

# Entwicklung eines biologisch inspirierten adaptiven Gelenksystems

---

Förderkennzeichen: 13FH150PX8 (FHprofUnt 2018)

Förderzeitraum: 01.11.2019 – 30.09.2024

Antragsteller: Hochschule Bremen – City University of Applied Sciences, Bionik-Innovations-Centrum

Projektleitung: Prof. Dr. Jan-Henning Dirks

## **Teil I - Kurzbericht**

### **Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand**

Das Projekt „Entwicklung eines biologisch inspirierten adaptiven Gelenksystems“ (BIAG) hatte das Ziel, biologische Prinzipien der Beweglichkeit und Stabilität von Seesternen auf technische Anwendungen zu übertragen. Seesterne besitzen ein außergewöhnliches Endoskelett, das es ihnen ermöglicht, ihre Körperstruktur gezielt zu versteifen oder zu lockern, ohne zusätzlichen Energieaufwand. Diese Eigenschaft inspirierte die Entwicklung eines adaptiven Gelenksystems, das seine mechanischen Eigenschaften gezielt verändern kann.

Die Forschung knüpfte an bestehende Erkenntnisse der Bionik, Materialwissenschaft und Soft Robotics an und zielte darauf ab, eine Technologie zu entwickeln, die anpassungsfähige mechanische Eigenschaften mit Energieeffizienz kombiniert. Bestehende morphende Materialien sind häufig auf komplexe externe Steuermechanismen angewiesen, während natürliche Systeme eine passive Stabilisierung ermöglichen. Die Herausforderung bestand darin, diese biologischen Prinzipien in technische Anwendungen zu überführen.

### **Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt wurde in mehreren aufeinander aufbauenden Phasen durchgeführt. Zunächst wurden mikrostrukturelle Analysen der Seestern-Ossikel mittels hochauflösender mikroCT-Scans und Finite-Elemente-Analysen durchgeführt. Ziel war es, die biomechanischen Eigenschaften der Ossikel zu verstehen und ihre Anpassung an mechanische Belastungen zu erfassen.

Auf Basis dieser biologischen Erkenntnisse wurden technische Prototypen entwickelt. Die erste Generation bestand aus 3D-gedruckten thermoplastischen Gitterstrukturen, eingebettet in eine flexible Silikonhülle. Diese Struktur wurde so konzipiert, dass sie durch äußere Stimuli ihre mechanischen Eigenschaften verändern konnte. Im weiteren Verlauf wurde ein Steuermechanismus mit Heizdrähten integriert, um gezielt Temperaturänderungen zur Anpassung der Steifigkeit zu nutzen. Zusätzlich wurde ein pneumatisches Aktuatorssystem entwickelt, das eine aktive Formveränderung ermöglichte.

## Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit

Das Projekt führte zur erfolgreichen Entwicklung und Patentierung eines technisch übertragbaren morphenden Gelenksystems, welches sich durch gezielte thermische oder pneumatische Steuerung verändern kann. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden bislang in zwei peer-reviewed wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht:

- *Raman et al. (2024): "A starfish-inspired 4D self-healing morphing structure"* in *Scientific Reports*. Diese Arbeit beschreibt ein selbstheilendes morphendes Gelenk, das Formgedächtnis und energieeffiziente Verformung kombiniert.
- *Raman et al. (2025): "The ultrastructure of the starfish skeleton is correlated with mechanical stress"* in *Acta Biomaterialia*. Diese Studie zeigt eine Korrelation zwischen mechanischer Belastung und ultrastrukturellen Anpassungen im Seestern-Skelett.

Zusätzlich wurden die Ergebnisse vom Projektteam regelmäßig auf internationalen Konferenzen wie der Society for Experimental Biology (SEB) sowie der International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (ICMoBT) 2023 präsentiert. Eine zum Projektabschluss erstellte umfassende Freedom-to-Operate (FTO)-Analyse zeigte, dass keine bestehenden Schutzrechte die Umsetzung der entwickelten Technologie einschränken, sodass eine zukünftige Kommerzialisierung möglich ist.

Die Projektergebnisse tragen somit nachweislich wesentlich zur Weiterentwicklung biologisch inspirierter, morphender Materialien bei und eröffnen neue Möglichkeiten für adaptive, energieeffiziente Strukturen in technischen und medizinischen Anwendungen.

**Schlussbericht zum Verwendungsnachweis (Teil II)**

# Entwicklung eines biologisch inspirierten adaptiven Gelenksystems

---

Förderkennzeichen: 13FH150PX8 (FHprofUnt 2018)

Förderzeitraum: 01.11.2019 – 30.09.2024

Antragsteller: Hochschule Bremen – City University of Applied Sciences, Bionik-  
Innovations-Centrum

Projektleitung: Prof. Dr. Jan-Henning Dirks

## **Inhaltsverzeichnis**

Teil II: Eingehende Darstellung<sup>2</sup>

Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung<sup>2</sup>

Beurteilung der Meilensteine<sup>4</sup>

Wesentliche Positionen des zahlenmäßigen Nachweises<sup>6</sup>

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten<sup>9</sup>

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse<sup>9</sup>

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen<sup>10</sup>

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse<sup>10</sup>

Innovationspotenzial und Vorteile gegenüber bestehenden Lösungen<sup>13</sup>

Literatur<sup>16</sup>

## Teil II: Eingehende Darstellung

### Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung

Ziel des BIAG-Projekts war die Entwicklung eines biologisch-inspirierten adaptiven Gelenk-Systems als Alternative zu herkömmlichen Gelenken. Hierzu wurden wie geplant zwei grundlegende Fragen beantwortet:

#### **1. Wie können zwei oder mehr Elemente formstabil miteinander verbunden werden, so dass trotzdem eine situative Geometrieanpassung möglich ist?**

Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Lösungsansätze untersucht, um eine formstabile, aber gleichzeitig adaptiv verformbare Verbindung zwischen zwei oder mehreren Elementen zu realisieren. Die entwickelten morphenden Strukturen basieren auf biologisch inspirierten Prinzipien, insbesondere der Skelettstruktur von Seesternen (Ossikel), die eine passive mechanische Stabilität mit gezielter Verformbarkeit kombinieren.

Die Lösung erfolgte durch die Kombination dreier wesentlicher Komponenten:

- Ein 3D-gedrucktes, thermoplastisches Verstärkungsnetz, das die mechanische Stabilität der Struktur sichert und eine gezielte Formanpassung ermöglicht.
- Eine elastische Silikonummantelung, die eine gleichmäßige Kraftverteilung ermöglicht und als flexible Matrix fungiert.
- Integrierte Widerstandsheizdrähte, die durch gezielte Erwärmung der thermoplastischen Struktur eine temporäre Anpassung der Steifigkeit ermöglichen.

Erste Versuche mit rein mechanischen Verbindungskonzepten zeigten, dass konventionelle elastische Elemente entweder nicht ausreichend reversibel oder mechanisch zu instabil waren. Durch die Kombination von thermomechanischer Steuerung und einem reversiblen elastischen Verhalten konnte eine kontrollierte Formanpassung realisiert werden, die sich nach einer Änderung der Umgebungsbedingungen wieder stabilisiert.

Zusätzlich wurden im Rahmen einer Masterarbeit (Sixt, 2023) modulare Verbindungssysteme für Softrobotik entwickelt. Dabei wurden zwei Mechanismen untersucht:

1. Discontinuous Annular Snap Fit (DASF) – ein ringförmiges mechanisches Verbindungssystem.
2. Post and Dome (PD) – eine modulare Verbindung mit kuppelartigen Strukturen für erhöhte Haltekraft.

Tests zeigten, dass der PD-Mechanismus eine hohe Haltekraft bietet, sich jedoch reversibel lösen lässt. Diese Erkenntnisse führten dazu, dass modulare Verbindungen mit energieeffizienter Anpassungsfähigkeit in Prototypen der morphenden Strukturen integriert wurden.

## **2. Gibt es für Verbindungselemente in komplexen technischen Strukturen wie z.B. „morphenden Strukturen“ biologisch inspirierte Alternativen zu reibungsminimierten klassischen Gelenken?**

Ja, das BIAG-Projekt konnte zeigen, dass die Konstruktion von biologisch inspirierte Gelenke ohne klassische Dreh- oder Gleitlager im Labormaßstab grundsätzlich möglich ist und dass sich natürliche Prinzipien für morphende Strukturen adaptieren lassen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Gelenken, die auf reibungsminimierten Rotationsachsen basieren, wurde ein neuartiger Ansatz entwickelt, der auf einer lokalen Steifigkeitsmodulation beruht.

Die biologische Inspiration stammt aus der Ossikelstruktur von Seesternen, die es ermöglicht, mechanische Eigenschaften ohne klassische Gelenkmechanismen zu verändern. Übertragen auf die technische Umsetzung wurde eine Struktur entwickelt, die sich durch thermische Aktivierung gezielt verformen und stabilisieren lässt.

Zusätzlich wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Rawert, 2023) ein weicher pneumatischer Aktuator für morphende Strukturen entwickelt. Durch die Implementierung sogenannter PneuNet-Aktuatoren konnte eine aktive, fließende Formanpassung realisiert werden, die mechanisch belastbar ist, ohne auf starre Drehgelenke angewiesen zu sein.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem BIAG-Ansatz sind:

1. Morphende Strukturen können durch lokale Steifigkeitsmodulation anstatt durch rotierende Gelenke gesteuert werden.
2. Durch den Einsatz von pneumatischen Aktuatoren lassen sich organische, fließende Bewegungen realisieren, ähnlich wie in biologischen Systemen.
3. Kombinationen aus thermischer Steuerung, adaptiven Materialien und modularen Verbindungssystemen ermöglichen die Konstruktion komplexer morphender Strukturen ohne reibungsminimierte Drehgelenke.

## Beurteilung der Meilensteine

Zur Laufzeitmitte des BIAG-Projekts sollte nach 18 Monaten nach Projektstart als Meilenstein ein abstrahiertes und technisch realisierbares Konzept zur Konstruktion eines morphenden Gelenks erstellt werden.

Dies bedeutete:

1. Eine biologische Analyse von Vorbildern, um relevante Mechanismen für die Umsetzung zu identifizieren.
2. Die Abstraktion der biologischen Prinzipien in ein technisches Modell.
3. Die erste experimentelle Validierung der Machbarkeit.

### 1. Biologische Analyse und Selektion des Modells

Zu Beginn des Projekts wurde eine umfassende microCT-Analyse und biomechanische Untersuchung von Insektengelenken und Seestern-Ossikeln durchgeführt. Die Gelenke von Insekten waren in diesem Zusammenhang aufgrund einer hohen internen Komplexität ein weniger geeignetes biologisches Vorbild. Zusätzliche aufwändige histologische Studien wären notwendig gewesen, um die Funktionsprinzipien abstrahieren zu können. Für die Seestern-Ossikel konnte hingegen gezeigt werden, dass diese Strukturen eine passive mechanische Stabilität mit gezielter Verformbarkeit kombinieren, was sie im BIAG Projekt als Vorbild für morphende Gelenke besonders geeignet macht.

**Erfüllt:** Die biologischen Grundlagen wurden erfolgreich erarbeitet.

### 2. Technische Abstraktion und Umsetzung in ein Funktionsmodell

Erste Konzepte zur Realisierung eines Seestern-inspirierten Gelenks wurden entwickelt. Die Untersuchungen zur mechanischen Belastbarkeit und Steuerbarkeit führten dazu, dass immer wieder verschiedene Materialkombinationen für die Struktur erprobt wurden. Dabei wurden 3D-gedruckte thermoplastische Verstärkungsnetze in einer flexiblen Matrix integriert, um eine steuerbare Morphing-Funktion zu ermöglichen. Die Suche nach geeigneten Materialkombinationen und die gleichzeitige Entwicklung von geeigneten Herstellungs- und Prozessparametern war zeitaufwändiger als ursprünglich geplant, konnte jedoch erfolgreich abgeschlossen werden. Die abschließend beste Lösung war die Einbettung von PLA-gedruckten Elementen in einer Silikonmatrix unter Verwendung von thermisch leitenden Zusätzen in der Matrix.

**Erfüllt:** Eine funktionale technische Umsetzung basierend auf der biologischen Analyse wurde entwickelt.

### **3. Erste experimentelle Validierung der technischen Umsetzung**

Die ersten Prototypen wurden mechanisch getestet, wobei thermische Aktivierung und strukturelle Stabilität im Fokus standen. Dabei traten Herausforderungen auf, insbesondere bei der Haftung zwischen 3D-gedruckten Thermoplasten und der Silikonmatrix. Diese Probleme führten zu einer weiteren Anpassung der Materialauswahl, wobei alternative Vorbehandlungen der Silikonoberfläche getestet wurden. Trotz dieser Herausforderungen konnte das grundlegende Funktionsprinzip schließlich experimentell nachgewiesen werden.

**Teilweise erfüllt:** Die Validierung war erfolgreich, aber weitere Optimierungen waren notwendig.

Das geplante Meilensteinziel des BIAG-Projekts wurde trotz zeitlicher Verzögerungen somit inhaltlich erreicht, da:

- Ein biologisch inspiriertes Prinzip identifiziert und technisch abstrahiert wurde.
- Ein technisch realisierbares Konzept für ein morphendes Gelenksystem vorlag.
- Erste Prototypen gefertigt und experimentell getestet wurden.

Jedoch zeigten sich Herausforderungen bei der Materialintegration und der mechanischen Stabilität, die nach den ersten 18 Monaten weiter optimiert werden mussten. Somit kann festgehalten werden, dass der Meilenstein in seinen Kernanforderungen erfüllt wurde, aber einige technische Detailfragen wie z.B. Gitter-Matrix-Interaktion, thermische Stabilität und graduelle Steifigkeit der Struktur erst in der zweiten Projektphase vollständig gelöst werden konnten.

Im Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung konnten somit alle zentralen wissenschaftlichen und technischen Ziele erreicht werden. Die Entwicklung verlief jedoch in einigen Aspekten anders als geplant:

1. Die angedachte technische Umsetzung von Strukturen aus Arthropodengelenken wurde verworfen, um sich auf Seestern-Ossikel zu konzentrieren.
2. Die Steuerung der mechanischen Eigenschaften erfolgte nicht ausschließlich durch Materialkompositionen, sondern durch gezielte thermische Aktivierung mittels Heizdrähten und pneumatischer Aktuatoren.

3. Der Fokus auf industrielle Anwendungen beschränkte sich nicht nur auf die Luftfahrt sondern betrachtete ebenfalls Medizintechnik, da sich hier große Anwendungspotenziale ergaben.

Zusammenfassend konnten im BIAG-Projekt somit nachweislich neue Alternativen zu klassischen Gelenksystemen entwickelt werden, die auf biologischen Prinzipien beruhen. Die Kombination aus thermomechanischer Verformung, modularen Verbindungsstrukturen und pneumatischen Aktuatoren stellt eine alternative und realisierbare Strategie dar, um morphende Strukturen ohne klassische Rotationsgelenke zu realisieren.

## Wesentliche Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

**Personalkosten:** Ein erheblicher Anteil der Mittel wurde wie geplant zur Finanzierung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters (Doktoranden) und studentischer Hilfskräfte verwendet, insbesondere für die experimentelle Forschung und Materialcharakterisierung. Der im Projekt eingestellte Doktorand wird in den nächsten Wochen seine Doktorarbeit einreichen. Besonders hervorzuheben ist die Bedeutung der Mitarbeit der studentischen Hilfskräfte für dieses Projekt in der Konstruktion und Charakterisierung der verschiedenen Funktionsmodelle und der Auswertung von komplexen 3D-Daten. Diese Tätigkeiten waren arbeitsintensiver als ursprünglich geplant.

**Ausstattung und Materialkosten:** Die im Rahmen des BIAG-Projekts eingesetzten finanziellen Mittel wurden gezielt für die Beschaffung und Nutzung spezialisierter Geräte und Materialien verwendet, die für die experimentelle Forschung und die Entwicklung der biologisch inspirierten adaptiven Gelenkstrukturen erforderlich waren. Diese Investitionen ermöglichten eine umfassende wissenschaftliche Analyse und eine gezielte Optimierung der entwickelten Prototypen. Im Folgenden werden die wesentlichen beschafften Komponenten der Geräteliste detailliert beschrieben:

**microCT-System (Idf Nr. 1):** Das beschaffte microCT-System Skyscan 1275 stellte eine zentrale Forschungsinfrastruktur für die Untersuchung der biologischen Vorbilder und der entwickelten morphenden Strukturen dar. Es wurde eingesetzt, um hochauflösende Scans biologischer Referenzstrukturen (Seestern-Ossikel) durchzuführen, um deren interne Architektur und strukturelle Anpassung an mechanische Belastungen zu analysieren. Weiterhin erfolge ein Einsatz, um experimentelle Proben der entwickelten morphenden Materialien zu charakterisieren und potenzielle Materialfehler oder strukturelle Deformationen sichtbar zu machen. Zudem wurden vergleichende Analysen zwischen biologischen und technischen Strukturen durchgeführt, um die Effizienz der biomimetischen Übertragung zu bewerten. Die Möglichkeit, interne Strukturen

zerstörungsfrei zu untersuchen, war entscheidend für die Entwicklung der adaptiven Gelenkstrukturen, da so gezielte Designmodifikationen basierend auf realen Belastungsszenarien vorgenommen werden konnten. Zusätzliche Messungen der Ossikel-Ultrastruktur wurden in Zusammenarbeit mit dem MAPEX Gerätezentrum an der Universität Bremen durchgeführt (MAPEX Core Facility for Materials Analytics, DFG project no. 434618658). Das im Projekt beschaffte microCT Gerät wird nach Projektende weiterhin für wissenschaftliche Zwecke verwendet.

**Hochleistungsrechner zur Datenanalyse (Ild. Nr. 2):** Für die Analyse der experimentellen Daten, die Verarbeitung der mikroCT-Scans und die numerische Simulation der entwickelten Strukturen wurde leistungsfähige Hardware beschafft. Diese umfasste primär einen Hochleistungs-Rechner mit leistungsstarken GPUs, welcher für die Auswertung der komplexen 3D-Daten sowie die Durchführung von Finite-Elemente-Simulationen (FEA), mechanische Modellierungen und die Analyse experimenteller Messdaten benötigt wurde. Der Rechner wird nach Projektende weiterhin für wissenschaftliche Zwecke verwendet.

**Kraftmessdosen (Ild. Nr. 3):** Zur präzisen mechanischen Charakterisierung der entwickelten morphenden Strukturen wurden hochauflösende Kraftmessdosen eingesetzt. Diese wurden verwendet, um die langfristige Belastbarkeit und Steifigkeitsänderungen der morphenden Strukturen unter definierten Kräften zu quantifizieren und mit den erwarteten Parametern (z.B. durch FEM-Modellierungen) zu vergleichen. Die Messungen trugen wesentlich dazu bei, die mechanischen Eigenschaften der entwickelten Prototypen zu optimieren und die funktionale Übertragbarkeit der biologischen Prinzipien auf technische Systeme nachzuweisen. Die Kraftmessdosen unterlagen einem benutzungsabhängigen Verschleiß und mussten entsprechend im Projektverlauf ausgetauscht werden.

**Datenserver (Ild. Nr. 5):** Weiterhin wurde ein RAID-Server mit hoher Speicherkapazität beschafft, auf dem große Datenmengen wie 3D-Modelle, Simulationsdaten und experimentelle Messwerte sicher gespeichert und für alle Projektbeteiligten zugänglich gemacht wurden. Diese projektspezifische IT-Infrastruktur war essenziell für die digitale Verarbeitung der experimentellen Ergebnisse und die Modellierung der mechanischen Eigenschaften der entwickelten Gelenkstrukturen. Die im Projekt erzielten großen Mengen von Forschungsdaten (mehrere Terrabyte) werden auf diesem Server mit einer sehr hohen Ausfallsicherheit für mindestens 10 Jahre gespeichert.

**3D-Druck-Geräte (Ild. Nr. 7):** Ein wichtiger Bestandteil des Projekts war die Nutzung additiver Fertigungstechnologien (3D-Druck) zur Herstellung adaptiver Gelenkstrukturen. Um die Qualität der gedruckten Komponenten zu optimieren, wurden

zur Ergänzung bestehender 3D-Drucker ein Formlabs Cure- und ein Formlabs Wash-System angeschafft. Diese Systeme ermöglichten eine gezielte Nachhärtung und Reinigung der mit dem Stereolithografie (SLA)-Verfahren hergestellten Prototypen. Das Formlabs Wash System war notwendig da nach dem Druckprozess eine gründliche Reinigung der SLA-gedruckten Bauteile erforderlich war, um überschüssiges Harz zu entfernen und eine gleichmäßige Oberfläche der Strukturen zu gewährleisten. Dies war besonders wichtig für die Haftung der elastomeren Silikonummantelung. Das Formlabs Cure Gerät wurde eingesetzt, um die mechanischen Eigenschaften der gereinigten Druckteile durch UV-Nachhärtung zu verbessern. Die thermische und UV-Aushärtung optimierte die Festigkeit der Struktur und sicherte eine reproduzierbare Performance der morphenden Elemente. Durch die Kombination dieser Systeme konnten hochpräzise und stabile morphende Strukturen hergestellt werden, die in mechanischen Testreihen validiert wurden.

**Reisekosten und Konferenzgebühren:** Wie geplant erfolgte nach den zu Projektanfang noch bestehenden Reiseeinschränkungen eine Teilnahme des Projektteams an Fachkonferenzen zur Präsentation der Ergebnisse, darunter die Jahrestagungen der „Society for Experimental Biology“ 2022, 2023, und 2024 sowie die International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues in 2023. Die Präsentationen auf diesen Kongressen haben das Projekt innerhalb des wissenschaftlichen Netzwerks sehr bekannt gemacht und unter anderem auch für wiederholtes nationales und internationales Medieninteresse gesorgt. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Bedeutung der Möglichkeit als gesamtes Projektteam an solchen nationalen und internationalen Veranstaltungen teilzunehmen. Hierdurch entstehen deutliche Synergie-Effekte und das Projekt wird auch durch eine hohe Präsenz und mehrere Vorträge deutlich sichtbarer innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft.

**Kooperationen und externe Dienstleistungen:** Ein Teil der finanziellen Mittel wurde wie beantragt für externe Dienstleistungen genutzt, insbesondere für die Durchführung der Freedom-to-Operate (FTO)-Analyse. Diese wurde von einem spezialisierten Patent- und Technologiebewertungsdienstleister durchgeführt und hatte das Ziel, zum Projektende die aktuelle patentrechtliche Situation im Bereich der entwickelten morphenden Strukturen zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Teil III des Berichts zusammengefasst und bestätigen, dass keine bestehenden Schutzrechte einer wirtschaftlichen Verwertung der BIAG-Technologie entgegenstehen.

Durch diese professionelle Bewertung konnte sichergestellt werden, dass die im Projekt entwickelten Konzepte und Materialien nach aktuellem Stand frei nutzbar sind und ohne rechtliche Einschränkungen für industrielle Anwendungen weiterentwickelt werden

können. Die Zusammenarbeit mit externen Experten ermöglichte eine fundierte Einschätzung der Marktfähigkeit und strategischen Positionierung der BIAG-Technologie.

### **Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die ursprünglichen Ziele des Vorhabens zu erreichen. Die Untersuchung der biologischen Vorbilder war essenziell, um mechanische Prinzipien in die technische Anwendung zu übertragen. Die experimentellen Arbeiten, einschließlich der microCT-Analysen und Materialtests, ermöglichten eine gezielte Optimierung der entwickelten morphenden Strukturen.

Die Umsetzung in Form von Prototypen erforderte eine interdisziplinäre Herangehensweise, da sowohl Kenntnisse aus der Bionik als auch aus der Materialwissenschaft, Robotik und Medizintechnik integriert werden mussten. Durch die Kooperation mit Airbus und die Durchführung der FTO-Analyse konnten zudem zukünftige Verwertungsperspektiven frühzeitig abgesichert werden.

### **Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Das entwickelte morphende Gelenksystem besitzt ein hohes Innovationspotenzial und ist für verschiedene industrielle Anwendungen geeignet:

1. Luftfahrt: Adaptive Tragflächenstrukturen könnten zur Optimierung der Aerodynamik beitragen. Airbus zeigte großes Interesse an der Technologie und prüft eine mögliche Weiterentwicklung für die Luftfahrt in verschiedenen Anwendungsszenarien.
2. Medizintechnik: Die Technologie ermöglicht adaptive Orthesen und Prothesen, die sich an individuelle Patientenbedürfnisse anpassen können. Erste Gespräche mit Medizintechnikunternehmen zur Weiterentwicklung dieser Anwendung haben bereits stattgefunden.
3. Soft Robotics: Die entwickelten Strukturen könnten in flexiblen Robotersystemen eingesetzt werden, um gezielt mechanische Anpassungen zu ermöglichen.

Die weitere Verwertung erfolgt über eine Kombination aus wissenschaftlichen Folgeprojekten (u.A. BMBF VIP+ Antrag) und einer möglichen industriellen Lizenzierung der Technologie an externe Industriepartner.

## **Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Laufzeit des Projekts konnten erwartungsgemäß parallele Entwicklungen in verwandten Forschungsgebieten beobachtet werden. Insbesondere in der Soft Robotics und der Entwicklung bioinspirierter Materialien gab es Fortschritte, die jedoch nicht in direkter Konkurrenz zu den BIAG-Entwicklungen stehen. Es zeigte sich, dass morphende Strukturen zwar zunehmend erforscht werden, jedoch oft auf andere Mechanismen (z. B. flüssigkeitsgesteuerte Systeme) setzen und nicht die Kombination aus passiver mechanischer Anpassung und aktiver Steuerbarkeit bieten. Hier bleibt das BIAG-Projekt einzigartig.

## **Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Das Projekt BIAG hat nachweislich wesentliche wissenschaftliche Fortschritte in der Erforschung und technischen Umsetzung adaptiver Gelenkstrukturen erzielt. Besonders hervorzuheben sind die Erkenntnisse aus den beiden zentralen Publikationen des Projekts in *Acta Biomaterialia* und *Scientific Reports*, welche die wissenschaftliche Grundlage und die technische Umsetzung detailliert beschreiben.

Die Publikation in *Acta Biomaterialia* zeigt die grundlegenden ultrastrukturellen und biomechanischen Eigenschaften der Seestern-Ossikel (Raman et al., 2025). Mittels hochauflösender microCT-Analysen und Finite-Elemente-Simulationen konnte gezeigt werden, dass die innere Porosität der Ossikel direkt mit den mechanischen Belastungen korreliert (siehe Abbildung 1). Im Gegensatz zu bisherigen Annahmen zeigt die Studie, dass diese Porosität über die Lebensdauer eines Seesterns stabil bleibt und nicht durch ontogenetische Anpassungen verändert wird. Diese Erkenntnis ist entscheidend für das Verständnis biologischer Verstärkungsmechanismen und diente als Grundlage für die technische Umsetzung morphender Strukturen.

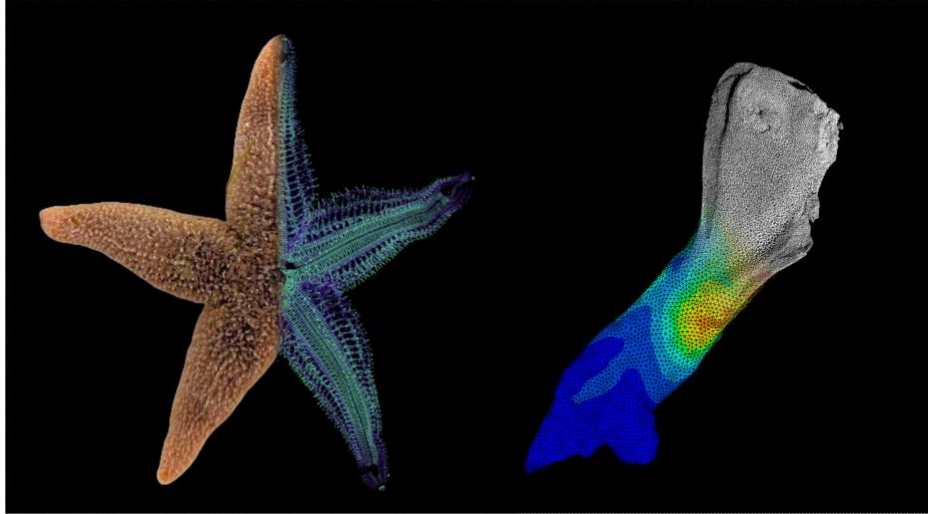


Abbildung 1: Visualisierung der äußeren Morphologie eines Seesterns mit dem komplexen inneren Skelett, welches aus tausenden von kleinen Ossikeln besteht. Diese Ossikel weisen wiederum eine komplexe innere Porosität auf. Im Projektverlauf konnte unter anderem bei der Analyse des Funktionsprinzips gezeigt werden, dass diese innere Struktur mit der mechanischen Belastung der Ossikel korreliert.

Basierend auf diesen biologischen Erkenntnissen beschreibt die eher „technische“ Publikation in *Scientific Reports* das BIAG-Funktionsprinzip und die Entwicklung einer biologisch inspirierten morphenden Struktur, die ihre mechanischen Eigenschaften durch externe Stimuli gezielt verändern kann (Raman et al., 2024a). Durch die Kombination aus 3D-gedruckten thermoplastischen Gitterstrukturen und einer flexiblen Silikonhülle konnte eine adaptive Materialstruktur geschaffen werden, die sowohl formstabil als auch flexibel ist (siehe Abbildung 2). Die Integration von Heizdrähten ermöglichte eine thermische Steuerung der Materialeigenschaften, wodurch die Struktur von einem weichen in einen versteiften Zustand überführt werden konnte. Form in Echtzeit ermöglicht.

Im Rahmen des BIAG-Projekts wurde zudem die zugrundeliegende Erfindung als Schutzrecht angemeldet und das Patent wurde bereits erteilt (Raman et al., 2024b). Das patentierte Funktionsprinzip besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten (siehe Abbildung 3):

- Ein thermoplastisches Verstärkungsnetz, das die Strukturmechanik und Formänderung ermöglicht.
- Eingebettete Widerstandsdrähte, die z.B. durch elektrische Erwärmung das Material gezielt in den gewünschten Zustand überführen.
- Eine umhüllende Silikonmatrix, die Flexibilität bietet und für eine gleichmäßige Kraftverteilung sorgt.

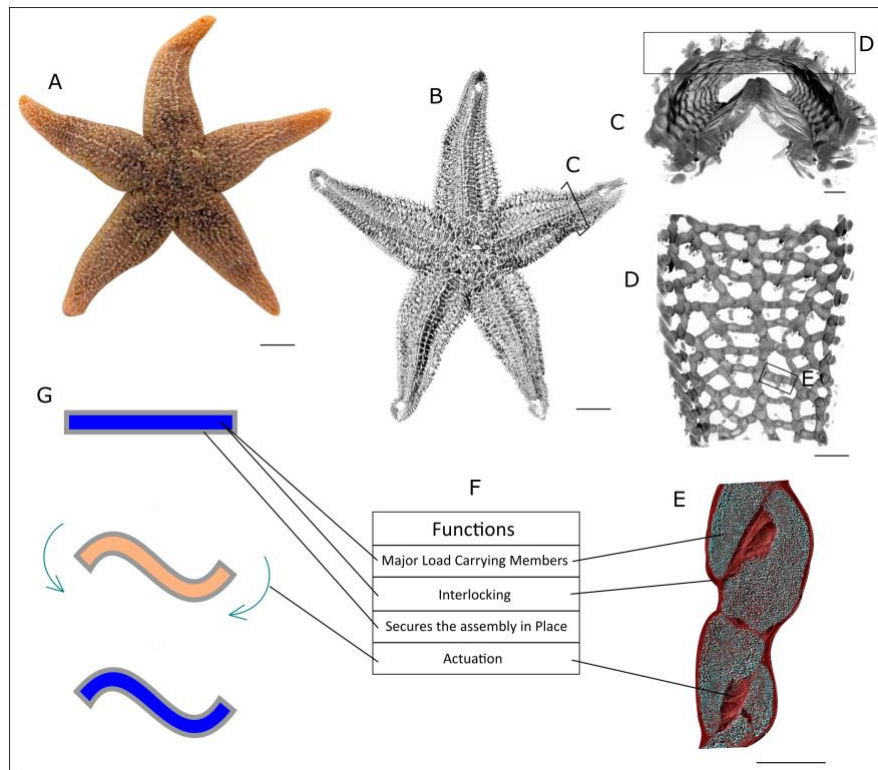


Abbildung 2: Übersicht des BIAG-Funktionsprinzips: (A) Fotografie eines adulten *Asterias rubens* (gewöhnlicher Seestern), der in europäischen Gewässern weit verbreitet ist. (B) Röntgen-CT-Scan des vollständigen Skeletts von *Asterias rubens* zeigt das Ossikel-Netzwerk. Tausende von Ossikeln sind in einer netzartigen Struktur auf der aboralen Seite des Seesterns angeordnet. (Scan mit einer Voxelgröße von  $76\ \mu\text{m}$ ). (C) Querschnittsansicht eines einzelnen Arms des Seesterns mit Darstellung der Anordnung der Ossikel um die zentrale Körperhöhle. (Voxelgröße  $13\ \mu\text{m}$ ). (D) Innenansicht der aboralen Seite zeigt die netzartige Struktur und die gitterförmige Verbindung der einzelnen Ossikel. (E) Hochauflösender Röntgen-CT-Scan des Ossikel-Systems mit Darstellung der interossikulären Muskulatur und des umgebenden kollagenen Bindegewebes (rot). (F) Tabelle mit einer Übersicht über die funktionellen Rollen der verschiedenen Komponenten. (G) Thermoplastisches Gitter unterhalb und oberhalb der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ): Unterhalb von  $T_g$  ist das thermoplastische Gitter (blau) starr und behält seine Form, umgeben von einer elastomeren Hülle (grau). Oberhalb von  $T_g$  verliert das thermoplastische Gitter (orange) seine Steifigkeit, sodass die Struktur durch mechanische Krafteinwirkung in eine neue Form gebracht werden kann. Diese neue Form bleibt stabil, sobald die Temperatur unter  $T_g$  sinkt, ohne dass zusätzliche Energie oder Steuerung erforderlich ist. Maßstabsbalken: (A,B) 10 mm; (C,D) 1 mm; (E)  $200\ \mu\text{m}$ . Abbildung aus (Raman et al., 2024a).

Die entwickelte morphende Struktur zeichnet sich durch eine hohe Anpassungsfähigkeit und eine innovative, energieeffiziente Steuerbarkeit aus. Sie bietet eine flexible, aber gleichzeitig stabile Lösung für adaptive Materialsysteme, die in verschiedenen technischen Anwendungen, wie der Medizintechnik, Robotik und Luftfahrt, eingesetzt werden können.

Dynamische Formanpassung: Die Struktur ist in der Lage, sich gezielt und kontrolliert in nahezu jede gewünschte Form zu verformen. Dies wird durch eine Kombination aus thermoplastischen Gitterstrukturen und einer elastomeren Ummantelung ermöglicht, die eine kontrollierte Modulation der mechanischen Eigenschaften erlaubt.

Energieeffiziente Formstabilisierung: Im Gegensatz zu vielen existierenden adaptiven Materialien oder morphenden Systemen benötigt die entwickelte Struktur keine kontinuierliche externe Energiezufuhr, um eine einmal erreichte Form zu erhalten. Sobald die Formänderung erfolgt ist, bleibt die Struktur in der neuen Konfiguration stabil, ohne dass eine permanente externe Krafteinwirkung oder ein aktives Haltesystem erforderlich ist. Dies stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber Systemen dar, die auf hydraulische, pneumatische oder motorisierte Steuerungen angewiesen sind.

Reversible Rückführung in die Ausgangsform: Die Struktur kann jederzeit in ihre ursprüngliche Form zurückgeführt werden, indem ein thermischer Stimulus angewendet wird. Dies erfolgt durch die gezielte Erwärmung der eingebetteten Widerstandsheizdrähte, die das thermoplastische Netzwerk in einen flexibleren Zustand überführen. Während dieser Phase kann die Struktur erneut in eine beliebige neue Form gebracht werden. Sobald die Temperatur unter die Glasübergangstemperatur sinkt, wird die veränderte Form erneut stabilisiert und beibehalten.

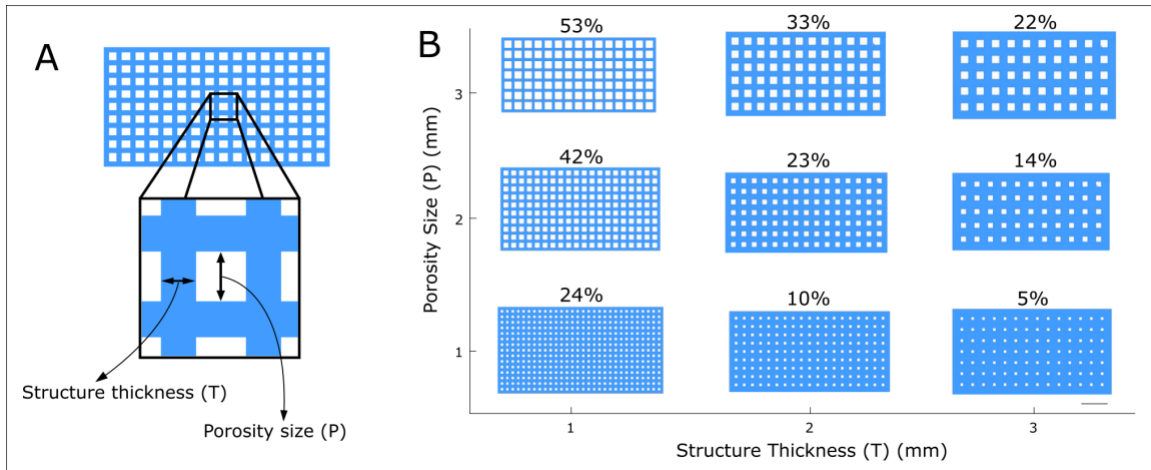
### **Innovationspotenzial und Vorteile gegenüber bestehenden Lösungen**

Diese morphende Struktur stellt eine bedeutende technologische Weiterentwicklung gegenüber bisherigen adaptiven Systemen dar. Herkömmliche morphende Materialien oder Strukturen basieren häufig auf:

- Aktiven mechanischen Steuerungen, wie Motoren oder hydraulischen Aktuatoren, die kontinuierliche Energiezufuhr benötigen.
- Formgedächtnislegierungen oder elektroaktiven Polymeren, die zwar formveränderlich sind, aber entweder begrenzte Bewegungsamplituden oder hohe elektrische Spannungen erfordern.
- Pneumatischen Systemen, die komplexe Infrastruktur und konstante Druckregelung benötigen.

Durch die Kombination aus struktureller Stabilität, energieeffizienter Formveränderung und reversibler Anpassungsfähigkeit eröffnet diese Erfindung neue Einsatzmöglichkeiten in der Medizintechnik (adaptive Orthesen und Prothesen), Soft Robotics (formveränderliche Greifsysteme) und Luftfahrt (adaptive Tragflächen oder morphende Verkleidungen).

Diese neuartige Technologie schafft somit die Grundlage für eine neue Generation intelligenter, biologisch inspirierter Materialsysteme mit weitreichenden industriellen Anwendungsmöglichkeiten.



**Abbildung 3: Designvariationen des thermoplastischen Gitters des BIAG-Funktionsprinzips. Die variablen Designparameter für die Herstellung der Prototypen waren die Porengröße (P) und die Strukturdicke (T). (B) CAD-generierte Darstellung von neun Gittern mit unterschiedlichen Kombinationen von T- und P-Werten (1 mm bis 3 mm). Die Zahlen über den einzelnen Gittern geben den jeweiligen Porositätsprozentsatz an. Maßstabsbalken: (B) 10 mm. Abbildung aus (Raman et al., 2024a)**

Zudem wurden wichtige weiterführende Projektergebnisse in mehreren Bachelorarbeiten und zwei Masterarbeiten erzielt. Diese Arbeiten sind bislang noch nicht veröffentlicht worden (Details siehe Teil III).

Wie geplant, erfolgten regelmäßig Präsentationen des Projektteams (Raman, Labisch, Dirks) auf mehreren internationalen Fachtagungen:

1. Raman, Susanna Labisch and Jan-Henning Dirks “Starfish-inspired scalable morphing structures”, Annual Meeting of the Society of Experimental Biology, Prague 2024.
2. Raman, Susanna Labisch and Jan-Henning Dirks “Biomechanical adaptations and ontogenetic changes in starfish ossicles”, Annual Meeting of the Society of Experimental Biology, Edinburgh 2023.
3. Raman, Hartmut Witte, Susanna Labisch and Jan-Henning Dirks “Ultrastructure, biomechanics and biomimetic potential of starfish skeletons”, Ilmenau Scientific Colloquium 2023
4. Raman, Susanna Labisch and Jan-Henning Dirks “Bio-inspired morphing structures – Ultrastructure of the starfish skeleton”, International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues, Waikoloa Hawaii, 2023
5. Raman, Susanna Labisch and Jan-Henning Dirks “Bio-inspired morphing structures – Multibody simulation of starfish skeleton”, International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues, Waikoloa Hawaii, 2023

6. Raman, Milan Sixt, Danus Rawert, Axel Schneider, Susanna Labisch and Jan-Henning Dirks "Bio-inspired morphing structures? From starfish to technical applications", International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues, Waikoloa Hawaii, 2023
7. Raman, Susanna Labisch, Jan-Henning Dirks "Multibody simulation of a starfish skeleton" Annual Meeting of the Society of Experimental Biology, Montpellier, 2022.
8. Raman, Susanna Labisch, Jan-Henning Dirks "Ultrastructure and biomechanics of starfish ossicles" Annual Meeting of the Society of Experimental Biology, online, 2021.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Verbreitung der Projektergebnisse ausserhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft war die Ausstellung im Haus der Wissenschaft Bremen, welche als Teil der Jahresausstellung 2024/2025 das BIAG-Projekt als Exponat präsentierte. Der BIAG-Beitrag mit dem Titel „*Morphing-Materialien: Von Seesternen inspiriert*“ zielte darauf ab, die entwickelten Technologien und ihre biologischen Grundlagen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Die Präsentation umfasste verschiedene Demonstrationen der morphenden Materialien, darunter einfache Proof-of-Concept Modelle sowie eigens entwickelte Ansichten der Seestern-Ossikel, um die biologische Inspiration hinter der Technologie sichtbar zu machen. Die Ausstellung wurde sowohl von wissenschaftlichen Fachkreisen als auch von interessierten Laien positiv aufgenommen und trug maßgeblich zur Wissenschaftskommunikation und Technologieakzeptanz bei.

Die Beteiligung an dieser Ausstellung hat gezeigt, dass es ein großes Interesse an biologisch inspirierten Materialien gibt, insbesondere im Kontext nachhaltiger, energieeffizienter Technologien. Es wurde deutlich, dass morphende Materialien nicht nur für industrielle Anwendungen, sondern auch für pädagogische und wissenschaftliche Vermittlungsformate geeignet sind. Der BIAG-Beitrag im Haus der Wissenschaft war ein wichtiger Meilenstein für die öffentliche Wahrnehmung des Projekts und unterstreicht das Potenzial der Technologie für eine breitere Nutzung über den akademischen Rahmen hinaus.

Die wissenschaftlichen und technischen Errungenschaften dieser Arbeiten sind von hoher Relevanz für verschiedene Anwendungsbereiche, darunter Medizintechnik, Soft Robotics und Luftfahrt. Die entwickelten Konzepte wurden bereits in Industriegesprächen mit Airbus sowie mit Medizintechnikfirmen diskutiert, um eine mögliche kommerzielle Anwendung der Technologie zu evaluieren (siehe Abbildung 4).

Zusammenfassend hat das Projekt BIAG nachweislich entscheidende Fortschritte in der Erforschung adaptiver biologisch inspirierter Gelenke erzielt. Die entwickelten Strukturen stellen eine vielversprechende Alternative zu bestehenden mechanischen Systemen dar und

eröffnen neue Möglichkeiten für energieeffiziente, adaptive Materiallösungen in technischen Anwendungen.



**Abbildung 4:** Illustration der Anwendungsbereiche der ersten Prototypen einer seestern-inspirierten „morphing structure“. Die Steifigkeit des internen PLA-Gitters kann durch entsprechende Wahl der Druck-Geometrie und Parameter gezielt eingestellt werden. In den ersten Prototypen ist nach einer Erwärmung der Struktur eine gezielte und bleibende Verformung möglich. Durch erneutes Erwärmen nimmt die Struktur ihre ursprüngliche Form (Mitte) wieder an.

## Literatur

- Bekas, V.** (2021). Die Faltung der Kutikula von Arthropoden als Vorbild für Orthesen, Prothesen und Protektoren.
- Raman, Labisch, S. and Dirks, J.-H.** (2024a). A starfish-inspired 4D self-healing morphing structure. *Sci. Rep.*
- Raman, Labisch, S. and Dirks, J.-H.** (2024b). Morphing-Struktur mit kontrollierbaren Freiheitsgraden.
- Raman, Labisch, S. and Dirks, J.-H.** (2025). The ultrastructure of the starfish skeleton is correlated with mechanical stress. *Acta Biomater.* **193**, 279–290.
- Rawert, D. K.** (2023). Development of a soft pneumatic actuator for the integration in a starfish-inspired morphing structure.
- Sixt, M.** (2023). Design and Investigation of a Modular Adapter for Softrobotics using Compliant Mechanisms.