspirierten Medikamenten-Depot geforscht, das mit Hilfe von biologischen Polymeren im Auge kontinuierlich Wirkstoffe freisetzt. Dieser Weg der Wirkstofffreisetzung könnte in Zukunft auch auf andere Bereiche der Medizin angewendet werden.

Diese Linsen- und Depottechnologien verdeutlichen, wie biointelligente Materialien neue therapeutische Möglichkeiten eröffnen können. Grundlage hierzu ist die synergistische Verbindung von technischen, hochleistungsfähigen Materialien mit den adaptiven Funktionen und der Nachhaltigkeit von biologischen und lebenden Systemen. Das INM wird die Entwicklung biointelligenter Materialien für medizinische Anwendungen konsequent weiter ausbauen.

Leibniz-Institut für Neue Materialien (INM)
leibniz-inm.de

Prinzipskizze einer selbstbefeuchtenden Kontaktlinse



Nanoskalige Gerüststrukturen zur Gewebekultur für präklinische Forschung und personalisierte Medizin

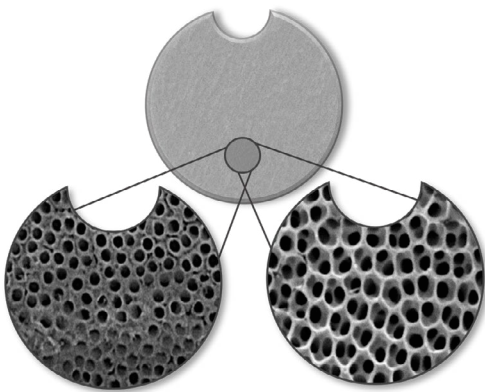
Gerüststrukturen aus Titandioxid-Nanoröhren besitzen gezielt einstellbare Oberflächeneigenschaften für den Kontakt mit biologischen Materialien, insbesondere humanen und tierischen Geweben. Nanoröhren-Durchmesser, Oberflächenrauheit und elektrische Leitfähigkeit lassen sich an die Anforderungen sensibler adulter Gewebe anpassen. Dadurch entstehen funktionelle Beschichtungen für Implantate, die Gewebefestigkeit und elektrische Stimulation verbessern sowie Plattformen für die Langzeitkultur explantierter Gewebe.

Am IOM werden auf justierbaren Gerüststrukturen organotypische Dünnschnittkulturen von Geweben der Maus (Hirn, Milz) und des Schweins (Retina, Hirn) realisiert. Die komplexen Gewebe, die verschiedene Zelltypen enthalten (bspw. im Hirn Neuronen, Astrozyten, Mikroglia), von Gefäßen durchzogen sind und eine spezielle extrazelluläre Matrix besitzen, bleiben während der Kultur morphologisch und funktionell erhalten. Entzündungs-, Immun- und Heilungsprozesse können somit ex vivo über Wochen lokal und global analysiert werden. Auch patienteneigene humane Gewebe lassen sich organotypisch und langfristig

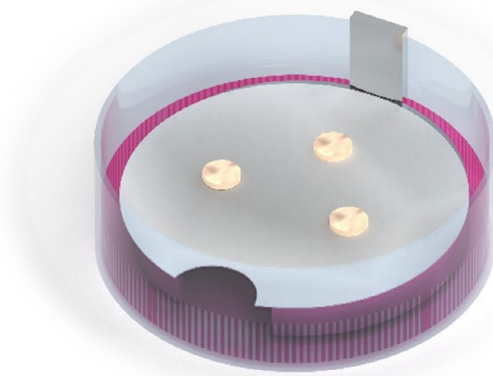
kultivieren. Perspektivisch kann die Therapiewahl durch Langzeitkulturen dieser Gewebe auf Nanoröhren-Gerüststrukturen unterstützt werden. Durch gezielte Applikation von Medikamenten und ggf. Strahlentherapie während der Kultur lassen sich Wirksamkeit und Resistenzentwicklung abschätzen – ein Schritt hin zur personalisierten Medizin.

In der Pharmaforschung fehlen derzeit prädiktive, komplexe Modellsysteme. Organ-on-Chip- und Organoid-Modelle sind aufwendig und nur begrenzt übertragbar. Einfache Zellkulturen besitzen eine geringe Vorhersagekraft und Tierversuche zeigen oft eine eingeschränkte Übertragbarkeit. Humane Langzeit-Gewebekulturen eröffnen hier neue Perspektiven für effizientere präklinische Entwicklungsprozesse unter Berücksichtigung geschlechtsspezifischer, genetischer und pharmakodynamischer Unterschiede.

Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung (IOM)
iom-leipzig.de/forschung/forschungsabteilungen/biokompatible-und-bioaktive-oberflaechen/biofunktionale-oberflaechen-und-nanoobjekte.html



Titandioxid-Nanotube-Gerüststrukturen (Scaffolds) mit anpassbaren Oberflächeneigenschaften.



Drei Gewebeprobe werden auf den Gerüststrukturen kultiviert.

Bioinspirierte Polymermaterialien für innovative Medizintechnik

Die interdisziplinäre Biomaterialforschung des Leibniz-Instituts für Polymerforschung (IPF) trägt zur Aufklärung der Funktionalität lebender Materialien bei und nutzt die gewonnenen Erkenntnisse zur Entwicklung polymerbasierter Materialien für innovative medizintechnische Anwendungen. Schwerpunkte sind funktionalisierte Oberflächen, die Bioadhäsion steuern oder bioaktive Substanzen kontrolliert freisetzen lassen, und zell-instruktive Polymermatrizes, die neuartige regenerative Therapien und realitätsnahe Gewebe- und Krankheitsmodelle ermöglichen.

Zu den jüngsten Beispielen für die erfolgreiche Nutzung von Ergebnissen der Biomaterialforschung des IPF gehören entzündungshemmende Polymermaterialien, deren Anwendung zur Behandlung chronischer Hautwunden derzeit in einer klinischen Pilotstudie validiert wird. Die Entwicklung wurde 2024 mit dem Science4Life-Preis und dem Innovationspreis 2024 der BioRegionen Deutschlands ausgezeichnet. Die Kommerzialisierung der Technologie wird durch die im Rahmen eines EXIST-Projektes ausgegründete ResCure GmbH vorangetrieben.

In einem ERC-geförderten Projekt stehen bioelektronische Hydrogele im Fokus, die die Funktionalität und Gewebeverträglichkeit von Neuroimplantaten verbessern sollen. Ein weiteres ERC-Projekt erforscht polymerbasierte, patientenspezifische 3D-Tumormodelle für gezieltere Wirkstofftests. Im NanoMatFutur-Projekt proDNAMat werden programmierbare, DNA-basierte Polymermaterialien zur Steuerung von Zell- und Organoidkulturen entwickelt. Darüber hinaus gestaltet ein IPF-Team Multimatrix-Faserverbunde für individuell anpassbare Skoliose-Korsetts.

Die am IPF entwickelten Materialplattformen ermöglichen ein breites Spektrum medizintechnischer Innovationen – für eine bessere und wirtschaftlichere Gesundheitsversorgung.

Leibniz-Institut für Polymerforschung (IPF)
ipfdd.de

Leichter leben mit Hightech-Materialien: Faserverbundwerkstoffe für die Medizintechnik

Leicht, stabil und individuell anpassbar – faserverstärkte Kunststoffe bieten großes Potenzial für moderne medizintechnische Anwendungen. Am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) in Kaiserslautern wird erforscht, wie diese Hightech-Materialien, bekannt aus der Luft- und Raumfahrt, die Versorgung von Patientinnen und Patienten verbessern können.

So ermöglichen Implantate aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff etwa eine verbesserte Bildgebung: Sie sind „röntgentransparent“, d. h. im Röntgenbild kaum sichtbar. So lassen sich umgebende Knochenstrukturen klarer darstellen und der Sitz des Implantats einfacher beurteilen. Zudem können Festigkeit und Steifigkeit patientenspezifisch und biomechanisch angepasst werden – ein Vorteil für die Heilung.

In einem aktuellen Forschungsprojekt widmet sich das IVW der sogenannten Trichterbrust – einer angeborenen Einziehung des Brustkorbs, die zu funktionellen oder

psychischen Beschwerden führen kann. Entwickelt wird ein neuartiges Implantat, das – ähnlich wie eine Zahnspange – über längere Zeit sanften Druck ausübt und so die Fehlstellung korrigiert. Ein bioresorbierbarer Klebstoff löst dabei gezielt eine Verformung im Implantat aus. Ziel ist eine schonendere, schmerzärmere Therapie.

Auch in einem Bürgerforschungsprojekt bringt das IVW Materialinnovation voran: Gemeinsam mit interessierten Bürgerinnen und Bürgern wird eine Orthese für Menschen mit Fußheberschwäche entwickelt. Sie soll sich individuell anpassen lassen – anders als viele starre oder maßgefertigte Lösungen auf dem Markt. Möglich macht das ein spezielles Festkörpergelenk aus Faserverbundmaterial, das sich nachträglich versteifen lässt.

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW)
ivw.uni-kl.de/de/forschung-entwicklung/branchen/medizintechnik



3.3 Materialforschungsaktivitäten auf europäischer Ebene

Materialinnovationen sind auf europäischer Ebene zu einem strategischen Handlungsfeld avanciert, das industrie-, forschungs- und gesundheitspolitische Ziele verbindet. Die Europäische Union positioniert Advanced Materials als Schlüsseltechnologie für technologische Souveränität, Resilienz von Lieferketten und globale Wettbewerbsfähigkeit. Mit der 2024 vorgestellten Mitteilung „Advanced Materials for Industrial Leadership (AM4IL)“ unterstreicht die Europäische Kommission den Anspruch, Entwicklung, Skalierung und industrielle Anwendung neuer Werkstoffe systematisch zu stärken [10].

Das Forschungsrahmenprogramm Horizont Europa (2021–2027) bildet dabei das finanzielle Rückgrat der europäischen Materialforschung. Advanced Materials sind als Querschnittsthema in mehreren Clustern verankert. In Cluster 1 „Gesundheit“ werden materialbasierte Innovationen für Implantate, regenerative Medizin, Drug-Delivery-Systeme oder Diagnostik adressiert. Parallel dazu werden in Cluster 4 „Digital, Industrie und Raumfahrt“ neue Werkstoffplattformen, Nanomaterialien, 2D-Materialien sowie simulationsgestützte Materialentwicklung unter Nutzung von Künstlicher Intelligenz entwickelt.

Ergänzend setzt die EU auf missionsorientierte und partnerschaftliche Instrumente. Eine kombinierte Betrachtung von materialwissenschaftlichen Themen finden sich unter anderem in den ko-programmierten Cluster 4 Partnerschaften „Innovative Advanced Materials for Europe“ (IAM4EU), „Made in Europe“ und „Processes4Planet“. Hier stellt vor allem die neue Partnerschaft IAM4EU (seit 2025) einen wichtigen

Hebel für die Advanced Materials Themen mit Bezug zu „Gesundheit“ und Medizintechnik. Eine entsprechende Arbeitsgruppe innerhalb der Partnerschaft legt den Schwerpunkt auf Materialien, die biokompatibel, sicher, funktional und an die spezifischen Bedürfnisse der Patienten anpassbar sind und die Entwicklung von Implantaten, Diagnostika und therapeutischen Geräten der nächsten Generation ermöglichen. Besonders risikoreiche Deep-Tech-Vorhaben werden darüber hinaus im Rahmen des European Innovation Council (EIC) gezielt gefördert. Dazu zählen auch materialbasierte Medizintechnologien mit hohem Skalierungspotenzial. Damit wird die Lücke zwischen Laborentwicklung und Markteintritt adressiert. Dies hilft dabei, dass „Innovation Valley of Death“ zu schließen und revolutionäre Ideen zur Marktreife zu führen.

Eine zentrale Rolle spielt zudem die strategische Koordinierung über Roadmaps und Technologieplattformen. Die EU fördert die Entwicklung gemeinsamer Forschungsagenden, um Prioritäten wie Material-sicherheit und -nachhaltigkeit, Kreislauffähigkeit oder digitale Materialzwillinge voranzutreiben. Diese Ansätze sind auch für Medizinprodukte relevant, da regulatorische Anforderungen – etwa im Rahmen der EU-Medizinprodukteverordnung (Medical Device Regulation, MDR) – hohe Standards an Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Nachverfolgbarkeit stellen. Darüber hinaus werden Investitionen in Forschungsinfrastrukturen ausgebaut, um die Skalierung neuer Materialien zu ermöglichen.

Weitere Informationen zur Europäischen Forschungs- und Innovationsförderung auf der Homepage der Nationalen Kontaktstelle Digitale und Industrielle Technologien (NKS DIT): nks-dit.de

4 Glossar

Biohybride Sensoren: Sensoren, die biologische mit künstlichen Komponenten für eine verbesserte Funktionalität und Empfindlichkeit bei der Erfassung von Messsignalen oder Analyten kombinieren.

Bioprinting: 3D-Druckverfahren, bei dem lebende Zellen zusammen mit weiteren biokompatiblen Materialien schichtweise zu dreidimensionalen Gewebe- und Organstrukturen gedruckt werden.

CT: Computertomographie

Digitaler Zwilling: Virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts, Produkts, Systems oder Prozesses.

Deep-Tech: Auf naturwissenschaftlicher Grundlagenforschung basierende Technologien mit dem Potenzial für eine grundlegende Transformation von industriellen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Produkten, Prozessen und Strukturen.

DNA: Desoxyribonukleinsäure speichert Erbinformationen aller Lebewesen in langkettigen Doppelhelix-Strukturen.

ERC: European Research Council

Extrusionsdruck: Additiver Fertigungsprozess, bei dem ein viskoses Material durch eine bewegliche Düse gepresst wird, um schichtweise ein dreidimensionales Objekt aufzubauen.

Ex-vivo: Außerhalb des lebenden Objekts

FAIR-Prinzipien: Internationale Leitlinien für ein nachhaltiges Forschungsdatenmanagement, die sicherstellen sollen, dass Daten auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar sind.

FKZ: Förderkennzeichen

Inkjetdruck: Druckprozess, bei dem flüssige Tinten durch einen beweglichen Druckkopf tröpfchenweise auf ein Substrat aufgetragen werden.

Innovation Valley of Death: Finanzierungslücke bei der Übertragung vielversprechender Ergebnisse aus der öffentlich geförderten Grundlagenforschung in die privatwirtschaftliche Kommerzialisierung.

In-vitro: Im Reagenzglas

In-vivo: Am lebenden Objekt

ISO: Internationale Standardisierungsorganisation

KI: Künstliche Intelligenz

KMU: Kleine und mittlere Unternehmen

MRT: Magnetresonanztomographie

Organ-on-a-Chip/Organ-Chips: Mikrofluidische Chips, die im miniaturisierten Maßstab modellhaft die Funktion und das Verhalten von menschlichen Organen oder Geweben nachahmen.

Ontologie: Strukturiertes System aus Begrifflichkeiten und deren Beziehungen untereinander innerhalb eines Fachgebietes.

PEEK: Polyetheretherketon (thermoplastischer Kunststoff)

Piezoaktor: Wandelt elektrische Energie auf Basis kristalliner Festkörpereffekte direkt in mechanische Energie um und ermöglicht lineare Bewegungen.

PVA: Polyvinylalkohol: wasserlöslicher, biologisch abbaubarer und ungiftiger thermoplastischer Kunststoff

RNA: Ribonukleinsäure spielt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung genetischer Informationen in Proteine (Proteinbiosynthese).

Stereolithographie: 3D-Druckverfahren, bei dem lichtempfindliche Harze durch Laserstrahlen punktgenau ausgehärtet werden, um schichtweise ein dreidimensionales Objekt aufzubauen.

Vaskulatur: Blutgefäßsystem

VDI: Verein Deutscher Ingenieure

Workflow: Arbeitsablauf

5 Links

Hightech Agenda Deutschland (HTAD)
[hightech-agenda-deutschland.de](https://www.hightech-agenda-deutschland.de)

Portal des BMFTR zur Gesundheitsforschung:
[gesundheitsforschung-bmftr.de](https://www.gesundheitsforschung-bmftr.de)

Portal des BMFTR zur Zukunft der Wertschöpfung:
[zukunft-der-wertschoepfung.de](https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de)

Materialforschungsportal des BMFTR:
[werkstofftechnologien.de](https://www.werkstofftechnologien.de)

Begleitprojekt BioTrans:
[biologisierung-der-technik.de](https://www.biologisierung-der-technik.de)

Plattform MaterialDigital:
[materialdigital.de](https://www.materialdigital.de)

6 Literatur

- [1] OECD 2023: „Advanced Materials: Working Description“, OECD Environment, Health and Safety Publications Series on the Safety of Manufactured Nanomaterials, No. 104
- [2] BMBF 2023: Bioprinting. Potenziale für medizinische Forschung und Anwendung. Bonn, Berlin, Oktober 2023, Inhalte des Kapitels Bioprinting wurden in aktualisierter Form aus der Broschüre übernommen.
- [3] 2025-07-31, Contributors: M. Barbieri; D. Golzio, DOI: 10.69971/tipr.3.2.2025.48
- [4] VDI 5708 Blatt 1:2025-05, Biofabrication – Bioprinting – Druckprozess, Mai 2025
- [5] Bericht zur globalen Marktgröße, zum Marktanteil und zu den Trends im Bereich 3D-Biodruck – Branchenüberblick und Prognose bis 2033, Market Report, Data Bridge Market Research 2025
databridgemarketresearch.com/de/reports/global-3d-bioprinting-market
- [6] The Bioprinting World Map Reimagined: The Evolution from 2019 to 2024, online-Artikel, 3DPrint.com, 2024 ([The Bioprinting World Map Reimagined: The Evolution from 2019 to 2024 – 3DPrint.com](https://www.3dprint.com/news/2024-01-12/the-bioprinting-world-map-reimagined-the-evolution-from-2019-to-2024-3dprint-com))
- [7] ARPA-H 2026: “ARPA-H awards teams set to bioprint universally matched organs on demand.” Pressemitteilung vom 12. Januar 2026. [online verfügbar unter: arpa-h.gov/news-and-events/arpa-h-awards-teams-set-bioprint-universally-matched-organs-demand]
- [8] World Economic Forum 2025: “Top 10 Emerging Technologies of 2025”; Flagship Report, Juni 2025
- [9] Krieg et. al. 2023: “Dynamic matrices with DNA-encoded viscoelasticity for cell and organoid cultur” Nature Nanotechnology volume 18, pages1463–1473 (2023) doi.org/10.1038/s41565-023-01483-3
- [10] EU-KOM 2024: „Communication on Advanced Materials for Industrial Leadership“, Pressemitteilung vom 27. Februar 2024. [online verfügbar unter: research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/industrial-research-and-innovation/chemicals-and-advanced-materials/advanced-materials-industrial-leadership_en]

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Forschung,
Technologie und Raumfahrt (BMFTR)
Referat Werkstoffinnovationen; Hereon
53170 Bonn

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 50 10 54
18155 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: bmftr.bund.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

Mai 2026

Text

BMFTR, Projektträger Werkstofftechnologien

Gestaltung

BMFTR

Druck

BMFTR

Bildnachweise

Titel: AdobeStock/pjjaruwan, generiert mit KI
Vorwort: Bundesregierung/Steffen Kugler
S. 2: AdobeStock/HockleyMedia24/peopleimages.com
S. 3: Hereon/Hanin Alkhamis
S. 6: AdobeStock/xiaoliangge
S. 7: DWI/Hannes Woidich
S. 8: AdobeStock/VK Studio
S. 9: BMFTR/Alex Kraus
S. 10: AdobeStock/keetazalay, generiert mit KI
S. 11: BMFTR/P. Weiler; BMFTR/Alex Kraus
S. 13: BMFTR/Alex Kraus
S. 14: Black Drop Biodrucker GmbH
S. 15: Jannik Stadler
S. 16: BMFTR/P. Weiler
S. 17: DWI/Hannes Woidich
S. 18: IPF
S. 19: IPF
S. 20: DWI/Hannes Woidich
S. 24: DWI/Hannes Woidich
S. 25: Hereon/Christian Schmid
S. 26: KIT
S. 27: INM
S. 28: IOM
S. 30: AdobeStock/Symbiot

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

[bmftr.bund.de](https://www.bmftr.bund.de)

 @bmftr_bund

 @bmftr_bund

 @bmftr.de

 @bmftr_bund

 @Bundesministerium für
Forschung, Technologie
und Raumfahrt


Mat2TWIN