



# BLICKPUNKT BIOÖKONOMIE

## DIE ZUKUNFT DER FUNKTIONALISIERUNGEN VON TITAN NEUE CHANCEN DURCH BIOÖKONOMISCHE INNOVATIONEN

VOL. 1D

### HERAUSGEBER

Institut für Technologie- und Innovationsmanagement  
RWTH Aachen University



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## VERÖFFENTLICHUNG

September 2024

### AUTOREN

#### **K. Wieland Freyer**

(Institut für Technologie- und Innovationsmanagement, RWTH Aachen University)

#### **David Antons**

(Institut für Entrepreneurship, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn)

### HERAUSGEBER

#### **Institut für Technologie- und Innovationsmanagement, RWTH Aachen University**

Christina Dienhart

K. Wieland Freyer

Christoph Nasgowitz

T.-Oliver Salge

Paul Selzner

David Antons (Institut für Entrepreneurship, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn)

### ZITIEREMPFEHLUNG

Freyer, K. W. & Antons, D. (2024): Die Zukunft der Funktionalisierung von Titan – Neue Chancen durch bioökonomische Innovationen. Aachen, Institut für Technologie- und Innovationsmanagement. Antons, D.; Dienhart, C.; Freyer, K. W.; Nasgowitz, C.; Salge, T.-O.; Selzner, P. (Hrsg.): Blickpunkt Bioökonomie, 1D.

## IMPRESSUM

### **Institut für Technologie- und Innovationsmanagement, RWTH Aachen University**

Univ.-Prof. T.-Oliver Salge, PhD

Kackertstraße 7

52074 Aachen

Deutschland

### BILDNACHWEIS

Seite 19: KI-generiertes Bild, RWTH Aachen University

Weitere Bilder: stock.adobe.com

### LAYOUT

clever + smart kommunikation GmbH

[www.cusk.de](http://www.cusk.de)

**ISSN (PRINT)** 2944-0556

**ISSN (ONLINE)** 2944-0564

Die Online-Version ist verfügbar über das institutionelle Repositorium der RWTH Aachen University.

**DOI:** [10.18154/RWTH-2024-07570](https://doi.org/10.18154/RWTH-2024-07570)



# INHALTSVERZEICHNIS

## INNOVATIONSBERICHT MODELLREGION BIOÖKONOMIE IM RHEINISCHEN REVIER

ZUSAMMENFASSUNG	4
AUTOREN & HERAUSGEBER	6
FORSCHUNGSPROJEKT & VORWORT	7
EINLEITUNG	8
Maßgeschneiderte Materialien für spezifische Anforderungen und Anwendungen	9
Nachhaltigkeit als Schlüssel für Innovation	10
METHODIK	12
ERGEBNISSE	16
Die Zukunft der Funktionalisierung von Titan	17
Biofunktionsbausteine als Werkzeugkoffer der Funktionalisierung	19
Zukünftige Nutzung von Biofunktionsbausteinen	22
ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	24



# **DIE ZUKUNFT DER FUNKTIONALISIERUNGEN VON TITAN**

## NEUE CHANCEN DURCH BIOÖKONOMISCHE INNOVATIONEN

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Die Materialwissenschaft erlebt durch die Funktionalisierung einen Wandel, der Materialien mit spezifischen Funktionen über ihre ursprüngliche Verwendung hinaus verbessert und die Schaffung maßgeschneiderter Materialien für verschiedene Branchen ermöglicht. Dieses Whitepaper untersucht die zukünftigen Funktionalitäten, die für Titan erforderlich sind, und wie Biofunktionsbausteine (Biofunctional Building Blocks, BBBs) diese Funktionen umsetzen können.

Unsere Delphi-Zukunftsstudie mit 74 Experten analysiert die Perspektiven für 2030 und 2038 und bietet Einblicke in materialspezifische und technologische Auswirkungen. Die Studie unterstreicht, dass BBBs wichtige technologische Eigenschaften aufweisen und vielfältige Anwendungen in verschiedenen Märkten bieten. Sie ermöglichen innovative Lösungen in Bereichen wie Implantaten, nachhaltigem Antifouling und Recycling und nutzen branchenspezifische Expertise.

Trotz ihres Potenzials zögern etablierte Unternehmen, bestehende Produkte durch BBBs zu ersetzen, es sei denn, es gibt signifikante Neuerungen oder dringende Nachhaltigkeitsbedürfnisse. Unter starkem Nachhaltigkeitsdruck, wie beim Antifouling, können BBBs jedoch entscheidend sein. Langfristig können BBBs in verschiedenen Sektoren neuen Wert, Anwendungen und Funktionsstandards schaffen und somit erhebliches Potenzial demonstrieren. Für das Rheinische Revier könnte die Integration der BBB-Technologie die Produktentwicklung vorantreiben und regionale Wettbewerbsvorteile schaffen. Die Region sollte ihr technisches Know-how, Strukturwandelmittel und industrielles Umfeld nutzen, um diese Technologie zu fördern.



# THE FUTURE OF TITANIUM FUNCTIONALIZATION

## NEW OPPORTUNITIES THROUGH BIOECONOMIC INNOVATIONS

### **ABSTRACT**

*Material science is undergoing a transformation through the functionalization of materials, which enhances them with specific functions beyond their original uses, enabling the creation of tailored materials for diverse industries. This white paper delves into the future functionalities necessary for titanium and how Biofunctional Building Blocks (BBBs) can implement these functionalities.*

*Our Delphi future study with 74 experts analyzed the outlook for 2030 and 2038, offering insights into material-specific and technological implications. The study highlights that BBBs exhibit key technological characteristics, offering diverse applications across markets. They enable innovative solutions in fields like implants, sustainable antifouling, and recycling, and leverage sector-specific expertise.*

*Despite their potential, established companies are hesitant to replace existing products with BBBs without significant novelty or pressing sustainability needs. However, BBBs can be crucial under strong sustainability pressures, such as in antifouling. Long-term, BBBs can create new value, applications, and functional boundaries across various sectors, demonstrating significant potential. For the Rhenish mining area, integrating BBB technology could advance product development and create regional competitive advantages. The region should leverage its technical expertise, structural change funds, and industrial environment to foster this technology.*

## AUTOREN & HERAUSGEBER

K. Wieland Freyer, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technologie- und Innovationsmanagement, forscht derzeit zu Themen der Implementierung neuer Technologien, Entwicklung von Geschäftsmodellen sowie die Nutzung unerwarteter Entdeckungen.



David Antons, Professor für Entrepreneurship und Innovationsmanagement im Agribusiness, forscht derzeit zu Themen des Innovationsmanagement, der Unternehmensstrategie und -führung, sowie zur Entscheidungsfindung.



Das Herausgeber-Team unter der Leitung von Univ.-Prof. T.-Oliver Salge und Univ.-Prof. David Antons ist am Institut für Technologie- und Innovationsmanagement im Sustainable Innovation Lab angesiedelt. Das Sustainable Innovation Lab, koordiniert von Dr. Christina Dienhart, leitet das Projekt Bioökonomie-VWU, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) als Teil des BMBF-Forschungsverbunds der Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier. Neben dem Thema der Bioökonomie forscht das Sustainable Innovation Lab an Themen der Kreislaufwirtschaft, der Wasserstofftransformation und der Anpassungen an den Klimawandel.



# FORSCHUNGSPROJEKT & VORWORT

Das Vorhaben Bioökonomie-VWU ist die vom BMBF geförderte Begleitforschung der Modellregion Bioökonomie, die integraler Bestandteil zahlreicher Bioökonomie-Initiativen im Rheinischen Revier ist. VWU steht hierbei für Verstehen, Verbinden und Unterstützen und dies ist auch unser Leitmotiv. Unser Team aus engagierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich mit Leidenschaft der Erforschung und Förderung der Bioökonomie widmen, möchte im ersten Schritt stehe die Zusammenhänge, die Technologien und die Menschen verstehen. Im Rahmen des „Verbindens“ versuchen wir, einerseits Akteure miteinander zu vernetzen, neue Kontakte aufzubauen, den Menschen das Thema näher zu bringen und auch innovative Technologie mit neuen und alten Problemen zu vernetzen, um diese zu lösen. Wir haben uns zum Ziel gesetzt, Erkenntnisse und Erfahrungen in der Modellregion zu systematisieren und nutzbar zu machen. Dabei arbeiten wir eng mit anderen Forschungsprojekten und -einrichtungen zusammen, um einen ganzheitlichen Blick auf die Bioökonomie zu ermöglichen und deren Potenzial für eine nachhaltige Entwicklung zu erschließen. Unser Engagement zielt darauf ab, nicht nur die wissenschaftliche Diskussion und Weiterentwicklung der Bioökonomie zu fördern, sondern auch den Einfluss der Bioökonomie auf die nachhaltige

Entwicklung unserer Gesellschaft und den Schutz unseres Planeten für zukünftige Generationen zu unterstützen.

Als Teil dieses Projektes betrachten wir neue biologische Technologien aus dem Rheinischen Revier, um deren zukünftigen Potentiale zu evaluieren. Hierfür wurden Anwendungsmöglichkeiten für funktionale Beschichtungen für verschiedene Industrien und Materialien untersucht. Dies geschieht in vier separaten Whitepapers zu Stahl (Vol. 1A), Glas (Vol. 1B), Holz (Vol. 1C) und Titan (Vol. 1D).

Die Funktionalisierung von Titan ist ein Schlüsselprozess in der Materialwissenschaft, der innovative Möglichkeiten für zahlreiche Branchen eröffnet. Dieses Whitepaper beleuchtet die Bedeutung der Funktionalisierung von Titan mit einem besonderen Fokus auf der Nutzung von Biofunktionsbausteinen.

Wir danken allen Mitwirkenden und Förderern für ihre Unterstützung.

# EINLEITUNG



# MASSGESCHNEIDERTE MATERIALIEN FÜR SPEZIFISCHE ANFORDERUNGEN UND ANWENDUNGEN

Die Welt der Materialwissenschaft erlebt einen revolutionären Wandel durch einen Schlüsselprozess: die Funktionalisierung von Materialien. Dieser Ansatz steht im Mittelpunkt aktueller technologischer Entwicklungen mit tiefgreifenden Auswirkungen in zahlreichen Industriezweigen. Bei der Funktionalisierung geht es darum, Materialien gezielt mit spezifischen Funktionen und Eigenschaften zu versehen, die über ihre ursprüngliche Verwendung hinausreichen. Dieser transformative Schritt eröffnet ein weites Feld von Möglichkeiten und verändert die Art und Weise, wie wir Materialien verstehen und nutzen. In der Materialwissenschaft ermöglicht die Funktionalisierung somit einen entscheidenden Schritt in Richtung maßgeschneiderter Materialien für spezifische Anforderungen und Anwendungen.

Dieses Whitepaper nimmt Sie mit auf eine Reise durch die Welt der Funktionalisierung von Titan. Hierbei liegt unser Fokus darauf zu verstehen, welche zukünftigen Funktionen notwendig sind und umgesetzt werden. Darüber hinaus betrachten wir auch welche der Funktionalisierungen mit Hilfe der neuen Techno-

logie der Biofunktionsbausteine (siehe Kapitel Biofunktionsbausteine als Werkzeugkoffer der Funktionalisierung) umgesetzt werden können und somit Anwendung finden werden. Eine Analyse zur Art der Umsetzung und zu den noch fehlenden Schritten, um dies zu erreichen, steht nicht im Zentrum dieses Whitepapers.

Titan, aufgrund seiner Leichtigkeit bei hoher Beständigkeit besonders in der Luft- und Raumfahrt verwendet, könnte durch Funktionalisierung eine breite Palette von neuen Möglichkeiten in verschiedenen Branchen erreichen, so auch in diversen medizinischen Anwendungen eine erweiterte Rolle spielen. Durch die gezielte Verbesserung ihrer Eigenschaften kann das Material nicht nur leistungsfähiger gemacht, sondern auch für Anwendungen erschlossen werden, die zuvor als technologisch unerreichbar galten. Insgesamt eröffnet die Funktionalisierung von Titan neue Möglichkeiten, indem sie die physikalischen Eigenschaften optimiert sowie aus Titan gefertigte Produkte an neue Herausforderungen und Anforderungen anpasst.

# NACHHALTIGKEIT ALS SCHLÜSSEL FÜR INNOVATION

Die Bedeutung von Nachhaltigkeit in diesem Kontext wird vor dem Hintergrund globaler Umweltprobleme und der zunehmenden Knappheit von Ressourcen immer drängender. Die Entwicklung von umweltfreundlichen Materialien und ressourcenschonenden Prozessen wird somit zu einem zentralen Anliegen. In diesem Zusammenhang eröffnet die Funktionalisierung von Materialien die Möglichkeit, ihre Leistung zu steigern und darüber hinaus auch ihre potenziellen Umweltauswirkungen entscheidend zu minimieren.

Die gezielte Anpassung und Verbesserung von Materialeigenschaften ermöglichen innovative Anwendungen und können einen erheblichen Beitrag zum Umweltschutz leisten. Ein besonders vielversprechender Ansatz in Richtung Nachhaltigkeit ist das Recycling von Materialien. Hierbei kann die Funktionalisierung eine Schlüsselrolle spielen, indem sie Beschichtungen ermöglicht, welche haften und wieder gelöst werden können. Durch diese Eigenschaft können Materialien am Ende der Produkt-Lebensdauer in ihre Grundbestandteile zerlegt und diese wiederverwendet werden.

Recycling oder der Austausch einzelner Verbundkomponenten wird somit zu einem effektiven Weg, um den ökologischen Fußabdruck von Materialien zu reduzieren und den Lebenszyklus von Produkten zu verlängern. Die Entwicklung von Beschichtungen,

die gezielt klebende und lösbare Eigenschaften aufweisen, trägt dazu bei, Ressourcen zu schonen und den Abfall zu minimieren. Dieser Ansatz ermöglicht auch die Schaffung eines geschlossenen Kreislaufsystems.

Eine weitere Möglichkeit die Lebensdauer zu erhöhen stellt die Beschichtung mit spezifischen Schutzeigenschaften dar. Ein Beispiel dafür ist Frostschutz-Beschichtungen, welche die strukturelle Integrität des Materials langfristig erhalten. Die Integration solcher Beschichtungen in den Funktionalisierungsprozess können somit der Nachhaltigkeit von Materialien zugute kommen, sowie den Ressourcenverbrauch minimieren.

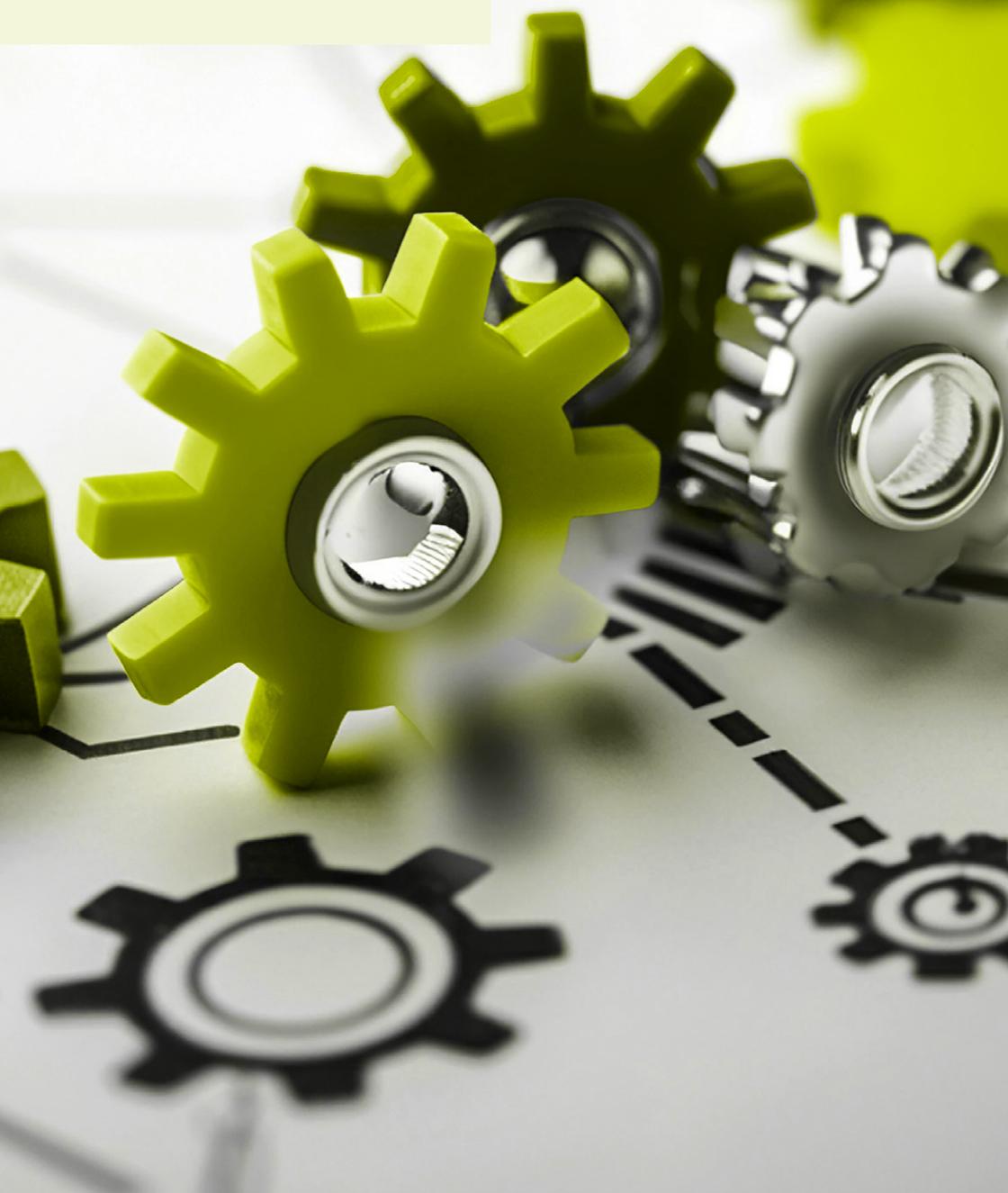
Als Teil der Betrachtung in diesem Whitepaper werden wir jedoch nicht nur nachhaltige Funktionalisierungsmöglichkeiten im herkömmlichen Sinne untersuchen. In unserer Analyse wollen wir darüber hinaus die Möglichkeiten biologischer Alternativen herausstellen. Der Einsatz von biotechnologischen Entwicklungen, insbesondere im Kontext der Biofunktionsbausteine, verspricht eine neue Herangehensweise an die Funktionalisierung von Materialien. Diese biologischen Alternativen können hierbei sowohl umweltfreundlicher sein als auch, im Vergleich zu traditionellen Funktionalisierungen, Ressourcen schonen (siehe Kapitel Biofunktionsbausteine als Werkzeugkoffer der Funktionalisierung).

Die Einbindung von biotechnologischen Alternativen in die Funktionalisierung von Titan wird im weiteren Verlauf dieses Whitepapers eine zentrale Rolle spielen. Wir werden untersuchen, wie biologische Technologien einerseits die Leistungsfähigkeit von Titan verbessern können, andererseits neue Standards in puncto Nachhaltigkeit setzen. Damit wollen wir nicht nur den aktuellen Herausforderungen begegnen, sondern auch einen wegweisenden Beitrag zur Entwicklung einer umweltverträglichen und nachhaltigen Materialwissenschaft leisten.

Unsere Aufmerksamkeit gilt hierbei nicht einzig der Gegenwart. Wir betrachten auch die Zukunft. Die Prognose und Gestaltung zukünftiger Entwicklungen in Bezug auf die Funktionalisierung von Titan sind von herausragender Bedeutung. Daher werden wir einen Blick auf die Jahre 2030 und 2038 werfen, um potenzielle Anwendungsbereiche, Herausforderungen und Chancen zu identifizieren.



# METHODIK



## STRUKTUR DER ZUKUNFTSSTUDIE

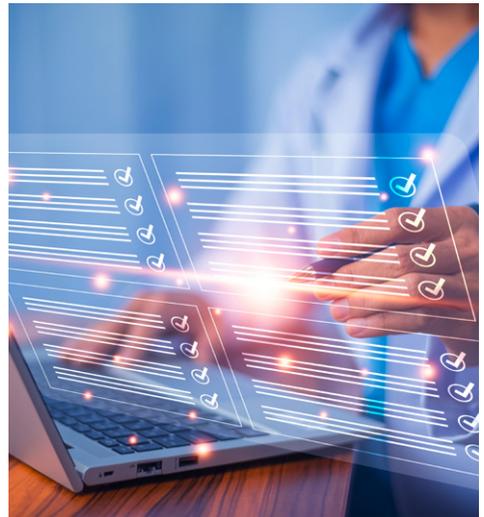
Zur Ermittlung kritischer Zukunftsprojektionen und deren Validierung durch verschiedene Expertengruppen wurde eine Online-Echtzeit-Delphi-Studie durchgeführt (Beiderbeck et al. 2021)<sup>1</sup>. Diese bewährte Methode ermöglicht es, Meinungen von Experten in verschiedenen Runden digital zu konsolidieren und einen Konsens herbeizuführen.

Um die Komplexität und Vielschichtigkeit der zu untersuchenden Technologien zu bewältigen, wurden mehrere Delphi-Studien parallel durchgeführt, verglichen und zusammengeführt. Dieser letzte Schritt des Zusammenführens erfolgte durch eine eigenständige Delphi-Studie, an welcher Experten zu vier Materialien: Stahl, Glas, Holz und Titan gemeinsam teilnahmen. So konnten verschiedene Nachfragebereiche abgedeckt und eine gemeinsame Zukunftsperspektive entwickelt werden. Dieser aufwendige Prozess ermöglichte es uns, zukünftige branchen- und materialspezifische Szenarien für eine innovative Technologie wie Biofunktionsbausteine zu entwickeln.

Unser konkretes Vorgehen war wie folgt:  
Wir führten 14 Interviews (insgesamt über elf Stunden) mit verschiedenen Material- und Funktionalisierungsexperten durch, die jeweils auf ein oder mehrere Materialien spezialisiert

waren. Diese Interviews wurden sorgfältig dokumentiert und mit einer umfassenden Literaturrecherche sowie internen Workshops abgeglichen. Dadurch ergaben sich 145 potenziell zu betrachtende Zukunftsprojektionen, von denen sich 18 als besonders relevant erwiesen. Diese Projektionen folgten alle dem gleichen Aufbau, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten:

**„Die gewählte Funktionalisierung auf der Materialoberfläche wird im Vergleich zu heute deutlich (>25%) häufiger eingesetzt.“**



<sup>1</sup> Beiderbeck, D., N. Frevel, H. A. von der Gracht, S. L. Schmidt, and V. M. Schweitzer. 2021. Preparing, conducting, and analyzing Delphi surveys: Cross-disciplinary practices, new directions, and advancements. *MethodsX* 8:e101401.

Folgende Kombination aus Funktionalisierungen und Materialien wurden betrachtet:

	Antifouling	Feuchtigkeitsabweisend	Frostschutz	Kleben und Lösen	Korrosionsschutz	Schaltbare Transmission	Sensorik	Superhydrophobizität	UV-Schutz	Zelladhäsion
Stahl	X		X	X		X				
Glas		X	X		X	X	X			
Holz	X	X	X			X		X		
Titan		X	X			X				X

Mit einem Fokus auf den identifizierten Funktionalisierungen aus Schritt 1 wurden in zwei Workshops, zwei Interviews mit Biofunktionsbaustein-Experten sowie ständiger Rücksprache mit den Technologieentwicklern im Rheinischen Revier Hürden und Potenziale der Technologie ermittelt und Projektionen für ihre zukünftige Entwicklung abgeleitet.

Die 18 ausgewählten Projektionen wurden für die Jahre 2030 und 2038 sowie für konventionelle und nachhaltige Umsetzung bewertet. Diese Zeiträume wurden aufgrund nationaler Strategien zur Erreichung von Klimazielen ausgewählt (BMBF

2010; BMEL 2020; BMW 2020)<sup>2</sup>. Insgesamt ergaben sich so für alle vier Materialien 72 Projektionen, welche jeweils verschiedene Aspekte wie zukünftige Nutzung, Auswirkungen auf die Industrie, Gewünschtheit der Technologie und zukünftige Anwendungsgebiete umfassten. Diese Bewertung erfolgte durch insgesamt 69 Experten der Materialien (Stahl, Glas, Holz und Titan) und des Themenfelds Adhäsion. Einzelne Fragen wurden hierbei von 5 bis 30 Experten beantwortet.

Insgesamt 16 Biofunktionsbaustein-Experten bewerteten die Umsetzung der zehn

<sup>2</sup> BMBF, Bundesministerium für Bildung und F. 2010. Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030 - Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft. Publikationen der Bundesregierung: 1-54.

BMEL, Bundesministerium für Ernährung und L. 2020. Nationale Bioökonomiestrategie. Publikationen der Bundesregierung: 1-68.

BMW, Bundesministerium für Wirtschaft und E. 2020. Wirtschaft nachhaltig gestalten - Zweiter Ressortbericht Nachhaltigkeit des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Publikationen der Bundesregierung: 1-44.

<sup>3</sup> Freyer, K. W. & Antons, D. (2024): Die Zukunft der Funktionalisierung von Stahl – Neue Chancen durch bioökonomische Innovationen. Aachen, Institut für Technologie- und Innovationsmanagement. Antons, D.; Dienhart, C.; Freyer, K. W.; Nasgowitz, C.; Salge, T.-O.; Selzner, P. (Hrsg.): Blickpunkt Bioökonomie, 1A.

Freyer, K. W. & Antons, D. (2024): Die Zukunft der Funktionalisierung von Glas – Neue Chancen durch bioökonomische Innovationen. Aachen, Institut für Technologie- und Innovationsmanagement. Antons, D.; Dienhart, C.; Freyer, K. W.; Nasgowitz, C.; Salge, T.-O.; Selzner, P. (Hrsg.): Blickpunkt Bioökonomie, 1B.

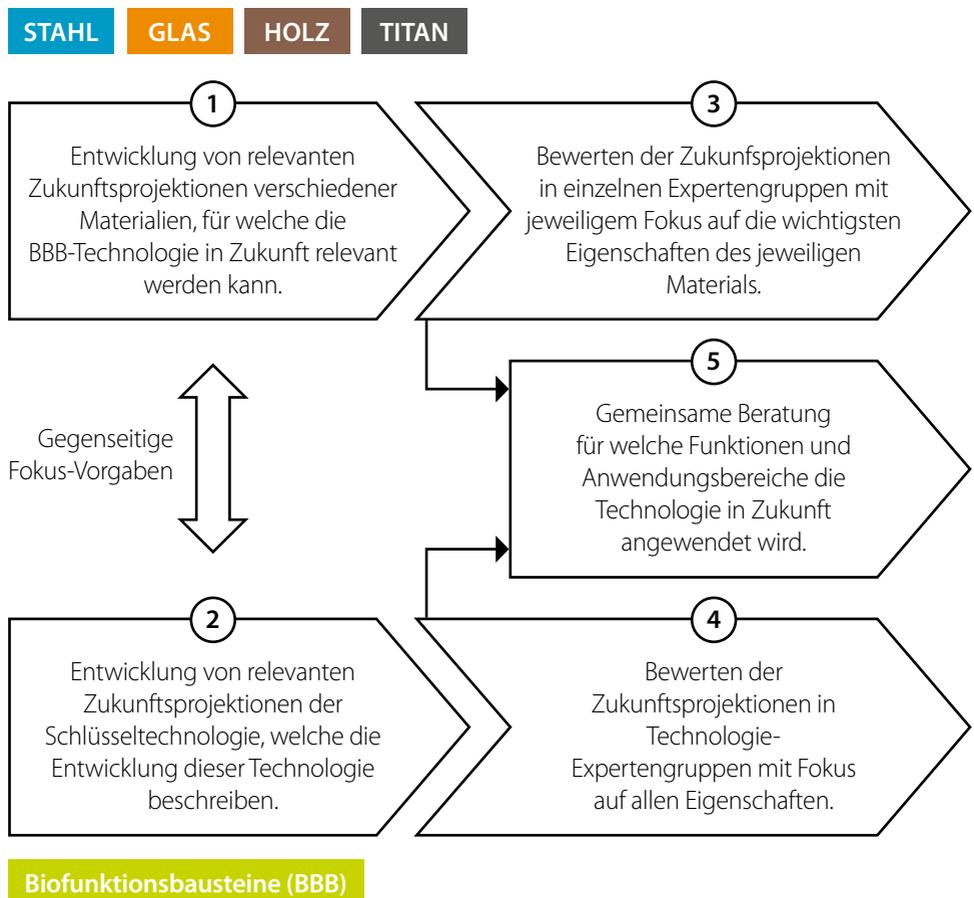
Freyer, K. W. & Antons, D. (2024): Die Zukunft der Funktionalisierung von Holz – Neue Chancen durch bioökonomische Innovationen. Aachen, Institut für Technologie- und Innovationsmanagement. Antons, D.; Dienhart, C.; Freyer, K. W.; Nasgowitz, C.; Salge, T.-O.; Selzner, P. (Hrsg.): Blickpunkt Bioökonomie, 1C.

verschiedenen Funktionalisierungen sowie Möglichkeiten ihrer gezielten Aktivierung und Deaktivierung (z. B. Temperatur-, pH- und Elektrizitätsschaltung). Einzelne Fragen wurden hierbei von 8 bis 13 Experten beantwortet.

Alle Expertengruppen bewerteten gemeinsam, ob Biofunktionsbausteine zu einer verstärkten Nutzung der Funktion, zu neuen Anwendungsbereichen, zur Erstnutzung und zu einer nachhaltigeren Nutzung beitragen könnten. Diese Projektionen wurden von 62 Experten bewertet.

Die Abschnitte 3, 4 und 5 erstreckten sich über jeweils 8 Wochen und führten insgesamt zu 80 Konsensfindungen (ausgenommen die Anwendungsgebiete), was der Hälfte der untersuchten Projektionen entsprach.

Auch wenn die Methodik verschiedene Materialexperten vereint, werden im Folgenden nur die Erkenntnisse zum Bereich Titan und die sich darauf beziehen betrachtet. Alle weiteren Erkenntnisse sind in weiteren Whitepapers der Reihe zu finden.<sup>3</sup>



## ERGEBNISSE

Im Rahmen der Studie wurden sowohl Ergebnisse zur Funktionalisierung von Titan als auch zur Nutzung der biologischen Schlüsseltechnologie (Biofunktionsbausteine) zur Funktionalisierung an sich erhoben. Die Ergebnisse werden im Folgenden getrennt untersucht.

# DIE ZUKUNFT DER FUNKTIONALISIERUNG VON TITAN

Die zukünftige Funktionalisierung von Titan lässt sich wie folgt zusammenfassen. Erstens deutet sich an, dass die Anwendungsbereiche von schaltbarem Kleben und Lösen sowie Zelladhäsion<sup>4</sup> zunehmen wird. Der größte industrielle Impact für Titan insgesamt wird das Thema Sensorik<sup>5</sup> haben. Insgesamt lässt sich sagen, dass es bei allen Funktionalisierungen zukünftig eher unwahrscheinlich ist, dass sie mehr als 25% häufiger genutzt werden als heute, dennoch wirken sie sich auf verschiedene Branchen aus.

Trotz der geringeren Wahrscheinlichkeit einer mehr als 25% Zunahme der Funktionalisierungen bis 2030 und 2038 möchten wir einige wichtige Aspekte hervorheben, da diese breite Anwendung finden werden. Insbesondere das Thema Kleben und Lösen wird bereits in frühen Phasen für nachhaltige Funktionalisierungen relevant sein, wobei die Medizintechnik ein Schlüsselanwendungsbereich ist. Darüber hinaus sind auch Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie wahrscheinlich.

Auch das Thema Zelladhäsion gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Industrie, wenngleich es aufgrund des geringeren Anwendungsumfangs – vornehmlich beschränkt auf

die Medizintechnik - von der Sensorik mit einem stärkerem industriellem Einflusspotenzial überholt wird. Besonders interessant ist letzteres im Bereich des Prozessingenieurwesens.

Die Erkenntnisse sind nachfolgend vereinfacht und nach konventioneller und nachhaltiger Funktionalisierung getrennt dargestellt. Der beschriebene Konsens bezieht sich dabei auf das zukünftige Nutzungswachstum im Vergleich zu heute. Bezüglich der Auswirkungen auf die Industrie konnte ein Konsens für 2038 bei der der Sensorik durch Funktionalisierung im Allgemeinen, bei Kleben und Lösen sowie beim Frostschutz festgestellt werden.



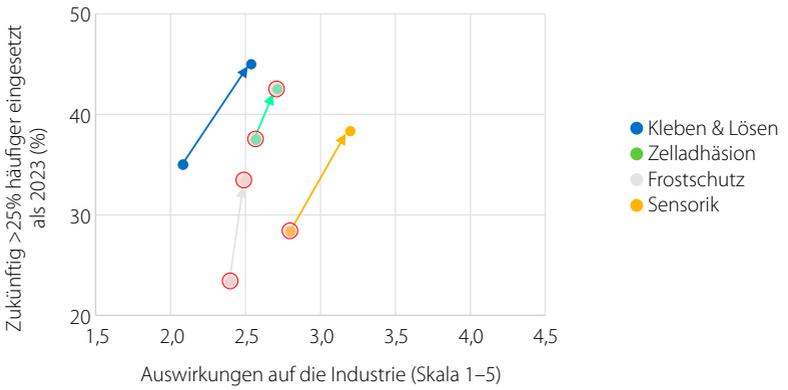
<sup>4</sup> Hierbei wird die Bindung von körpereigenen Zellen an Titan vermittelt

<sup>5</sup> Physikalisch-chemischen Detektion zum Nachweis und zur Messung bestimmter Substanzen oder Reaktionen

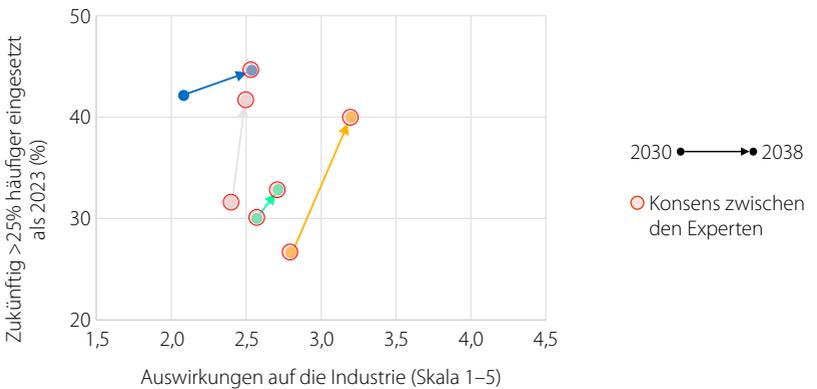
Im weiteren Verlauf werden die gemeinsam betrachteten Anwendungsmöglichkeiten der Biofunktionsbausteine je nach Funktionalisierung umfassend und materialübergreifend behandelt, basierend auf den gemeinsamen Bewertungen aller entsprechenden Experten. In Bezug auf die Titanindustrie lässt sich jetzt schon fol-

gendes festhalten: Die Akzeptanz der Biofunktionsbaustein-Technologie wird maßgeblich durch medizinische Zulassungen bestimmt und sich dann primär auf das Feld der Implantat-Industrie beschränken. Hier könnten jedoch sowohl die Eigenschaften Kleben und Lösen, Zelladhäsion als auch Sensorik zum Einsatz kommen.

### Konventionelle Funktionalisierung von Titan



### Nachhaltige Funktionalisierung von Titan



# BIOFUNKTIONSBAUSTEINE ALS WERKZEUGKOFFER DER FUNKTIONALISIERUNG

Biofunktionsbausteine sind eine toolboxartige Innovation, die aus einer Haftkomponente und einer funktionalen Komponente besteht (Schwaneberg and Bergs 2023)<sup>6</sup>. Diese beiden Komponenten können permanent oder temporär miteinander verbunden werden. Die Haftkomponente ist biologischer Natur und besteht aus einer Aminosäurekette, die mit einer Oberfläche durch chemische Wechselwirkungen interagiert. Sie kann natürlich oder künstlich hergestellt sein und ermöglicht Anwendungen in verschiedensten Bereichen, von Diagnostik bis hin zu textilen Anwendungen. Die funktionale Komponente verleiht dem Material physikalische, chemische oder biologische Eigenschaften wie antimikrobielle, fluoreszierende oder korrosionsbeständige Eigenschaften. Die Verbindung dieser Komponenten erfolgt über einen Linker, der spezifisch an beide Komponenten bindet und modulare schaltbare Kombinationen ermöglicht.

Die Biofunktionsbaustein-Technologie hat nicht nur vielfältige wirtschaftliche Anwendungen, sondern auch ökologische Auswirkungen. Die Materialien sind in der Regel biologisch abbaubar und können konventionelle Beschichtungen durch umweltfreundlichere Alternativen ersetzen, was zur Bioökonomisierung beiträgt und Innovationen in verschiedenen Sektoren fördert. Ein Beispiel hierfür wäre die Einsparung von Pflanzenschutzmitteln durch die selektive Anhaftung dieser mittels Biofunktionsbausteine an die Blätter spezifischer Baumarten (Jakob et al. 2017)<sup>7</sup>.

Betrachten wir die Ergebnisse der Zukunftsstudie ergeben sich für die Zukunft der Biofunktionsbausteine vier Szenarien, welche wir besonders hervorheben wollen. Erstens ist es wahrscheinlich, dass sehr viele Funktionalisierungen in Zukunft erfolgreich in Produkte und Prozesse implementiert werden können.



Symbolische Darstellung von Biofunktionsbausteinen nach Vorstellung einer KI (Midjourney)

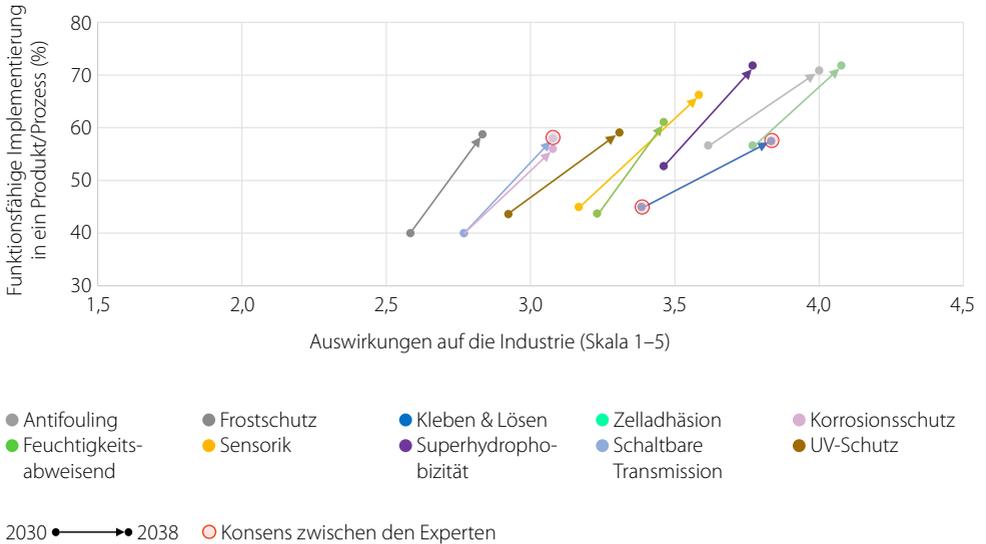
Dies verdeutlicht, welche einen innovativer Anschlag die Technologie erfahren wird. Zweitens werden am wahrscheinlichsten Funktionen implementiert werden können, welche typischerweise biotechnologisch genutzt werden, wie superhydrophobe Eigenschaften, Antifouling oder Zelladhäsion. Drittens scheint die Eigenschaft der Sensorik<sup>8</sup> den größten Schritt im Implementierungsprozess zwischen 2030 und 2038 hinzulegen, welches möglicherweise mit einem Voranschreiten der Industrie 5.0<sup>9</sup> zu erklären ist. Viertens scheint die Funktion des schaltbaren Klebens und Lösen von Materialien laut Biofunktionsbaustein-Experten zwischen 2030 und 2038 die größte Bedeutung für die Industrie zu gewinnen.

Somit liegt diese Eigenschaft in der wirtschaftlichen Bedeutung für die Biofunktionsbausteine knapp hinter der Zelladhäsion und dem Antifouling bzw. knapp vor Superhydrophobizität und Sensorik.

Ausführlicher sind die Erkenntnisse in der nachfolgenden Grafik vereinfacht dargestellt. Der beschriebene Konsens bezieht sich dabei auf die zukünftige Implementierungswahrscheinlichkeit. Bezüglich der Auswirkungen auf die Industrie lag bei der Hälfte der Funktionen ein Konsens vor. Die Pfeile zeigen an, wie sich die zukünftige Implementierungswahrscheinlichkeit einzelner Funktionen von 2030 bis 2038 entwickelt.



## Entwicklung der Funktionalisierung von Biofunktionsbausteinen



Darüber hinaus wurden auch verschiedene Schalter für die Aktivierung und Inaktivierung der Funktion untersucht (pH-, Temperatur-, Enzymatische-, Licht-, Elektrische- und Ultraschall-Schalter). Insgesamt kann gesagt werden, dass die Umsetzung dieser

Schalter stets ähnlich wahrscheinlich ist und 2030 zwischen 35% und 45% liegt. Im Jahr 2038 steigt dies auf 55% bis 65%. Hierbei werden der Enzymatische- und pH-Schalter am wahrscheinlichsten und Ultraschall-Schalter unwahrscheinlicher umgesetzt.

<sup>4</sup> Schwaneberg, U. & Bergs, T., Hrsg. (2023) Biointegrierte Produktion für eine klimaneutrale Kreislaufwirtschaft. Aachen: ABBt & WZL der RWTH Aachen University.

<sup>5</sup> Jakob, F.; Pich, A.; Rubsam, K.; Conrath, U.; Sözer, N.; Schwaneberg U. (2017) Pflanzenschutz- und/oder Pflanzenwachstumsförderungssystem (WO 2016/134806 A1)

<sup>6</sup> Proteine als Sensoren zeigen messbare Reaktionen auf äußere Einflüsse wie Lichtemission, Spannungsänderungen, Molekülbindung oder andere Veränderungen.

<sup>7</sup> Directorate-General for Research and Innovation - European Commission (2022) Industry 5.0 roundtable EU Publications:1-14.

# ZUKÜNFTIGE NUTZUNG VON BIOFUNKTIONS- BAUSTEINEN

Nachdem wir die Entwicklung von Biofunktionsbausteinen betrachtet und den Bedarf in verschiedenen Anwendungsbereichen analysiert haben, richten wir nun unseren Fokus darauf, welche Auswirkungen dies auf die Nutzung von Biofunktionsbausteinen haben wird.

Zu diesem Zweck haben wir nicht mehr materialspezifische Zukunftsprognosen erstellt, sondern Experten zu einer bestimmten Funktionalisierung zusammengeführt (Schritt 5 in der zugrundeliegenden Methodik). Hierfür haben:

- 22 Experten des Titan- und Glasbereichs sowie Experten der Biofunktionsbausteine die Anwendung des Frostschutzes mittels Biofunktionsbausteinen betrachtet.
- 57 Experten aller Materialbereiche, der Biofunktionsbausteine und der Adhesion die Anwendung von Kleben und Lösen mittels Biofunktionsbausteinen betrachtet.
- 15 Titan- und Biofunktionsbausteinexperten die Anwendung der Zelladhäsion mittels Biofunktionsbausteinen betrachtet.
- 43 Experten aller Materialbereiche sowie der Biofunktionsbausteine die Anwendung von Sensorik mittels Biofunktionsbausteinen betrachtet.

Dabei wurden die Experten zu den Bereichen erhöhter Nutzung der Funktion durch Biofunktionsbausteine, Einsatz der Funktion in neuen Anwendungsbereichen durch Biofunktionsbausteine, erstmalige Nutzung der

Funktion durch Biofunktionsbausteine und Veränderung der Nachhaltigkeit durch Biofunktionsbausteine befragt.

Im Folgenden fassen wir die wichtigsten Erkenntnisse für diese Funktionalisierung zusammen.

## **FROSTSCHUTZ**

Die Hauptanwendungsbereiche der Antifrostfunktion über Biofunktionsbausteine liegen im Bauwesen. Die Reduzierung der Toxizität ist Hauptmotivation. Es ist jedoch keine zukünftige Zunahme oder neue Nutzung durch Biofunktionsbausteine absehbar.

## **KLEBEN UND LÖSEN**

Die Recyclingfähigkeit von Materialien wird durch Nutzung des Klebens und Lösen unter Verwendung von Biofunktionsbausteinen verbessert. Schwerpunkt liegt in neuen Anwendungsbereichen. Dies trägt dazu bei, dass Recycling durch Design, das alle Industrien implizit abdeckt, effektiver umgesetzt werden kann.

## **SENSORIK**

Die Hauptanwendungsbereiche der Biofunktionsbaustein-vermittelten Sensorik über Biofunktionsbausteine befinden sich im medizinischen Bereich, insbesondere in der Diagnostik und Analytik. Während Biofunktionsbausteine die Nachhaltigkeit von Sensoren nicht beeinflussen, ermutigen sie dennoch die Entwicklung neuer Anwendungsbereiche.

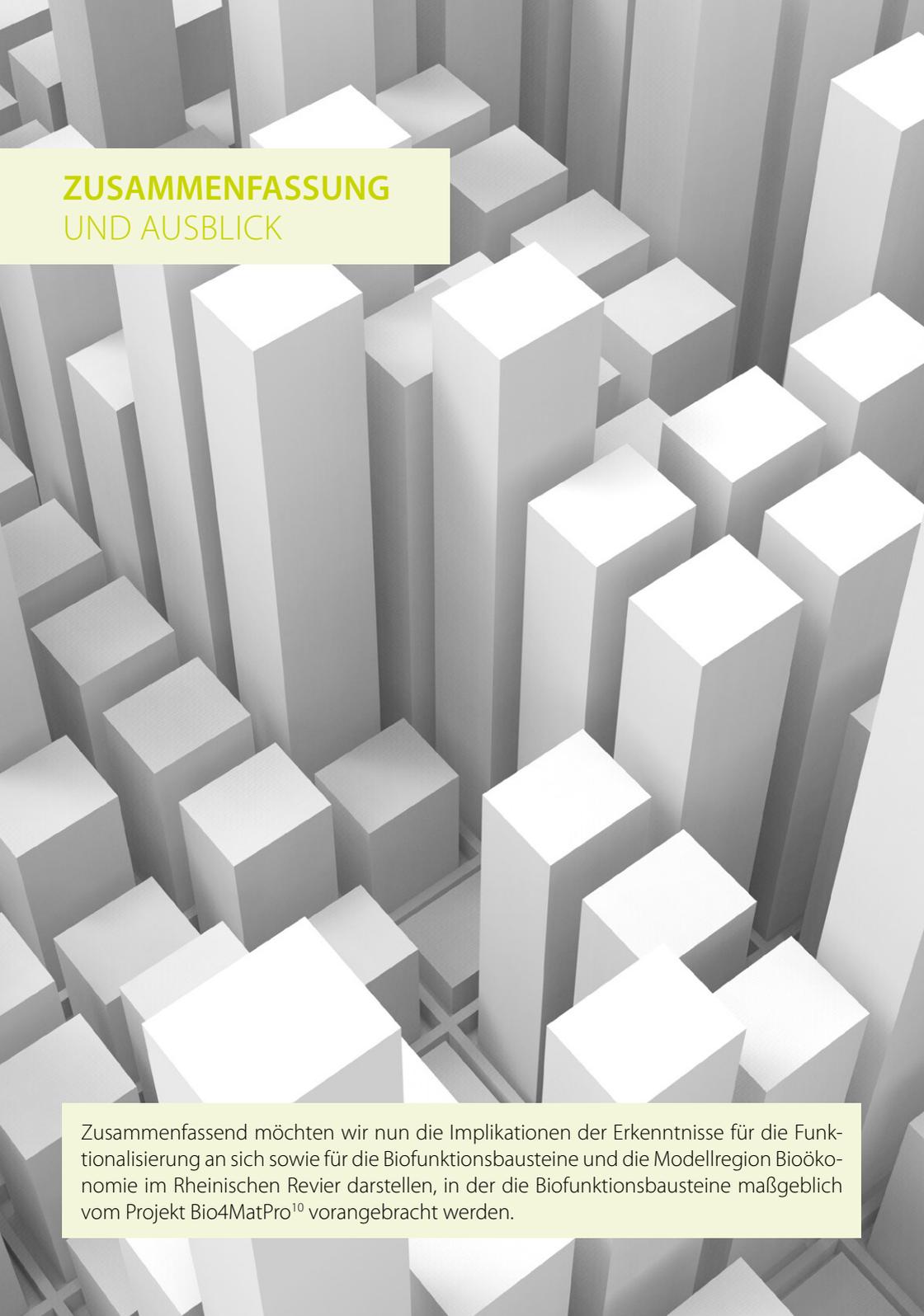
## ZELLADHÄSION

Die Nutzung von Zelladhäsion wird durch Biofunktionsbausteine verstärkt und findet Einzug in neue Anwendungsbereiche. Besonders in der Implantat-Technologie werden Biofunktionsbausteine gezielt eingesetzt, um die Zelladhäsion wesentlich zu ermöglichen, insbesondere in Verbindung mit wachstumsfördernden oder antiinfektiven Substanzen.

Ein oft genanntes Kernproblem ist die Unsicherheit bezüglich der Kosten. Aus diesem Grund haben wir die Biofunktionsbaustein-Experten gebeten eine Schätzung bezüglich

der Kosten abzugeben. Die Preisentwicklung ist äußerst schwierig abzuschätzen. Während die Kosten für die Beschichtung einer Monolage von 100 m<sup>2</sup> im Jahr 2030 zwischen 1 und 100 Euro variieren können, wird für das Jahr 2038 eine Spanne von 1 bis 20 Euro erwartet. Die Mehrheit der Experten geht von einstelligen Beträgen je 100 m<sup>2</sup> aus. Biofunktionsbausteine stellen langfristig ein effektives Mittel dar, um mit herkömmlichen Alternativen zu konkurrieren.





## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend möchten wir nun die Implikationen der Erkenntnisse für die Funktionalisierung an sich sowie für die Biofunktionsbausteine und die Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier darstellen, in der die Biofunktionsbausteine maßgeblich vom Projekt Bio4MatPro<sup>10</sup> vorangebracht werden.

Im Rahmen dieser Studie wurde deutlich, dass sich Biofunktionsbausteinen ähnlich wie viele Schlüsseltechnologien verhalten<sup>11</sup>.

1. Biofunktionsbausteine bieten vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Branchen, wobei ihr Nutzen je nach Markt stark variieren kann. Beispielsweise werden sie bei Titan in der Implantat-Technologie für innovative Lösungen eingesetzt, die ohne Biofunktionsbausteine nicht realisierbar wären. In anderen Bereichen wie dem Antifouling (Fokus auf Stahl und Holz) sind sie aufgrund ihrer Nachhaltigkeit gefragt, während sie im Recycling Materialübergreifend zur Vereinfachung beitragen oder auf branchenspezifische Expertise, wie in der Theragnostik im Glasbereich, aufbauen können.

2. Etablierte Unternehmen zeigen sich zögerlich, bestehende Produkte und Lösungen durch Biofunktionsbausteine zu ersetzen, es sei denn, es liegen Neuerungen oder dringende Veränderungen vor. Beispielsweise wird die Biofunktionsbaustein-Technologie im Bereich Korrosionsschutz trotz potenzieller Nachhaltigkeitsverbesserungen kaum Verbreitung finden. Bei einem starken Druck, nachhaltiger zu werden und einem Mangel an Alternativen, wie beim Antifouling, können Biofunktionsbausteine jedoch eine begehrte Option darstellen.

3. Biofunktionsbausteine bieten großes Potenzial für Allianzen, in denen die Technologie als Rohstoff in verschiedenen Lieferketten integriert werden kann. Hierbei wird die Technologie extern entwickelt und produziert und dann spezifischen Partnern angeboten. Die Integration komplementärer Anlagen ist dabei entscheidend.

4. Um wettbewerbsfähige Preise im Vergleich zu herkömmlichen Produkten zu erzielen, sind Prozessentwicklungen zur Erzielung von Größenvorteilen in der Produktion unerlässlich. Öffentliche Gelder könnten diese Entwicklung fördern und so auch den strukturellen Wandel in der Region vorantreiben.

5. Zur Durchsetzung der Technologie sind weitere komplementäre und nachgelagerte Prozessinnovationen erforderlich. Es gilt bereits jetzt zu überlegen, wie die Technologie die Anwendung von Produkten oder das Produkt selbst verändert und wie diese Erkenntnisse zur Verbesserung der komplementären Technologie<sup>12</sup> genutzt werden können.

6. Die wichtigste Erkenntnis ist jedoch, dass Biofunktionsbausteine langfristig in vielen Bereichen neuen Wert schaffen, neue Anwendungen ermöglichen und die Funktionsgrenzen verschieben können. Dies wurde in verschiedenen Bereichen deutlich herausgestellt und unterstreicht das Potenzial der Biofunktionsbaustein-Technologie.

---

<sup>8</sup> [www.bio4matpro.rwth-aachen.de](http://www.bio4matpro.rwth-aachen.de)

<sup>9</sup> Maine, E. & Garnsey, E. (2006). Commercializing generic technology: The case of advanced materials ventures. *Research Policy* 35(3): 375-393.

<sup>10</sup> Technologie, die durch die Verwendung von Biofunktionsbausteinen funktionalisiert wird, um deren Leistung zu verbessern, ihre Anwendung zu erweitern oder sie effektiver zu gestalten.

Was bedeutet dies nun für die Entwicklung der Biofunktionsbausteine?

Die Entwicklung der Biofunktionsbausteine erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung der Implementierungsmöglichkeiten für angestrebte komplementäre Technologien. Die parallele Entwicklung von komplementären Technologien ist entscheidend, um eine erfolgreiche Anpassung sicherzustellen.

Was bedeutet das für Anwender?

Biofunktionsbausteine stellen eine vielseitige Technologie dar, die sich in vielen Bereichen durchsetzen wird. Sie bieten das Potenzial, spezifische Lösungen für individuelle Probleme anzubieten. Anwender sollten daher mittelfristig die Nutzung von Biofunktionsbausteinen als mögliches Lösungsinstrument in Betracht ziehen.

Was bedeutet dies für das Rheinische Revier?

Die Biofunktionsbaustein-Technologie birgt ein breites Potenzial, das sich in verschiedenen Bereichen entfalten kann. Die Integration dieser Technologie in eine Vielzahl von Anwendungsgebieten könnte die Weiterentwicklung bestehender Produkte vorantreiben und einen Wettbewerbsvorteil für die Region schaffen, was zu einer Steigerung der regionalen Wirtschaft und zur Schaffung neuer Arbeitsplätze führen könnte. Eine gezielte Förderung der Entwicklung und Integration dieser Technologie in der Region ist daher anzustreben, obwohl theoretisch die Vorteile dieser Technologie in allen geographischen Regionen genutzt werden könnten.





