

VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 19

Ressourceneffizienz durch Bionik



© Ulrich Grunewald

September 2017

VDI ZRE Kurzanalyse Nr. 19: Ressourceneffizienz durch Bionik

Autorinnen:

Dr. Anke Niebaum, VDI Technologiezentrum GmbH

Dr. Heike Seitz, VDI Technologiezentrum GmbH

Fachliche Ansprechpartnerin:

Dr.-Ing. Katja Saulich, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir danken Frau Prof. Dr. rer. nat. Antonia Kesel, Leiterin des Studiengangs Bionik der Hochschule Bremen und Vorsitzende des VDI-Fachbeirats Bionik, für ihre fachliche Unterstützung.

Die Kurzanalyse wurde im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit erstellt.

Die Kurzanalysen des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen des Themas Ressourceneffizienz in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzanalysen einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder der Ressourceneffizienz.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Bertolt-Brecht-Platz 3

10117 Berlin

Tel. +49 30 2759506-0

Fax +49 30 2759506-30

zre-info@vdi.de

www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © Ulrich Grunewald

Druck: Bonifatius GmbH, Karl-Schurz-Straße 26, 33100 Paderborn

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier.

VDI ZRE Publikationen:
Kurzanalyse Nr. 19

Ressourceneffizienz durch Bionik

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	4
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	5
TEIL 1: KURZANALYSE	7
1 EINLEITUNG	8
2 BIONIK UND RESSOURCENEFFIZIENZ	11
2.1 Was ist Bionik?	11
2.2 Was ist Ressourceneffizienz	20
2.3 Verknüpfung von Ressourceneffizienz und Bionik	25
2.4 Bionik als Werkzeug in der Produktentwicklung	27
3 TECHNISCHE ANWENDUNG DER BIONIK	32
3.1 Bionische Methoden	32
3.2 Ein Vorbild für viele Anwendungen	44
3.3 Bionische Produkte und Lösungsansätze	46
3.3.1 Materialausnutzung und Materialsubstitution	46
3.3.2 Oberflächenschutz und Oberflächenfunktion	55
3.3.3 Energetische Wirkungsgradsteigerung	60
3.3.4 Robotik und Signalübertragung	70
3.4 Von der Natur inspiriert - aber keine Bionik	74
4 BIONIK ALS CHANCE FÜR UNTERNEHMEN	79
5 FAZIT	88
TEIL 2: FACHGESPRÄCH	90
6 PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „RESSOURCENEFFIZIENZ DURCH BIONIK“	91
7 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS	92
7.1 Potenziale der Bionik für Ressourceneffizienz	92

7.2 Bionik und Ressourceneffizienz in KMU	94
LITERATURVERZEICHNIS	98

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Produktentwicklungsprozess und Produktlebensweg	23
Abbildung 2: Generelles Vorgehen des methodischen Entwickelns und Konstruierens	28
Abbildung 3: Vereinfachter Ablauf einer bionischen Entwicklung bis zur Invention	30
Abbildung 4: Beispiele für die Anwendung von Schubvierecken in Bauteilen (A: Zugbelastung; B: schubbelasteter Riss; C: Torsion)	38
Abbildung 5: Grafische Vorgehensweise zur Optimierung von Kerben mit der Methode der Zugdreiecke	40
Abbildung 6: Schema eines weiterentwickelten bionischen Produktentstehungsprozesses auf Basis des ELiSE-Verfahrens	43
Abbildung 7: Schema einer beispielhaften Zusammenarbeit zwischen einem Entwicklungsunternehmen und Industriepartnern	83

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Indikatorenset der Nachhaltigkeitsbewertung bionisch technischer Lösungen im Rahmen des Begleitvorhabens zum BMBF-geförderten BIONA- Projekt	18
Tabelle 2:	VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz	25
Tabelle 3:	Beispiele für verschiedene Produkte beruhend auf demselben Funktionsprinzip	45
Tabelle 4:	VDI-Richtlinien zur Bionik	81
Tabelle 5:	Datenbanken zur Recherche nach biologischen Vorbildern	85

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ALM	Additive Layer Manufacturing
BIOKON	Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V.
BIONA	Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BROMMI	Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboter-Anwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion
CAD	Computer Aided Design
CAIO	Computer Aided Internal Optimization
CAO	Computer Aided Optimization
CFD	Computational Fluid Dynamics
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
EA	Evolutionäre Algorithmen
ELISE	Evolutionary Light Structure Engineering
FEM	Finite-Elemente-Methode
HGF	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme
IPT	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie
ISO	International Organization for Standardization
IST	Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik

ITV	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
PROSA	Product Sustainability Assessment
S2C	Sweep-Spread Carrier
SKO	Soft Kill Option
TAK	Tripedale Alternanzkaskade
TBT	Tributylzinnhydrid
UMSICHT	Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDI ZRE	VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

TEIL 1: KURZANALYSE

1 EINLEITUNG

Bionik verbindet in interdisziplinärer Zusammenarbeit Biologie und Technik. Sie ist eine Querschnittsdisziplin, die nicht auf eine Forschungsrichtung oder industrielle Branche beschränkt ist. Ziel der Bionik ist es, durch Abstraktion, Übertragung und Anwendung von Erkenntnissen, die an biologischen Vorbildern gewonnen werden, technische Fragestellungen zu lösen. Ihre Anwendung im Produktentwicklungsprozess als Innovationsmethode ermöglicht innovative technische Lösungen. Diese können Unternehmen **Wettbewerbsvorteile** verschaffen.

Im Hinblick auf **Ressourceneffizienz** bietet Bionik erhebliche Potenziale. Es wird angenommen, dass ein so genanntes ökologisches Wirtschaften durch die Übertragung biologischer Vorbilder und Prinzipien in die Technik möglich ist.¹ Diese Annahme wird damit begründet, dass die Natur z. B. Energie und Material in der Regel zweckmäßig und effizient verwendet. Die im Verlauf der Evolution entwickelten Funktionen und Eigenschaften sind also „ökologisch“ optimiert.

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass diese Optimierung aufgrund der Anpassung von Organismen und Systemen an die Einflussgrößen der Umgebung und an die Generationsintervalle der Organismen erfolgt ist. Im Verlauf der Evolution passen sich Populationen an sich verändernde Umgebungen an, was in erster Linie der Arterhaltung dient und nicht auf die Optimierung einzelner Individuen ausgerichtet ist. Damit unterscheiden sich die Mechanismen der Evolution von den Anforderungen der industriellen Produktion.

Aus folgenden biologischen Strategien lassen sich aber dennoch erfolgreiche Ressourceneffizienzstrategien für die Produktentwicklung und den Produktionsprozess ableiten:²

- Schließen natürlicher Kreisläufe – nahezu jedes organische Material wird recycelt bzw. wiederverwendet.

¹ Vgl. von Gleich, A.; Pade, C.; Petschow, U. und Pissarski, E. (2007).

² Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 19 ff.

- Effizienter Materialeinsatz - Material wird an Stellen eingesetzt, an denen es benötigt wird, und dort abgebaut, wo es überflüssig ist.
- Konstruktionen werden entsprechend der vorherbestimmten Lebensdauer angepasst.
- Materialien werden ressourcenschonend im milden Milieu hergestellt (geringer Druck, neutraler pH-Wert, geringe Temperatur).
- Für einen hierarchischen Aufbau werden nur wenige Materialien verwendet, die häufig verschiedene Funktionen integrieren. Oftmals sind sie adaptiv, redundant und fehlertolerant, weiterhin haben sie die Fähigkeit zur Selbstreparatur.
- Anpassungen an veränderte Umweltbedingungen finden im laufenden Betrieb statt; Organismen können nicht „wegen Umbau schließen“.

Am Markt hat sich bereits eine große Anzahl bionischer **Produkte** etabliert. Bei der Entwicklung neuer oder optimierter bionischer Produkte stehen in der Regel funktionale und wirtschaftliche Ziele, wie innovative Funktionsweisen, Gewichts-, Raumersparnis oder Lärmschutz im Fokus der Unternehmen. Trotzdem sind Ressourceneffizienzpotenziale in vielen Produkten erkennbar. Beispielsweise wird die Ressourceneffizienz bei Leichtbauprodukten direkt adressiert: Hier werden durch **bionische Methoden** sowohl Gewichts- als auch Materialeinsparungen erreicht. Daneben werden bionische Methoden heute ebenfalls in vielen anderen Branchen als Lösungsstrategie für technische Fragestellungen in der Produktentwicklung eingesetzt, ohne dass dieser Zusammenhang gesondert herausgestellt wird. Dies führt dazu, dass erheblich mehr Unternehmen heute schon Bionik nutzen, als in der Öffentlichkeit bekannt ist. Allerdings wurde bislang keine umfassende Bewertung der Ressourceneffizienz durch Bionik bzw. eine konsequente Bewertung bionischer Lösungsansätze unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz durchgeführt.

Die Wissenschaftsdisziplin Bionik nutzt vielfältige Strukturen und Funktionsprinzipien **biologischer Vorbilder** als Inspiration für technische Entwicklungen. Vorbilder aus der Natur bieten ein großes Innovationspotenzial und sind daher für Unternehmen interessant. Sie haben sich über einen

langen Entwicklungszeitraum bestmöglich an ihren jeweiligen Lebensraum und ihre Umweltbedingungen angepasst. Voraussetzung für die Entschlüsselung entsprechender Funktionsprinzipien und die Entwicklung bionischer Innovationen ist die biologische Grundlagenforschung. Aufgrund der komplexen Herangehensweise über die Inspiration aus der Natur sowie der großen Vielfalt an biologischen Vorbildern und ihrer Funktionsweisen ist es nicht immer einfach, technische Lösungswege abzuleiten.

Das Ziel der vorliegenden Kurzanalyse besteht darin, aktuelle **Beispiele aus der Bionik hinsichtlich der Ressourceneffizienz qualitativ** zu bewerten und dadurch aufzuzeigen, welchen Beitrag sie zur Material- und Energieeffizienz leisten können. Es soll verdeutlicht werden, an welcher Stelle des Produktlebenswegs oder des Produktentwicklungsprozesses die größten Ressourceneffizienzpotenziale durch bionische Lösungen zu erwarten sind. Die Kurzanalyse soll den relevanten Akteuren in Unternehmen, die sich mit Bionik als **zusätzliche Methode zur Produktentwicklung oder -optimierung bzw. Prozessoptimierung** beschäftigen möchten, Hinweise und Hilfestellungen geben.

Die Forschungs- und Entwicklungslandschaft in der Bionik entwickelt sich rasant, so dass diese Kurzanalyse nur eine ausgewählte Übersicht aktueller Produktbeispiele und Forschungsprojekte darstellen kann.

2 BIONIK UND RESSOURCENEFFIZIENZ

2.1 Was ist Bionik?

Bionik – das Lernen von der Natur – gibt auf Grundlage der Biologie Inspirationen für Lösungsideen oder -strategien zur Entwicklung technischer Innovationen. Dabei geht es um das Erkennen der Bauweisen und Funktionsprinzipien der biologischen Vorbilder. Bionik bedeutet, dass durch detaillierte Untersuchungen an den biologischen Vorbildern und die konsequente Übertragung der biologischen Funktionsprinzipien neue technische Lösungen entstehen.³

Basis für Bionik ist die Biodiversität: Inspirationen aus der Natur, also von lebenden Organismen und biologischen Systemen, stehen in einer unüberschaubaren Anzahl und Vielfalt zur Verfügung. Es wird geschätzt, dass es weltweit zehn bis 20 Millionen Tier- und Pflanzenarten gibt, von denen nur ein kleiner Bruchteil bekannt ist und beschrieben wurde. Ohne diese biologischen Vorbilder ist eine Entwicklung bionischer Produkte und Methoden nicht durchführbar. Hier sind die Möglichkeiten noch lange nicht ausgeschöpft und viele Funktionsprinzipien sind weiterhin unbekannt.⁴

Seit mehr als 50 Jahren erforschen Wissenschaftler unter dem Begriff Bionik natürliche Phänomene und entwickeln daraus innovative Produkte. Doch erst seit 2001 haben diese Aktivitäten in Deutschland neuen Aufschwung bekommen. In diesem Jahr begann das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Bionik mit dem Aufbau des Bionik-Kompetenznetzes BIONIKON (Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V.) zu fördern. Diese Maßnahme mündete in einem Förderkonzept zur Bionik, in dessen Folge die anwendungsnahe Forschung durch Verbundprojekte von Universitäten mit Industriebeteiligung bis zum Jahr 2012 unterstützt wurde.^{5, 6} In der letzten Fördermaßnahme BIONA (Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien) lag ein Schwer-

³ Vgl. Jessel, B.; Tschimpke, O. und Walser, M. (2009), S. 20 ff.

⁴ Vgl. Jessel, B.; Tschimpke, O. und Walser, M. (2009), S. 9 und S. 33 – 53.

⁵ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2005).

⁶ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011b).

punkt der Projekte auf Nachhaltigkeit. Durch Untersuchungen zur Nachhaltigkeit stand BIONA auch in Zusammenhang mit Ressourceneffizienz.

Über bionische Entwicklungen ist eine Vielzahl an Publikationen erschienen, in denen die heute bekannten Beispiele für bionische Produkte, wie Lotus-Effekt®, künstliche Haihaut, Klettverschluss Gecko-Tape® und viele weitere Beispiele, ausführlich beschrieben werden. Stellvertretend wird an dieser Stelle auf einige ausgewählte Veröffentlichungen hingewiesen.^{7, 8, 9}

Bionische Forschung und Produktentwicklung erfolgen in nahezu allen Forschungsbereichen und industriellen Branchen. Dabei kommen **natürliche Funktionsprinzipien** wie strukturierte Oberflächen oder biologische Wachstumsprozesse branchenübergreifend zum Einsatz. Andersherum kann aber auch ein komplexes industrielles Endprodukt wie das Automobil aus verschiedenen bionischen Komponenten bestehen, z. B. aus einer Karosserie mit bionischer Formgebung, aus bionischen Leichtbauteilen, Oberflächen, Reifen und Rückenlehnen.¹⁰ Um trotz dieser Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten ein Ordnungssystem zu schaffen, werden bionische Anwendungen meist in Fachbereiche wie Oberflächen, Robotik, Sensorik, Architektur, bionische Optimierung und weitere eingeteilt. Diese Einordnung entspricht sowohl der VDI-Richtlinienserie (Tabelle 4 auf Seite 81) als auch den Fachgruppen von BIONA.¹¹ Auch wenn diese Einteilung verschiedene systematische Ebenen anspricht und es eine Vielzahl an Schnittmengen gibt, hat sie sich im Arbeitsalltag durchgesetzt und bewährt. Die Vielfalt an Forschungsrichtungen und industriellen Umsetzungen führt dazu, dass Wissenschaftler und Ingenieure der unterschiedlichsten Fachrichtungen in bionische Entwicklungsarbeiten involviert sein können.

In den letzten 20 Jahren haben sich Technologien wie bildgebende Verfahren und Simulationsverfahren, Nachweis- und Produktionsmethoden im Nanobereich oder additive Verfahren rasant weiterentwickelt, was der

⁷ Vgl. Luther, W.; Beismann, H. und Seitz, H. (2011).

⁸ Vgl. Speck, T.; Speck, O.; Neinhuis, C. und Bargel, H. (2012).

⁹ Vgl. Nachtigall, W. und Wisser, A. (2013).

¹⁰ Vgl. Seitz, H. (2013), S. 12.

¹¹ Vgl. BIONA (2017).

Bionik neue Möglichkeiten eröffnet hat. **Biologische Strukturen sind hierarchisch aufgebaut und in den meisten Fällen multifunktional.** Genaue Messungen, Simulationen und Konstruktionsmethoden im kleinskaligen Bereich wurden erst mit der Weiterentwicklung dieser Technologien möglich. Mittlerweile stehen hier für die funktionelle Analogiebildung, die Analyse von Funktionsprinzipien und Wirkmechanismen sowie die Herstellung bionischer Prototypen und Lösungen diverse Verfahren zur Verfügung. Darüber hinaus können beispielsweise mit Hilfe hochauflösender Kameras und Computerauswertungen sehr langsame oder sehr schnelle biologische Prozesse genau untersucht werden.¹² Dies gilt ebenso für die Analyse von Oberflächen, die ihre Funktionalitäten aufgrund ihrer Nanostrukturierung besitzen. Auch hier haben sich die Analyse- und Simulationsverfahren schnell weiterentwickelt. Hinzu kommen die verschiedenen numerischen Simulationsverfahren, zu denen z. B. Finite-Elemente-Methode (FEM), Computer Aided Design (CAD) und Computational Fluid Dynamics (CFD) gehören. Diese computergestützten Verfahren wurden in den letzten Jahren bedeutend weiterentwickelt, so dass sich die Entwicklungszeiten stark verkürzt haben. Der Aufbau komplexer hierarchischer Konstruktionen wurde durch die Weiterentwicklung der additiven Verfahren einfacher. Auch die Einbettung mehrerer Funktionalitäten in eine Struktur wurde möglich. Es wird angenommen, dass insbesondere die additiven Verfahren auch durch die Verwendung der numerischen Simulationsverfahren der Bionik weitere Entwicklungsmöglichkeiten bieten.¹³

Definition der Bionik

In der Vergangenheit wurde national und international viel darüber diskutiert, wie genau die Bionik zu definieren ist und was exakt damit gemeint ist, wenn ein Produkt als bionisch ausgewiesen wird. Um Wissenschaft und Unternehmen einen Leitfaden und eine gemeinsame Sprache an die Hand zu geben, hat der Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) eine Serie an VDI-Richtlinien erarbeitet (Tabelle 4). In der Richtlinie VDI 6220 Blatt 1 werden die Grundlagen der Bionik beschrieben und die wesentlichen Be-

¹² Vgl. Poppinga, S. und Speck, T. (2016), S. 9.

¹³ Vgl. Handelsblatt (2016).

griffe definiert: „**Bionik verbindet in interdisziplinärer Zusammenarbeit Biologie und Technik mit dem Ziel, durch Abstraktion, Übertragung und Anwendung von Erkenntnissen, die an biologischen Vorbildern gewonnen werden, technische Fragestellungen zu lösen.**“¹⁴ Nach dieser Definition können biologische Vorbilder biologische Prozesse, Materialien, Strukturen, Funktionen, Organismen, Erfolgsprinzipien und der Prozess der Evolution sein.

Die Definition des VDI wurde auf internationaler Ebene weitestgehend in der Norm DIN¹⁵ ISO¹⁶ 18458 übernommen. Zusätzlich wird aber deutlich zwischen Bionik und Bionics unterschieden. Bionics ist definiert als „technische Fachrichtung, die biologische Funktionen durch ihre elektronischen und/oder mechanischen Entsprechungen nachbilden, verbessern oder ersetzen möchte“¹⁷. Bionics spricht damit eher den Bereich der Robotik und Automationstechnik an.

Bionik wird im Englischen grundsätzlich mit „biomimetics“ übersetzt. In den letzten Jahren setzt sich aber ungeachtet der bei ISO und im VDI festgelegten Definitionen immer mehr das Wort „bionics“ als englische Übersetzung durch. Weitere Begriffe wie biologisch-inspiriert, Biomimicry und Biomimese werden zum Teil auch synonym für Bionik genutzt.¹⁸

In der vorliegenden Kurzanalyse werden bionische Lösungsansätze in bionische Produkte und bionische Methoden untergliedert:

Bionisches Produkt: ein Zwischenprodukt, Endprodukt oder Werkzeug, das ein biologisches Vorbild hat. Nach Abstraktion und technischer Umsetzung wird es in einem Produktionsprozess verwendet, als Bauteil genutzt oder als Endprodukt auf den Markt gebracht.

¹⁴ VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 9.

¹⁵ DIN – Deutsches Institut für Normung

¹⁶ ISO – International Organization for Standardization

¹⁷ DIN ISO 18458:2016-08, S. 8

¹⁸ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 10.

Bionische Methode: Methode, die in einem Prozess des bionischen Arbeitens entwickelt wurde (Computer Aided Optimization (CAO), Computer Aided Internal Optimization (CAIO), Soft Kill Option (SKO), Evolutionäre Algorithmen (EA), Evolutionary Light Structure Engineering (ELiSE), bionische Denkwerkzeuge). Die Methoden können in einem Produktentwicklungsprozess angewendet werden, ohne dass es einer erneuten bionischen Entwicklung bedarf. Das Ergebnis der Anwendung einer bionischen Methode ist ein bionisches Produkt. Ausnahme bilden die EA, da dem Ergebnis einer Optimierung mit EA in der Regel kein biologisches Vorbild mehr zugeordnet werden kann.

Kriterien für bionische Lösungen

In der Richtlinie VDI 6220 Blatt 1 und der DIN ISO-Norm 18458 wurde festgeschrieben, dass natürliche und technische Parallelentwicklungen keine Bionik sind. Ein Beispiel dafür bietet das Münchner Olympiastadion, das in Analogie zu Spinnennetzen entwickelt wurde. Hier fand kein Erkenntnistransfer biologischer Wirkprinzipien in die Technik statt. Immer wieder werden technische Produkte entwickelt, die in ihrer Form biologischen Vorbildern ähnlich sind und auch vergleichbare Aufgaben wahrnehmen. Diese Entwicklungen nutzen zwar biologische Vorbilder, können aber nicht als bionische Entwicklungen bezeichnet werden (Kapitel 3.4).

Um ein gemeinsames Verständnis zur Unterscheidung bionischer und nichtbionischer Lösungen zu erreichen, wurden **drei Kriterien** festgelegt. Eine bionische Lösung muss demnach drei Schritte durchlaufen:^{19, 20}

- (1) das Durchführen einer Funktionsanalyse des biologischen Systems,
- (2) die Abstraktion des biologischen Systems in ein Modell,
- (3) die Übertragung und Anwendung des Modells zur Entwicklung eines technischen Produkts.

¹⁹ Vgl. DIN ISO 18458:2016-08, S. 12.

²⁰ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 12 ff.

Am Beispiel der bionischen Haihaut für Schiffsrümpfe verdeutlicht, bedeutet dies:

- (1) **Analyse:** Die Oberfläche der Haihaut wurde hinsichtlich ihres Aufbaus, der Strömungseigenschaften und des Verhaltens in der Strömung untersucht. Auf der Haut befinden sich bewegliche Placoidschuppen, die in Strömungsrichtung Rillen zeigen, die so genannte Riblettstruktur. Die flexiblen Plättchen und deren Riblettstruktur sind dafür verantwortlich, dass der Hai günstige Strömungseigenschaften aufweist und sich zudem keine Meeresbewohner (z. B. Seepocken) anhaften können.
- (2) **Abstraktion:** Anhand der Analyse verdeutlichte sich, dass eine nachgiebige, raue Oberfläche der Haihaut (bewegliche Placoidschuppen) das Anhaften von Meereslebewesen, wie z. B. Seepocken, in der Strömung verhindert. Eine rillenförmige Struktur (Riblettstruktur) der Hautplättchen sorgt dafür, dass der Reibungswiderstand verringert wird. Die Oberflächeneigenschaften „Flexibilität“, „Beweglichkeit“, „Nachgiebigkeit“ und „Rillenstruktur“ nehmen somit wesentlichen Einfluss auf das Strömungsverhalten und das Antifouling. Sie sind das Analogie-Modell, das durch weitere Abstraktionsschritte (z. B. Ableitung der Eigenschaften und Funktionen in theoretische mathematische Formulierungen) verallgemeinert werden kann. Das Modell ist die Basis für eine Übertragung in ein technisches System.
- (3) **Übertragung:** Zunächst wurde eine **Kunststoffolie** mit Rillen hergestellt, die zunächst auf Flugzeugrümpfe geklebt wurde. Später wurde ein **Anstrich/Lack** entwickelt, dessen Oberflächenstruktur sich beim Auftragen auf den Schiffsrumpf selbstständig ausbildet. Diese selbststrukturierte Oberfläche ist zwar nicht rillenförmig, verhindert aber grundsätzlich, dass sich Meeresbewohner anhaften können.

Ist eins dieser drei Kriterien nicht erfüllt, kann streng genommen - nach Richtlinie VDI 6220 Blatt 1 und DIN ISO-Norm 18458 - nicht von einem bionischen Produkt gesprochen werden. In beiden Publikationen sind Bei-

spiele tabellarisch gelistet, die verdeutlichen, wann ein Produkt bionisch ist und wann nicht.^{21, 22}

Aspekte der Nachhaltigkeit

Aufgrund der vielen effizienten Lösungen aus der belebten Natur wie Opportunismus – also der Nutzung des Vorhandenen-, Kreislaufwirtschaft, Kaskadennutzung, Multifunktionalität, solarem Wirtschaften und Effizienz Anpassungen vermuten viele Wissenschaftler, dass die Bionik nicht nur eine vielversprechende Innovationsmethode darstellt, sondern auch das Potenzial einer so genannten ökologischeren bzw. nachhaltigeren Technik in sich birgt.²³ Um dies zu prüfen, ist eine Bewertung der Nachhaltigkeit mit quantifizierbaren Indikatoren notwendig.

Ziel einer Begleitmaßnahme im Rahmen der Fördermaßnahme BIONA war es, die technischen Lösungen aller geförderten Verbundprojekte und Nachwuchsforschergruppen in Bezug auf den Beitrag zur Nachhaltigkeit zu bewerten.²⁴ Dazu wurde auf eine Methodik zurückgegriffen, die bereits im Jahr 2001 als integrativer Ansatz der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) zur Nachhaltigkeit entwickelt wurde. Vor dem Hintergrund der inter- und intragenerativen Gerechtigkeit wurden drei generelle, dimensionsübergreifende Nachhaltigkeitsziele definiert (Tabelle 1). Für die Durchführung systematischer Nachhaltigkeitsanalysen sieht der Ansatz der HGF vor, dass die oben genannten Ziele durch Indikatorensysteme konkretisiert werden müssen, die auf die jeweiligen Betrachtungsgegenstände zugeschnitten sind.²⁵

In der Begleitmaßnahme der BIONA-Maßnahme wurden insgesamt 15 Indikatoren zur Bewertung der bionischen Lösungen abgeleitet (Tabelle 1).²⁶ Jeder dieser Indikatoren ist operationalisierbar, so dass eine quantita-

²¹ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 13.

²² Vgl. DIN ISO 18458:2016-08, S. 13.

²³ Vgl. Bertling, J. (2014), S. 186 ff.

²⁴ Vgl. BIONA (2012).

²⁵ Vgl. Kopfmüller, J.; Brandl, V.; Jörissen, J.; Paetau, M.; Banse, G.; Coenen, R. und Grunwald, A. (2001).

²⁶ Vgl. BIONA (2012).

tive Bewertung möglich ist. Bislang erfolgte jedoch nur eine qualitative Zuschreibung bzw. Abschätzung nach dieser Methode.²⁷

Tabelle 1: Indikatorenset der Nachhaltigkeitsbewertung bionisch technischer Lösungen im Rahmen des Begleitvorhabens zum BMBF-geförderten BIONA-Projekt²⁸

1. Sicherung der menschlichen Existenz				
1.1 Schutz der menschlichen Gesundheit	1.2 Gewährleistung der Grundversorgung (Nahrung, Bildung ...)	1.3 Selbstständige Existenzsicherung	1.4 Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglichkeiten	1.5 Ausgleich extremer Einkommens- und Vermögensunterschiede
2. Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials				
2.1 Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	2.2 Nachhaltige Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen	2.3 Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke	2.4 Vermeidung unvermeidbarer technischer Risiken	2.5 Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals
3. Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten der Gesellschaft				
3.1 Chancengleichheit im Hinblick auf Bildung, Beruf Information	3.2 Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungsprozessen	3.3 Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt	3.4 Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur	3.5 Erhaltung der sozialen Ressourcen

Die Indikatoren des 2. Nachhaltigkeitsziels „Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials“ mit den Nummern 2.1, 2.2 und 2.3 können in ihrer Operationalisierung Ressourceneffizienzzielen entsprechen, decken diese aber nicht vollständig ab (Kapitel 2.2).

Darüber hinausgehende wissenschaftliche Untersuchungen zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit wurden erstmals in 2014 für eine bionische Leichtbau-Deckenkonstruktion aus den 1960er Jahren durchgeführt.²⁹ Dabei bedienten sich die Wissenschaftler der Methode PROSA (Product Sustainability Assessment), die auf Basis einer Ökobilanzierung sowohl ökologische als auch sozioökonomische Indikatoren berücksichtigt. Darüber hinaus wurde eine Lebenszykluskostenrechnung durchgeführt. Verglichen wurde die bionische Deckenkonstruktion mit zwei nicht bionischen Konstruktionen, die dem Stand der Technik von 2010 entsprachen. Die

²⁷ Vgl. Antony, F.; Mai, F.; Speck, T. und Speck, O. (2012), S. 175 – 182.

²⁸ Vgl. Antony, F.; Mai, F.; Speck, T. und Speck, O. (2012), S. 175 – 182.

²⁹ Vgl. Antony, F.; Griebhammer, R.; Speck, T. und Speck, O. (2014).

Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden zwar quantitativ ausgewiesen, jedoch nicht quantitativ integrativ, sondern nur qualitativ diskutiert.

In diesem ersten Schritt zu einer umfassenden Nachhaltigkeitsbewertung bionischer Produkte zeigte sich, dass die Methode PROSA für eine Bewertung des Beitrags zur Nachhaltigkeit geeignet ist. Ausgewählte Umweltwirkungskategorien ergaben Vorteile der bionischen Konstruktionslösung gegenüber den Alternativen. Erheblich schlechter als die beiden Alternativen schnitt die bionische Lösung bei der Wirkungskategorie „land use“ ab. In Hinblick auf die Lebenszykluskostenbetrachtung ist sie aufgrund des hohen Arbeitskostenaufwands schlechter zu bewerten als die moderneren Deckenkonstruktionslösungen. Mit beiden methodischen Ansätzen können bionische Lösungen jedoch erst im Nachgang der Entwicklung oder Anwendung bewertet werden.

Um bereits den wissenschaftlichen Nachwuchs hinsichtlich nachhaltiger technischer Lösungen zu sensibilisieren, wurden die Inhalte der BIONA-Projekte an den beteiligten Universitäten in die Lehre integriert. Zudem wurde in den Projekten auch der ideelle Beitrag der Bionik zur Nachhaltigkeit hervorgehoben: Durch bionische Projekte werden die kulturelle Funktion von **Biodiversität** und Natur – im Sinne einer lehrenden Natur – und der respektvolle Umgang damit gestärkt.³⁰ Die Biodiversität wiederum ist die Grundlage funktionierender Ökosysteme und unverzichtbar für ihre Widerstandsfähigkeit (Resilienz). Der Verlust an Biodiversität kann ein Ökosystem schwächen, wodurch Ökosystemleistungen nicht mehr aufrechterhalten werden können. Diese sind jedoch für die Existenz der Menschen unverzichtbar, z. B. durch die Aufnahmefunktion der Natur für Emissionen, Immissionen und Abfälle oder durch die Aufrechterhaltung globaler Stoffkreisläufe wie Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor.

Aus diesem Grund werden die **Ökosystemleistungen der Natur auch als Teil der natürlichen Ressourcen definiert**, die genutzt und verbraucht werden können.³¹

³⁰ Vgl. Bertling, J. (2014), S. 169.

³¹ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 17.

2.2 Was ist Ressourceneffizienz

Der Begriff Ressourceneffizienz wird national und international nicht immer einheitlich verwendet oder verstanden. Aus diesem Grund wurden von einem Expertenkreis aus Stakeholdern abgestimmte Definitionen sowie eine ausführliche Beschreibung der Prinzipien und Schritte zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Organisationen, Produkten, Prozessen und Dienstleistungen erarbeitet. Diese sind in den VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz zu finden (Tabelle 2 auf Seite 25).

Ressourceneffizienz ist dort definiert als der Quotient aus dem Nutzen eines Produkts oder eines Prozesses und dem dafür aufgewendeten Einsatz natürlicher Ressourcen:

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Nutzen}_{(\text{Produkt, Funktion, funktionelle Einheit})}}{\text{Aufwand}_{(\text{Einsatz natürlicher Ressourcen})}}$$

Zu den **natürlichen Ressourcen** zählen die erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primär-Rohstoffe, der physische Raum bzw. die Fläche, die strömenden Ressourcen, wie Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie, die Umweltmedien Wasser, Boden, Luft sowie die Ökosystemleistungen.

Eine **quantitative Bewertung der Ressourceneffizienz** kann nur erfolgen, wenn der Einsatz der natürlichen Ressourcen quantifiziert und in einen Zusammenhang mit dem erzeugten Nutzen gestellt wird.³² Dazu muss auch der Nutzen eines Produkts oder eines Prozesses quantifiziert werden.

Die **Quantifizierung des Einsatzes** natürlicher Ressourcen **über den gesamten Lebensweg** eines Produkts hinweg stellt methodisch eine Herausforderung dar. Die Erfassung und Messung über metrische Systeme ist jedoch bekannt und eingängig. Sie lässt sich beispielsweise über den Frischwasseraufwand [m³], Energieaufwand [kWh] oder Flächenaufwand [m²] darstellen.

³² Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 30.

Anders stellt sich die Situation bei der **Quantifizierung des Nutzens** dar. Der Nutzen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen wird durch Funktionen erfüllt, die häufig durch technische Größen beschrieben werden können (siehe Beispiele). In der Wirtschaft wird der Nutzen auch oft in Form von Umsatz oder Produktpreisen angegeben. Vielfältige Beispiele zeigen, dass noch weitere Nutzenaspekte, wie strategische, soziale, psychologische, ästhetische oder kulturelle Aspekte, eine große Rolle bei Kaufentscheidungen spielen. Dies ist vor allem bei elektronischen Produkten, im Bekleidungsbereich, bei Möbeln oder bei Autos der Fall. Diese Nutzenaspekte sind nur schwer quantifizierbar. Daher haben sich Experten darauf geeinigt, dass eine **technische Bewertung des Nutzens** aufgrund der Nachvollziehbarkeit anderen Bewertungen vorzuziehen ist und weitere Nutzenaspekte unbewertet bleiben.³³

Beispiele technischer Bezugsgrößen für eine Nutzenbewertung:³⁴

Prozess: Für den Lackiervorgang von Metallteilen könnte als Bezugsgröße z. B. der Korrosionsschutz einer Stahlblechfläche von einem Quadratmeter unter vorgegebenen Einsatzbedingungen über zehn Jahre gewählt werden.

Produkt: Für eine Getränkeverpackung könnte das Füllvolumen von 1.000 Litern eines kohlenensäurehaltigen Softdrinks für einen definierten Einsatzbereich, z. B. Vorrats- oder Convenience-Bereich, als Bezugsgröße gewählt werden.

Dienstleistung: Für einen Spediteur könnte der Transport einer bestimmten Menge eines gewichts- oder volumenbezogenen Transportgutes über eine bestimmte Entfernung unter definierten Qualitätskriterien wie Dauer, Pünktlichkeit usw. gewählt werden.

³³ Vgl. VDI 4801:2016-02 (Entwurf), S. 4.

³⁴ In Anlehnung an VDI 4801:2016-02 (Entwurf), S. 26.

Grundsätzlich kann eine Steigerung der Ressourceneffizienz erzielt werden,

- (1) wenn entweder **der gleiche Nutzen**, den die Funktionen eines Produkts erfüllen, mit einem geringeren Einsatz an natürlichen Ressourcen erreicht wird - Beispiele hierzu finden sich u. a. im bionischen Leichtbau -
- (2) oder wenn sich der **Nutzen eines Produkts bei unverändertem Ressourceneinsatz erhöht**, z. B. durch zusätzliche technische Funktionen, die ein Produkt übernehmen kann oder durch Lösungen mit Funktionsintegration oder synergistischen Produkteigenschaften. Ein Beispiel dafür stellen Leuchten aus bionischen Blechen dar, die wölbstrukturiert sind.^{35, 36}

Die meisten Ressourceneffizienz-Maßnahmen zielen darauf ab, bei gleichem Nutzen Ressourcen einzusparen und somit den Einsatz natürlicher Ressourcen wie Energie, Rohstoffe oder Wasser zu vermindern.

Da Ressourcen im gesamten Lebensweg eines Produkts eingesetzt und gegebenenfalls verbraucht werden, bestehen grundsätzlich auch in jeder Lebensweg-Phase Einsparpotenziale (Abbildung 1). So geht es darum, den Produktnutzen nicht nur punktuell etwa in der Nutzungsphase, sondern **im gesamten Lebensweg** von der Produktherstellung bis hin zur Verwertung zu optimieren. Maßnahmen zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Nutzungsphase von Produkten sind oftmals weiter verbreitet und bekannter als Lösungen zur Einsparung von Ressourcen in den Lebenswegphasen Produktherstellung oder Verwertung. Gründe dafür sind z. B. gesetzliche Effizienz-Regelungen, wie in der Ökodesign-Richtlinie, die auf die Nutzungsphase ausgerichtet sind, oder bessere Bewerbungs- und Vermarktungsmöglichkeiten, da der Konsument als Nutzer direkt adressiert wird. Dies trifft grundsätzlich auch für bionische Lösungen zu. Die Herausforderung liegt darin, die anderen Lebenswegphasen verstärkt und zeitgleich zu berücksichtigen. Nur so kann verhindert werden, dass Ressourceneinsparungen in der Nutzungsphase durch erhöhte Ressourcenaufwendungen in

³⁵ Vgl. Siteco (2016).

³⁶ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2016).

der Produktherstellungs- und/oder Verwertungsphase negativ kompensiert werden.

Beispiel: Durch Leichtbau-Elemente einer Fahrzeugkonstruktion kann Kraftstoff als Energieressource in der Nutzungsphase eines Kraftfahrzeugs eingespart werden. Werden die Leichtbauelemente jedoch als Verbundwerkstoff ausgeführt, ist die Verwertungsphase in der Regel ressourcenaufwendig. Die verwendeten Verbundwerkstoffe können nur mit einem hohen Recyclingaufwand, also unter einem hohen Material- und Energieaufwand, einer getrennten Verwertung zugeführt werden.

Eine **Ressourceneffizienzstrategie**, die wesentlichen Einfluss auf die systemweite Ressourceneffizienz ausübt, ist die Strategie der **Materialsubstitution**. „Die Effizienz durch Materialsubstitution umfasst dabei den Einsatz von Sekundärrohstoffen, von Rohmaterial mit umweltverträglicheren und effizienteren Herstellungsprozessen oder aus nachwachsenden Rohstoffen.“³⁷ Gerade bei letzteren muss geprüft werden, ob und welche Flächenkonkurrenzen auftreten.

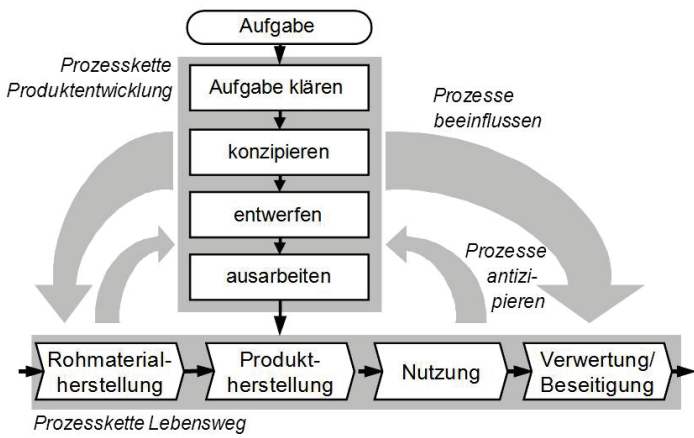


Abbildung 1: Produktentwicklungsprozess und Produktlebensweg³⁸

³⁷ VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 40.

³⁸ VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 33. Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Die Einflussnahme von produzierenden Unternehmen ist naturgemäß innerhalb des eigenen Betriebs in der Produktentwicklung, Produktion und in weiteren Unternehmensbereichen am größten, gefolgt von der direkten Interaktion mit Kunden und Zulieferern. Dabei kommt der Produktentwicklung eine herausragende Rolle zu (Kapitel 2.4). Hier werden die Entscheidungen über die Produktgestalt getroffen, was wiederum die Ressourceneffizienz aller Produktlebensphasen – von der Herstellung über die Nutzung bis zur Verwertung und Beseitigung – bestimmt. So kann durch die Konstruktion möglichst energie- und materialeffizienter, langlebiger, reparierbarer, fehlbedienungstoleranter und einfach recycelbarer Produkte die Ressourceneffizienz über alle Lebenswegphasen hinweg verbessert werden.³⁹ Durch den effizienten Umgang mit Material und Energie und optimale Anpassungen an die jeweilige Lebensumgebung können hier biologische Vorbilder und daraus entwickelte bionische Lösungen eine interessante Alternative bieten (Kapitel 3.3).

Je weiter andere Prozesse und Verfahren jedoch zeitlich und räumlich von den unternehmenseigenen Produktionsprozessen entfernt sind – wie Prozesse der Rohstoffgewinnung oder Entsorgung –, desto geringer ist in der Regel die Einflussmöglichkeit produzierender Unternehmen, Ressourceneffizienz-Maßnahmen umzusetzen. Es gibt jedoch viele unterschiedlich erprobte Ansätze, um auch innerhalb von gesamten Wertschöpfungsketten die Ressourceneffizienz zu optimieren, etwa durch das Sustainable Supply Chain Management oder vertikale Integration.⁴⁰

Eine **Bewertung der Ressourceneffizienz** erfolgt über Rohstoffindikatoren⁴¹, Energieindikatoren⁴² und Indikatoren für Ökosystemleistungen, die zusammengefügt eine Bewertungsgrundlage für den Einsatz der natürlichen Ressourcen bilden. Die VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz bieten das methodische Gerüst einer Ressourceneffizienzbewertung (Tabelle 2). Beispiele zu Strategien und Ressourceneffizienz-Maßnahmen in der Produktion und im Produktionsprozess ergänzen das methodische Werk.

³⁹ Vgl. VDI 4801:2016-02 (Entwurf), S. 8.

⁴⁰ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02, S. 22 und 25.

⁴¹ Vgl. VDI 4800 Blatt 2:2016-03 (Entwurf).

⁴² Vgl. VDI 4600:2012-01.

Tabelle 2: VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz

VDI-Richtlinie	Titel	Ausgabe-datum
4800 Blatt 1	Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien	2016-02
4800 Blatt 2 (Entwurf)	Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands	2016-03
4800 Blatt 3 (Entwurf)	Ressourceneffizienz - Indikatoren zur Bewertung von Umweltwirkungen	In Erarbeitung
4801 (Entwurf)	Ressourceneffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - Strategien und Vorgehensweisen zum effizienten Einsatz natürlicher Ressourcen	2016-02
4600	Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden	2012-01

2.3 Verknüpfung von Ressourceneffizienz und Bionik

Um die Ressourceneffizienz bionischer Methoden oder bionischer Produkte bewerten zu können, müssen diese Lösungen mit anderen Alternativen verglichen werden. Auch hier muss der technische Nutzen, d. h. die Funktion der Lösung, dem Aufwand an natürlichen Ressourcen gegenübergestellt werden.

In der Produktion kann ein Unternehmen durch bionische Methoden oder den Einsatz bionischer Produkte die Ressourceneffizienz beeinflussen. Ein Beispiel für den Einsatz eines **bionischen Produkts** sind selbstschärfende Klingen als Werkzeuge im Rahmen eines Produktionsprozesses (Kapitel 3.3). Durch den selbstschärfenden Effekt der Messer werden geringe Schnittkräfte erzeugt. Die Verschleißbeträge dieser Schneiden sind im Gegensatz zu herkömmlichen geringer, so dass sich die Nutzungsdauer der Schneiden erhöht und weniger Schneidteile benötigt werden. Diese müssen somit nicht mehr gefertigt werden, was mit einer Material- und Energieeinsparung in der Nutzungsphase der Klingen einhergeht. Ob eine Ressourceneffizienzsteigerung auch in der Herstellungs- und Verwertungsphase der selbstschärfenden Messer im Vergleich zu konventionellen Schneidteilen zu verzeichnen ist, müsste im Einzelfall - je nach Einsatzgebiet und verwendetem Werkstoff für das zu bearbeitende Werkstück - bestimmt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten **bionischer Methoden**, wie das Optimierungsverfahren für Leichtbau-Konstruktionen **Evolutionary Light Structure Engineering (ELiSE)**, werden ausführlich in Kapitel 3.1 beschrieben. Da-

bei werden Ressourceneffizienzpotenziale durch Leichtbaulösungen gehoben, indem im Herstellungsprozess von Leichtbauteilen Material eingespart wird. Bei bewegten Bauteilen hat dies in der Regel eine Reduktion des Energiebedarfs in der Nutzungsphase zur Folge. Ob diese Bauteile auch im Verwertungs- und Beseitigungsprozess vorteilhaft sind, hängt von den verwendeten Materialien und dem Fertigungsprozess der Leichtbaulösungen ab.

Das prioritäre Ziel der Unternehmen, die neue oder optimierte Produkte mit Hilfe der Bionik entwickelt haben, ist nur in wenigen Fällen eine Steigerung der Ressourceneffizienz per se. Dennoch existiert, wenn beispielsweise im Automobil- und Flugzeugbau Material oder Treibstoff eingespart werden kann und der Nutzen für Unternehmen direkt messbar ist, auch ein Einfluss auf die Schonung von Ressourcen. In der Regel wurden bionische Lösungen aber bislang noch nicht gezielt und quantifizierbar unter dem Aspekt der Ressourceneffizienz betrachtet. Dies ist aber grundsätzlich möglich. Berechnungen zur Quantifizierung unterschiedlicher Ressourceneffizienzindikatoren liegen bei dem überwiegenden Teil der bionischen Lösungen nicht vor bzw. wurden nicht veröffentlicht.

Ziel dieser Kurzanalyse ist es daher, ausgewählte Lösungen und Beispiele aus der Bionik vorzustellen, zu systematisieren und konsequent aus dem Blickwinkel der Ressourceneffizienz zu betrachten. Dazu wird das Ressourceneffizienzpotenzial unter Berücksichtigung der Methoden und Prinzipien nach den VDI-Richtlinien zur Ressourceneffizienz⁴³ **qualitativ** ausgewiesen. Die Verknüpfung von Ressourceneffizienzzielen und Bionik ist für zukünftige Innovationen, z. B. im Rahmen eines Produktentwicklungsprozesses, empfehlenswert.

Einen Ansatz lässt ein europäisches Forschungsprojekt zu Bionik und Ressourceneffizienz erkennen, das im September 2016 gestartet ist: Ziel des Projekts ist es, die Material- und Energieeffizienz von Flugzeugen zu steigern. Neben der Entwicklung eines Toolsets für das Design bionischer Flugzeugstrukturen sind eine montagenahe Produktion und optimierte

⁴³ Vgl. VDI 4800 Blatt 1:2016-02.

Konzepte für Reparatur, Ersatzteilerfertigung, Recycling sowie Entsorgung wesentliche Bausteine der Ressourceneffizienz-Maßnahmen. Hervorzuheben ist, dass in diesem Projekt Maßnahmen in allen Lebenswegphasen eines Flugzeugs umgesetzt werden sollen: in der Produktentwicklung, Produktherstellung, Nutzung und in der Verwertung/Beseitigung.⁴⁴ Hier wäre eine Begleitung zur Quantifizierung der Ressourceneffizienz interessant.

2.4 Bionik als Werkzeug in der Produktentwicklung

Im Produktentwicklungsprozess werden Funktion, Wirkprinzip, Gestalt und Werkstoff eines Produkts festgelegt. Hier werden Entscheidungen über technische, wirtschaftliche und ökologische Eigenschaften getroffen, z. B. über Herstellprozesse, Herstellkosten, Ressourcenaufwand, Nutzungs- und Recyclingeigenschaften.⁴⁵

Beim Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte muss eine Vielzahl unterschiedlicher Probleme gelöst werden. Der Produktentwicklungsprozess, der stark vereinfacht in Abbildung 1 wiedergegeben ist, lässt sich weiter systematisieren und branchenübergreifend in sieben Schritte untergliedern (Abbildung 2):⁴⁶

(1) Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung, (2) Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen, (3) Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen, (4) Gliedern in realisierbare Module, (5) Gestalten der maßgebenden Module, (6) Gestalten des gesamten Produkts, (7) Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben.

⁴⁴ Vgl. K-Magazin (2017).

⁴⁵ Vgl. Lange, U. und Oberender, C. (2017).

⁴⁶ Vgl. VDI 2221:1993-05.

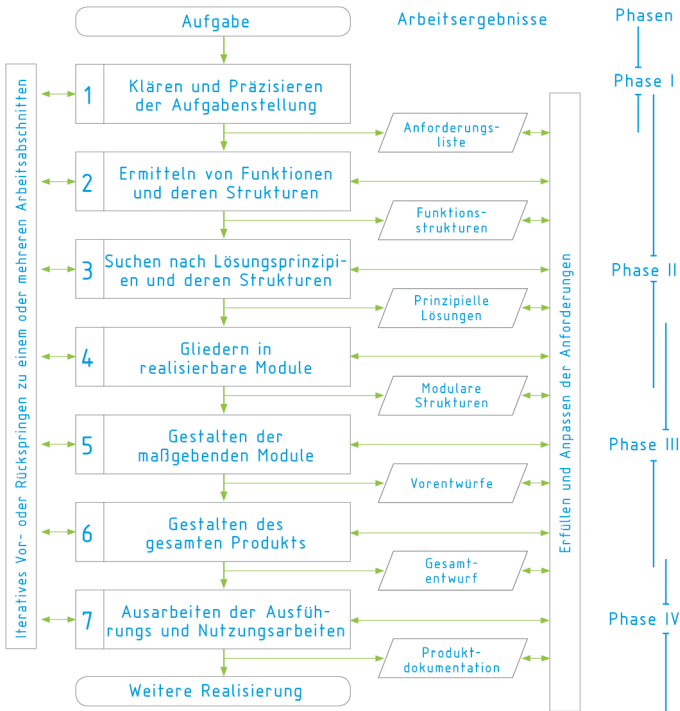


Abbildung 2: Generelles Vorgehen des methodischen Entwickelns und Konstruierens⁴⁷

Insbesondere in den Problemlösungsschritten (1) bis (3) werden unterschiedliche unternehmensinterne und -externe Zielsetzungen in einen engen Zusammenhang gestellt: Mehr oder weniger bekannte Parameter werden gesammelt, gegenübergestellt und präzisiert. Daran anschließend werden durch unterschiedliche Kreativitätsmethoden unter Einbeziehung eines bekannten Technologie-Portfolios Lösungsvorschläge gesammelt. Diese hängen oft maßgeblich vom Wissens- und Informationsstand des Bearbeiterteams ab.

⁴⁷ Vgl. VDI 2221:1993-05, S. 9. Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Prozess des bionischen Arbeitens - bionischer Entwicklungsprozess

Bionik kann den Lösungsraum wesentlich erweitern und neue, kreative Denkansätze sowohl für das zu entwickelnde Produkt als auch für alternative Produktionsprozesse geben. So kann die Bionik vor allem als Baustein eines Innovationsprozesses angesehen werden. Sie soll insbesondere den Übergang von biologischer Grundlagenforschung zu angewandter technischer Forschung und Entwicklung ermöglichen, um daraus technische Lösungen hervorzubringen.⁴⁸ Allerdings erfordert dies ein hohes Maß an Interdisziplinarität und Kooperation. Aufgrund unterschiedlicher wissenschaftlicher, methodischer und konzeptioneller Ausgangspositionen von z. B Ingenieuren, Biologen, Physikern, Biochemikern, Medizinerinnen und Informatikern kann ein bionischer Entwicklungsprozess mehr Zeit einfordern als ein konventioneller Lösungsansatz.⁴⁹ Vor allem große Unternehmen, die der Bionik offen gegenüberstehen, nehmen diesen Mehraufwand in Kauf, da sie hohe Erwartungen an das Innovationspotenzial bionischer Lösungen haben. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) haben dagegen oft nicht die entsprechend qualifizierten Produktentwickler sowie die finanziellen Mittel, um Projekte zu bionischen Alternativen selbstständig durchzuführen und bionische Lösungen in ihre Produktentwicklung zu integrieren. Den Entwicklungsingenieuren fehlen hierzu oft die notwendigen biologischen Grundlagen. Eine Ausgliederung der biologischen Lösungssuche an externe Wissenschaftler ist jedoch in der Regel nicht zielführend, da diese wiederum nicht über die unternehmensspezifischen Produkt- und Prozesskenntnisse verfügen.⁵⁰ Aus diesem Grund ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Bionik-Experten und Unternehmensmitarbeitern erforderlich (Kapitel 4).

Der Prozess des bionischen Arbeitens wird in Abbildung 3 dargestellt. Der gradlinige und stufenweise Prozessverlauf zeigt einen idealisierten Fall, häufig ist der Prozess des bionischen Arbeitens iterativ und durch sich wiederholende Bearbeitungsschleifen geprägt.⁵¹

⁴⁸ Vgl. Bertling, J. (2014), S. 150 – 153.

⁴⁹ Vgl. Bertling, J. (2014), S. 157.

⁵⁰ Vgl. Banthin, H. (2014), S. 40 – 41.

⁵¹ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 24.

Der erste Schritt zur Lösung einer technischen Fragestellung mit Hilfe der Bionik stellt eine intensive, interdisziplinäre Auseinandersetzung dar. Gemeinsam werden Ideen mit dem Ziel entwickelt, eine technische Lösung und ein biologisches Vorbild zusammenzuführen. Ausgangspunkte können Erkenntnisse aus der biologischen Grundlagenforschung sein. Dann handelt es sich wie beim Lotus-Effekt® um einen Biology Push. Wird der Impuls für eine biologische Lösung durch eine technische Problemstellung gegeben, geht es um einen Technology Pull-Ansatz. Ziel dieses Ansatzes ist oft die Verbesserung oder Weiterentwicklung eines Produkts oder Produktionsprozesses.⁵² Das Ergebnis des bionischen Arbeitens kann als eine mögliche Lösung in den Produktentwicklungsprozess eingehen und somit den Lösungsraum erweitern (Abbildung 2, Stufe 4).

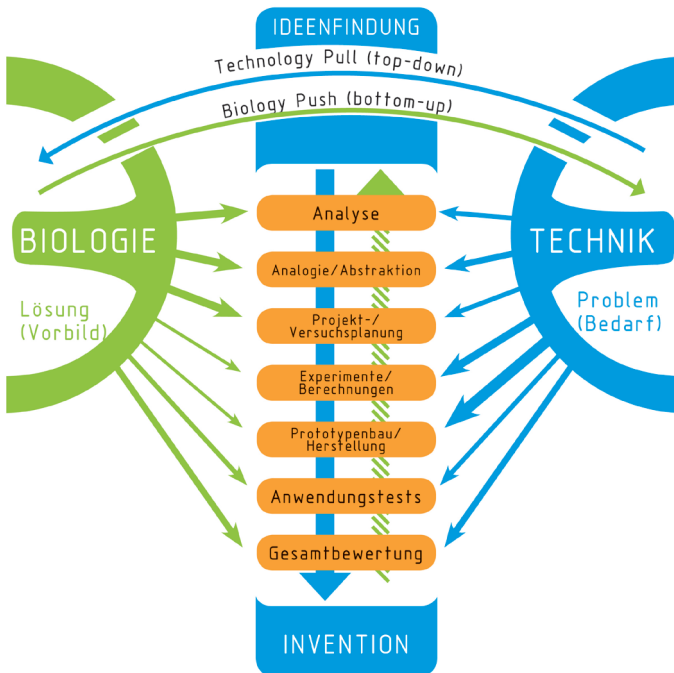


Abbildung 3: Vereinfachter Ablauf einer bionischen Entwicklung bis zur Invention⁵³

⁵² Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12.

⁵³ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 24. Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.

An die Ideenfindung schließt sich die Analysephase an. Hier werden aus der Vielzahl an Organismen, Strukturen und Funktionen – gestützt durch ingenieur- und naturwissenschaftliche Methoden, Verfahren und gegebenenfalls Experimente – potenzielle biologische Lösungen identifiziert, die auf ihre Übertragbarkeit auf das technische Problem untersucht und bewertet werden. Die daran anschließende Phase der Abstraktion oder Analogiebildung bildet das Kernstück des bionischen Arbeitens: Bei der Analogiebildung werden alle Aspekte der physikalischen Größen, wie auch „weiche“ Faktoren des biologischen und des technischen Systems, gegenübergestellt und miteinander verglichen. Daran anschließend werden die Zusammenhänge und Wechselwirkungen dieser Aspekte innerhalb der jeweiligen Systeme im Sinne des Aufbaus eines Beziehungsnetzwerks beleuchtet. Dazu sind häufig Abstraktionen notwendig, damit die relevanten funktionalen Aspekte identifiziert werden können. Abschließend werden die biologischen und technischen Beziehungsnetzwerke übereinandergelegt, um beide Systeme vergleichen zu können. Zweckmäßige Analogien werden so gefunden und mögliche Lösungsansätze ermittelt. Bionische Lösungen wären durch einen klassischen Konstruktionsansatz häufig nicht gefunden worden. Der weitere Prozess des bionischen Arbeitens unterscheidet sich nicht wesentlich vom klassischen Entwicklungsprozess in der Produktion.

Eine Besonderheit gegenüber vielen klassischen Produktentwicklungsprozessen betrifft die Notwendigkeit der Zusammenarbeit eines interdisziplinären Entwicklungsteams bzw. von interdisziplinär ausgebildeten Mitarbeitern.⁵⁴ Dies stellt Unternehmen heute noch vor große Herausforderungen, da die Ausbildung in der Regel nicht auf Interdisziplinarität ausgelegt ist.

⁵⁴ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12.

3 TECHNISCHE ANWENDUNG DER BIONIK

Wie eingangs beschrieben, sind die Herangehensweisen und Einsatzmöglichkeiten der Bionik sehr vielfältig und komplex. Im Folgenden soll deshalb ein Überblick über den Einsatz **bionischer Methoden** gegeben werden, mit denen Produkte konzipiert und optimiert werden können. Neben den bionischen Methoden (Kapitel 3.1) gibt es eine Vielzahl an bionischen Produkten (Kapitel 3.3), die mit Hilfe biologischer Vorbilder hergestellt wurden.

3.1 Bionische Methoden

Bionische Methoden oder Verfahren finden heute in erster Linie bei der Optimierung von Bauteilen, aber auch bei der Entwicklung neuer Konstruktionen Anwendung. Diese Methoden unterscheiden sich von einzelnen bionischen Produkten, die sich mehr oder weniger direkt aus Funktionsprinzipien biologischer Vorbilder ableiten lassen. Bionische Methoden lassen sich im Produktionsprozess mit einem bestimmten Ziel regelmäßig anwenden, **ohne dass es einer erneuten bionischen Entwicklung bedarf** (Abbildung 3).

Evolutionäre Algorithmen

Das Vorbild der Evolutionären Algorithmen (EA) ist die biologische Evolution mit den Mechanismen der Mutation, Selektion und Rekombination. Zwar ist die Evolution ein grundsätzlich ungerichteter Prozess, der keinem Optimum entgegenstrebt, das Ergebnis der Evolution sind aber Organismen, die sich über viele Generationen an veränderte Umweltbedingungen anpassen können. Bleiben Umweltbedingungen unverändert, verändern sich auch Arten genotypisch (vom Erbgut her bestimmt) und phänotypisch (das Erscheinungsbild eines Individuums betreffend) nur wenig. Die Mechanismen der Evolution wie Mutation, Selektion, Rekombination und Variation werden in mathematische, computergestützte Modelle und Algorithmen umgesetzt.⁵⁵

⁵⁵ Vgl. VDI 6224 Blatt 1:2012-06.

EA berücksichtigen ein konkretes im Algorithmus vorgegebenes Optimierungsziel und nähern sich diesem über mehrere Generationen an. Dazu werden die Prinzipien der Variation (Mutation und Rekombination) und Selektion mathematisch ausgedrückt und in einer computergestützten Schleife iterativ ausgeführt. Hierbei liefert die Variation die Diversität und die Selektion gibt der Evolution die Richtung vor. Die Varianten der Nachkommen, die sich dem Optimierungsziel am besten genähert haben, bilden die neuen Eltern.

Bionische Methode: Evolutionäre Algorithmen

Ziel	Systemverbesserung und Optimierung
Biologisches Vorbild	Prozesse der Evolution
Funktionsprinzip	Mutation, Selektion und Rekombination sind Voraussetzung für die Anpassung der Nachkommen an veränderte Umweltbedingungen
Bionische Methode	Algorithmen, die die evolutionären Prozesse abbilden; iterativ erzeugte „Eltern“ erzeugen Nachkommen mit neuen Eigenschaften, die nach dem Optimierungsziel selektiert werden
Ressourceneffizienzpotenzial	Ressourceneffizienz kann ein Optimierungsziel sein
Zusätzliche Vorteile	Lösung mehrdimensionaler oder mehrkriterieller Optimierungsprobleme (Kriterien z. B.: Kosten, Zeit, Ressourceneffizienz), für die keine Standardverfahren vorliegen
Entwicklungsstadium	Marktreife, Standardisierung

EA lassen sich in der Produktentwicklung häufig als zusätzliches Instrument einsetzen, um eine optimale Lösung zu finden. Es können grundsätzlich alle denkbaren technischen und nicht technischen Fragestellungen bearbeitet werden. Das gilt auch für die Optimierung bei mehreren Zielen (mehrkriteriell), die unter Umständen im Widerspruch zueinander stehen und nicht miteinander vergleichbar sind. Beispiele dafür sind der Preis, der CO₂-Ausstoß und die Motorleistung eines Gebrauchtwagens. Auch Kriterien für Ressourceneffizienz wie Material- oder Energieeinsparung können als ein Optimierungsziel in den Algorithmus eingebracht werden.

EA werden in der Regel dann eingesetzt, wenn

- keine Standardlösungen für das Optimierungsproblem bekannt sind oder es keine konventionellen Algorithmen dafür gibt,
- die bekannten Standardlösungen nicht erfolgreich angewendet werden können oder

- die Lösung des Optimierungsproblems mit herkömmlichen Verfahren zu aufwendig ist.⁵⁶

Mit EA können hochdimensionale Optimierungsprobleme gelöst werden. Besonders geeignet sind sie für Fragestellungen, die extrem komplex und nicht analytisch lösbar sind oder nur experimentell geklärt werden können. Für derartige Probleme existieren keine Standardverfahren, weil beispielsweise keine mathematisch formulierbare Zielfunktion vorliegt oder es keine Gradienteninformationen gibt.⁵⁷ Ein bekanntes Beispiel, das den Ablauf der EA verdeutlicht, stellt die optimale optische Sammellinse dar, die nicht als dünne Linse idealisiert ist. Lichtstrahlen werden in einem Glaskörper unterschiedlich stark gebrochen. Werden die Dicken an den entsprechenden Stellen durch die Methode der EA richtig eingestellt, werden die Strahlen so gebrochen, dass sie alle in einem Punkt zusammentreffen. Weitere Beispiele zu verschiedenen Optimierungsproblemen gibt die Richtlinie VDI 6224 Blatt 1.⁵⁸

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die Anwendung von EA kann immer dann einen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten, wenn die Schonung einer Ressource als Optimierungsziel in der Ausführung des Algorithmus berücksichtigt wird. Dies ist auch bei sich widersprechenden Zielen möglich. In diesen Fällen findet der EA die bestmögliche oder effizienteste Lösung unter Berücksichtigung der jeweiligen vorgegebenen Ziele.

Bionische Strukturoptimierung mit Algorithmen

Biologische Kraftträger wie Bäume und Knochen sind optimal an ihre jeweilige Belastung angepasst. Für alle gelten die gleichen Gestaltungsprinzipien wie das Axiom konstanter Spannungen.⁵⁹ Die biologischen Vorbilder sind in der Lage, „im Betrieb“ Material an den Stellen anzulagern, an denen höhere Belastungen auftreten (Bäume), und an weniger lasttragenden Stellen abzubauen (Knochen). Aufgrund konstant verteilter Spannungen kön-

⁵⁶ Vgl. VDI 6224 Blatt 1:2012-06.

⁵⁷ Vgl. Seitz, H. (2013), S. 37.

⁵⁸ Vgl. VDI 6224 Blatt 1:2012-06.

⁵⁹ Vgl. VDI 6224 Blatt 2:2012-08.

nen Versagensbrüche, die durch wiederkehrende Belastungen auftreten, vermieden werden.

Die bionische Strukturoptimierung nutzt diese natürlichen Prinzipien, um sie auf lasttragende Bauteile zu übertragen. Bauteileigenschaften, die optimiert werden sollen, sind in diesem Fall Masse, Festigkeit, Steifigkeit oder Lebensdauer. Aus den Wachstumsprinzipien der biologischen Vorbilder haben Wissenschaftler am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) drei bionische Verfahren abgeleitet und in Computersimulationen überführt, die auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basieren. Mit diesen Methoden lassen sich Topografie-, Topologie- und Faserverbundoptimierung erzielen.^{60, 61}

(1) **CAO: Computer Aided Optimization (Gestaltoptimierung)**

Verminderung bauteilschädigender Spannungen während der Konstruktion. Lokal auftretende Spannungsspitzen werden abgebaut, indem in Kerbbereichen Material angelagert wird, bis eine gleichmäßige Oberflächenspannung entsteht.

(2) **SKO: Soft Kill Option (Gewichtsoptimierung)**

Topologieoptimierung nach dem Vorbild des Knochenwachstums, bei der das Innere eines Bauteils verändert wird. Bereiche mit hoher Belastung werden verstärkt und ausgesteift; Bereiche mit geringer Belastung werden entfernt.

(3) **CAIO: Computer Aided Internal Optimization (Materialoptimierung)**

Fasern technischer Bauteile müssen entlang dem Kraftfluss orientiert werden, damit das Potenzial von Faserverbundwerkstoffen optimal genutzt werden kann. Der Faserverlauf darf dabei nicht an geometrischen Störungen wie Löchern durchtrennt werden. Dies gelingt durch die Umlenkung von Fasern an den Störungen, so dass die Fasern nur auf Zug und Druck belastet werden und der unvorteilhafte Schub zwi-

⁶⁰ Vgl. Mattheck, C. (2006), S. 51 ff.

⁶¹ Vgl. Mattheck, C. (2010), S. 23 – 31 und S. 104 – 110.

schen ihnen minimiert wird. Auf diese Weise kann mit möglichst wenig Material die benötigte Festigkeit erreicht werden.

Eine genaue Beschreibung der Verfahren mit Hinweisen zur Umsetzung in der FEM und Anwendungsbeispiele geben die Standards und Normen des VDI und DIN/ISO.^{62, 63}

Bionische Methode: Bionische Strukturoptimierung mit Algorithmen

Ziel	Optimale Auslegung von Bauteilen, u. a. Masse, Festigkeit, Steifigkeit, Lebensdauer
Biologisches Vorbild	Wachstum und Abbau von Material bei Bäumen und Knochen
Funktionsprinzip	Materialanlagerung und Materialabbau in Abhängigkeit von der Belastung
Bionische Methode	Algorithmen zum Kerb- und Schubspannungsabbau, Spannungshomogenisierung, Dauerfestigkeit und Materialeinsparung an unbelasteten Bereichen
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Längere Produktlebensdauer durch höhere Stabilität, Gewichtseinsparung der Produkte
Entwicklungsstadium	Gängige Optimierungsmethode, insbesondere im Automobilbau

Die bionische, strukturmechanische Optimierung ist mittlerweile ein Standardverfahren für Leichtbauanwendungen in der Mobilitätsbranche. Diese Optimierungsmethoden geben jedoch keine Informationen über die Materialfestigkeit oder über quantitative Belastungswerte. Ein direkter Nachweis der Festigkeit des Bauteils muss nach wie vor über technische Berechnungen oder mechanische Experimente erfolgen.⁶⁴

Eine Übersicht über Anwendungen und ihren Bezug zur Ressourceneffizienz gibt die VDI ZRE-Kurzanalyse Nr. 17 „Ressourceneffizienz im Leichtbau“.⁶⁵

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die Methoden für eine strukturmechanische Optimierung haben zum Ziel, bei gleicher oder besserer Lebensdauer der Bauteile Material und Gewicht einzusparen und damit die Produktions- und Materialkosten zu senken. In Einzelfällen sind insbesondere bei tragenden Bauteilen im Automobil- und Flugzeugbau nennenswerte Ge-

⁶² Vgl. VDI 6224 Blatt 2:2012-08, S. 8 ff.

⁶³ Vgl. DIN ISO 18459:2016-08, S. 12 ff.

⁶⁴ Vgl. Mattheck, C. (2010), S. 177.

⁶⁵ Vgl. Kaiser, O. S.; Krauss, O.; Seitz, H. und Kirmes, S. (2016), S. 62 ff.

wichtseinsparungen von bis zu 50 Prozent zu erzielen. Da es sich hier um bewegte Objekte handelt, kann durch bionischen Leichtbau zudem der Treibstoffverbrauch in der Nutzungsphase reduziert werden.

Bionische Strukturoptimierung mit grafischen Verfahren - Denkwerkzeuge nach der Natur

Aus den computerbasierten Methoden (CAO, CAIO und SKO), Bauteile nach dem Vorbild der Natur zu optimieren, wurden einfache Methoden entwickelt, zu deren Ausführung Bleistift, Papier und Geodreieck genügen. Ziele sind u. a. Vermeidung von Rissentstehung und Rissausbreitung durch Spannungsreduktion, aber auch Dauerfestigkeit und Leichtbau. Das Prinzip dieser Denkwerkzeuge liegt in der Erkenntnis, dass der 45-Grad-Winkel als heimliche Naturkonstante angesehen werden kann. Damit können bei einfachen Optimierungsproblemen Schub, Zug und Druck dargestellt und umgewandelt werden.⁶⁶

Bionische Methode: Bionische Strukturoptimierung mit grafischen Verfahren (Schubvierecke, Zugdreiecke und Kraftkegel)

Ziel	Formfindung mechanischer Leichtbauteile ohne Computer
Biologisches Vorbild	Abgeleitet aus dem Wachstum und Abbau von Material bei Bäumen und Knochen
Funktionsprinzip	Materialanlagerung und Materialabbau in Abhängigkeit von der Belastung
Bionische Methode	Abstraktion durch geometrische Darstellung des Kraftflusses und Ableitung des günstigsten Designraums im Sinne des Leichtbaus
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Softwareunabhängige Methode, um Bauräume und Designvorschläge für Leichtbaulösungen zu erhalten
Entwicklungsstadium	In der Anwendung

Mit dem so genannten Denkwerkzeug der **Schubvierecke** können Kraftflussverläufe in Bauteilen oder auch in anderen mechanisch belasteten Gegenständen ohne den Einsatz von Computern dargestellt werden. Damit hilft diese Methode, Kraftflussverläufe zu analysieren und zu verstehen. Die Kraftflüsse der Zugspannung, die auf die Bauteile beim Auseinanderziehen wirken, und die Druckspannungen, die beim Stauchen entstehen, können grafisch dargestellt werden. Werden diese Spannungen zu hoch, versagt das Bauteil.⁶⁷ In Abbildung 4 sind verschiedene Anwendungsmög-

⁶⁶ Vgl. Mattheck, C. (2010), S. 213 ff.

⁶⁷ Vgl. Mattheck, C. (2006), S. 4.

lichkeiten der Methode der Schubvierecke gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Zug- bzw. Druckspannungen immer in einem Winkel von 45 Grad auf die Bauteile wirken. Selbst für Torsionsschubspannungen lässt sich diese Methode anwenden.⁶⁸

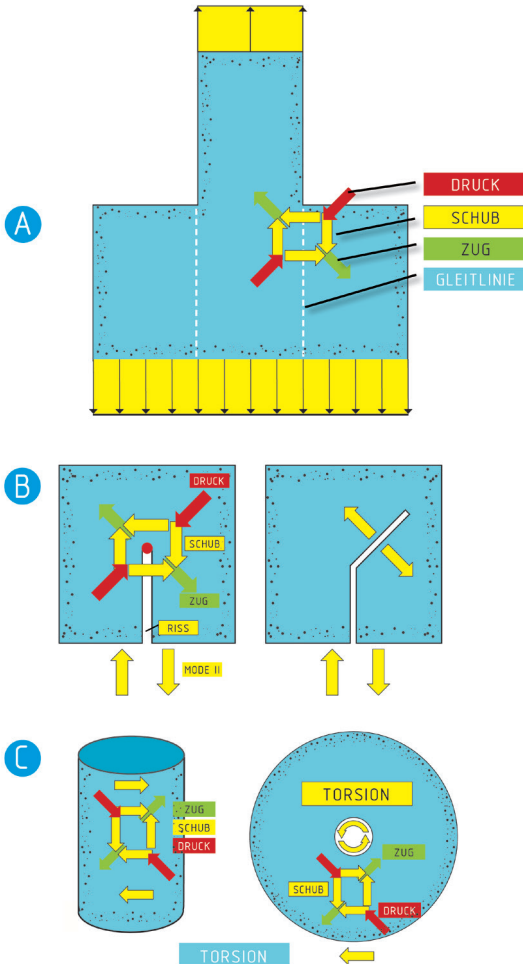


Abbildung 4: Beispiele für die Anwendung von Schubvierecken in Bauteilen (A: Zugbelastung; B: schubbelasteter Riss; C: Torsion)⁶⁹

⁶⁸ Vgl. Wissner, C. (2010), S. 26.

⁶⁹ Vgl. Mattheck, C. (2006), S. 4.

Diese 45-Grad-Winkel sind in der Natur fast überall zu beobachten. Auch dort wirken sie dem Schub entgegen und sorgen für Stabilität der jeweiligen Bestandteile in der Flora und Fauna. Beispiele dafür sind die Anordnung der Seitenadern in Blättern, die Verästelung der Baumwurzeln oder die am Federkiel angeordneten Federfahnen bei Vögeln.⁷⁰

Die Methode der **Zugdreiecke** dient in der Bauteilentwicklung dazu, durch Abrundung Kerbspannungen zu reduzieren. Als biologisches Vorbild dienen dazu die Rundungen in Astgabeln der Bäume oder auch ihre abgerundete Verankerung im Boden. Anstatt der üblicherweise verwendeten Abrundung in Form eines Viertelkreises wird über die Kerbe ein erstes Zugdreieck mit dem Basiswinkel von 45 Grad gelegt. Der nächste in Zugrichtung angelegte Winkel hat einen halb so großen Basiswinkel von 22,5 Grad und so weiter. Die daraus entstandene Form kann durch Skalierung an jeden beliebigen Bauraum angepasst werden (Abbildung 5).⁷¹ Sowohl rechnerisch als auch experimentell konnte nachgewiesen werden, dass die Spannungsspitzen, die es bei Viertelkreisübergängen gibt, durch die Methode der Zugdreiecke entfernt werden. Bauelemente wie Schrauben, Wellenschultern oder Gabelhebel weisen durch dieses Verfahren eine längere Lebensdauer an hoch belasteten Stellen auf.⁷²

Genauso, wie die Zugspannung in stark belasteten Bereichen durch bionische Kerben abgebaut werden kann, können nichttragende Bereiche bzw. Bereiche, die kraftflussfrei sind, entfernt werden. Der Vorgang bleibt gleich, allerdings lassen die Zugdreiecke das Bauteil nicht wachsen, sondern schrumpfen.⁷³

⁷⁰ Vgl. Mattheck, C. (2010), S. 46 ff.

⁷¹ Vgl. Mattheck, C. (2017), S. 90.

⁷² Vgl. VDI 6224 Blatt 2:2012-08, S. 18 – 22.

⁷³ Vgl. Mattheck, C. (2010), S. 67 – 69.

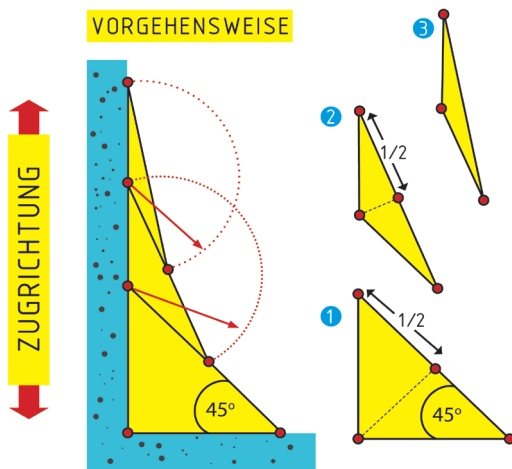


Abbildung 5: Grafische Vorgehensweise zur Optimierung von Kerben mit der Methode der Zugdreiecke⁷⁴

Die **Methode der Kraftkegel** ist ein weiteres Denkwerkzeug zur computerfreien Gestaltfindung. Sie stellt eine Ergänzung zur Methode der Soft Kill Option (SKO) dar. Bei Anwendung der Kraftkegelmethode ergeben sich im Regelfall ähnliche Designvorschläge wie bei der Anwendung der computergestützten SKO-Methode. Ziel ist es, stabile Leichtbaulösungen zu finden und gleichzeitig ein funktionelles Verständnis für Strukturelemente zu erhalten.⁷⁵ Die Methode basiert auf der Annahme, dass vor jeder Kraft ein 90-Grad-Druckkegel hergeschoben wird und hinter der Kraft ein Zugkegel gezogen wird. Dies kann grafisch dargestellt werden, indem die Druck- und Zugkegel, die auf ein geplantes Bauteil wirken, eingezeichnet werden. An den Kegelrändern - wo sich Zug- und Druckstrahlen rechtwinklig schneiden - werden Primärpunkte skizziert. An diesen Punkten werden Druckstreben und Zugseile gezeichnet, die letztlich einen Designvorschlag für das Bauteil ergeben.⁷⁶ Diese Form der Designgenerierung hilft, die Kraftflüsse ohne besondere mechanische Kenntnisse anschaulich darzustellen. Beispielsweise lässt sich die Beanspruchungsart von Druckstreben gut

⁷⁴ Vgl. Mattheck, C. (2017).

⁷⁵ Vgl. Haller, S. (2013), S. 37 ff.

⁷⁶ Vgl. Mattheck, C. (2010), S. 131 ff.

erkennen und hilft dabei, Strukturteile anderer Methoden besser zu untersuchen. Allerdings können mit dieser Methode geometrische Beschränkungen des Bauraums nicht berücksichtigt werden.⁷⁷

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die Denkinstrumente nach der Natur sind vereinfachte Verfahren der bionischen Strukturoptimierung, die ähnliche Ressourceneffizienzpotenziale wie die zuvor beschriebenen algorithmischen Methoden aufweisen.

Bionische Strukturoptimierung innerhalb eines integrativen Produktentstehungsprozesses mittels ELiSE

Basierend auf einer Vielzahl an Varianten von Schalenstrukturen verschiedener mariner Planktonorganismen wie Kieselalgen (Diatomeen) und Radiolarien wurde das Optimierungsverfahren für Leichtbau **Evolutionary Light Structure Engineering (ELiSE)** entwickelt. Die Schalenstrukturen der biologischen Vorbilder sind sehr leicht und stabil. Sie müssen sich sowohl gegen Fressfeinde und Wasserdruck schützen als auch an der Wasseroberfläche schweben, um ausreichend Licht für ihren Stoffwechsel zu erhalten. Die Strukturen der Kieselalgen wurden hinsichtlich ihrer Leichtbaueigenschaften bewertet und in einer Datenbank erfasst. Die Skalierung der mikroskopischen Leichtbaustrukturen auf große Bauteile ist möglich, da der Materialquerschnitt und Flächendruck mit dem Quadrat des Längenmaßstabes skalieren. Dies ermöglicht eine Übertragung in nahezu alle technischen Anwendungen.⁷⁸

Dieses Verfahren für Leichtbauanwendungen wurde aufgrund des hohen Ressourceneffizienzpotenzials bereits in verschiedenen Kurzanalysen des VDI Zentrums Ressourceneffizienz (VDI ZRE) erwähnt.^{79, 80}

⁷⁷ Vgl. Haller, S. (2013), S. 123.

⁷⁸ Vgl. Hamm, C. E.; Merkel, R.; Springer, O.; Jurkojc, P.; Maier, C.; Prectel, K. und Smetacek, V. (2003).

⁷⁹ Vgl. Kaiser, O. S. und Seitz, H. (2014), S. 20.

⁸⁰ Vgl. Kaiser, O. S.; Krauss, O.; Seitz, H. und Kirmes, S. (2016), S. 64 – 65.

Bionische Methode: Bionische Strukturoptimierung innerhalb eines integrativen Produktentstehungsprozesses mittels ELiSE

Ziel	Innovative Leichtbaulösungen
Biologisches Vorbild	Schalenstrukturen von Kieselalgen (Diatomeen, Radiolarien)
Funktionsprinzip	Schalenstrukturen aus Siliziumdioxid
Bionische Methode	Fünfstufige Konstruktionsmethodik: Screening und Abstraktion der Diversität der Schalenstrukturen sind ein Baustein des ELiSE-Verfahrens zur Strukturoptimierung ⁸¹
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Energieeinsparung in der Nutzungsphase, weitere Ressourceneffizienzziele können bei der Optimierung berücksichtigt werden
Zusätzliche Vorteile	Bauteilentwürfe, die so mit herkömmlichen Methoden nicht entstanden wären
Entwicklungsstadium	Methode verfügbar, wird in Unternehmenskooperation eingesetzt

Das ELiSE-Verfahren wurde in den letzten Jahren zu einer Methode für komplexe bionische Produktentstehungsprozesse im konstruktiven Leichtbau weiterentwickelt, standardisiert und teilweise patentiert.⁸² Dieser Prozess kombiniert im Produktentwicklungsprozess verschiedene bionische und klassische Methoden, um optimal angepasste Bauteile zu erhalten (Abbildung 6). Ziel ist es, in diesem Produktentstehungsprozess zukünftig die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen. In diesem ganzheitlichen Ansatz sollen Wirtschaftlichkeit, Ressourcenschonung und Recyclingfähigkeit einfließen.⁸³

Das Vorgehen des Prozesses verläuft analog zum generellen Vorgehen des methodischen Entwickelns und Konstruierens. Es findet sich auch im Prozess des bionischen Arbeitens wieder (Abbildung 3 auf Seite 30). Im ELiSE-Verfahren wurde der Prozess in fünf systematisch aufbauende Schritte unterteilt, deren Kern das Screening der biologischen Vorbilder aus der Struktur- und Leichtbaudatenbank der Kieselalgen ist:

- (1) Analyse des zu optimierenden Bauteils,
- (2) Screening und Abstraktion der biologischen Vorbilder mit Analogiesuche,
- (3) Konzeptentwicklung auf Basis der gefundenen Konstruktionsprinzipien,

⁸¹ Vgl. Alfred-Wegener-Institut (2016).

⁸² Vgl. VDI 6224 Blatt 3:2016-04 (Entwurf).

⁸³ Vgl. Kaiser, O. S.; Krauss, O.; Seitz, H. und Kirmes, S. (2016), S. 65.

- (4) Optimierung mit bionischen und klassischen Optimierungsmethoden,
- (5) Bewertung und Prototyp oder Produktentwicklung.⁸⁴

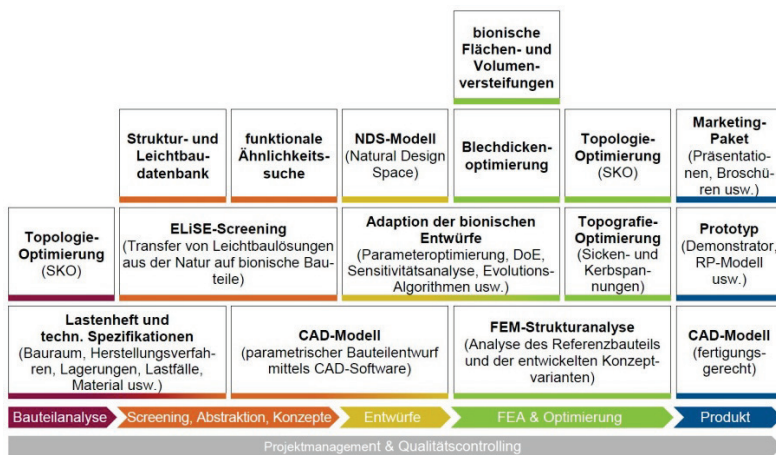


Abbildung 6: Schema eines weiterentwickelten bionischen Produktentstehungsprozesses auf Basis des ELiSE-Verfahrens⁸⁵

Durch den ELiSE-Prozess ergeben sich in Schritt drei mehrere innovative Konstruktionsvorschläge für Bauteile, die im Zuge klassischer Konstruktionsverfahren nicht entstanden wären. Diese Entwürfe werden hinsichtlich der benötigten Spezifikationen geprüft und gegebenenfalls weiterentwickelt. In der Regel endet der Prozess bei der Invention vor der Entwicklung und Markteinführung des optimierten Produkts.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Das Besondere am ELiSE-Prozess zeigt sich dahingehend, dass der gesamte Lebensweg bei der Produktherstellung betrachtet und berücksichtigt werden soll. Es können Kriterien zur Ressourcenschonung von Rohstoff, Energie und Wasser zu Beginn des Produktentwicklungsprozesses eingebracht und in der Produktherstellung berücksichtigt werden. Da es sich grundsätzlich um eine Methode für bionischen Leichtbau handelt, sollen bei gleicher oder besserer Lebensdauer der Bauteile Material und Gewicht eingespart und damit die Produktions-

⁸⁴ Vgl. VDI 6224 Blatt 3:2016-04 (Entwurf), S. 8.

⁸⁵ VDI 6224 Blatt 3:2016-04 (Entwurf), S. 9. Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.

und Materialkosten gesenkt werden. Dies hat bei mobilen Produkten eine Reduktion des Energiebedarfs in der Nutzungsphase zur Folge. Am Beispiel der Optimierung der Gründungsstruktur einer Windenergieanlage wurden Gewichtseinsparungen von 48 Prozent gegenüber einer vergleichbaren Gründungsstruktur erreicht.⁸⁶

3.2 Ein Vorbild für viele Anwendungen

Unabhängig davon, ob bionische Entwicklungen aus der Grundlagenforschung (Biology Push) oder als Antwort auf technische Fragestellungen (Technology Pull) entstehen: Zuerst wird das natürliche Funktionsprinzip analysiert. Die technische Abstraktion dieser biologischen Prinzipien führt häufig zu einem grundlegend anderen Verständnis über Wirkungsweisen und Mechanismen. Diese Erkenntnis kann – wie das Beispiel des Lotus-Effekts® zeigt – zu einem Paradigmenwechsel und Innovationssprüngen führen.⁸⁷ Superhydrophobe Oberflächen sind nicht glatt, sondern weisen eine raue Nanostruktur auf, durch die eine Kontaktfläche zur benetzenden Flüssigkeit extrem reduziert wird. Flüssigkeiten laufen nahezu ungehindert ab und hinterlassen eine trockene Oberfläche. Diese Entdeckung führte zu einem Paradigmenwechsel. Viele selbstreinigende und flüssigkeitsabweisende Oberflächen wurden daraufhin mit einer rauen Struktur ausgestattet. Auch zog diese Erkenntnis einen Innovationssprung nach sich, so dass aus dem Lotus-Effekt® bis heute mehr als 200 Nebeninnovationen entstanden sind.⁸⁸

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass aus der Analyse eines biologischen Vorbilds häufig nicht nur ein einzelnes spezielles bionisches Produkt, wie Fassadenfarbe, Klettverschluss, Dübel oder Autoreifen, entwickelt wird, sondern dass ein Funktionsprinzip eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten in zahlreichen verschiedenen Branchen nach sich ziehen kann. Tabelle 3 bildet eine Auswahl bekannter bionischer Funktionsprinzipien und deren Umsetzung ab.⁸⁹ In Kapitel 3.3 werden einzelne Anwendungsbeispiele genauer und insbesondere auch mit ihrer Bedeutung für die Ressourceneffizienz beschrieben.

⁸⁶ Vgl. Kaiser, O. S. und Seitz, H. (2014), S. 20.

⁸⁷ Vgl. Barthlott, W. (2017).

⁸⁸ Vgl. Speck, T. und Erb, R. (2011), S. 111.

⁸⁹ Vgl. Seitz, H. (2013), S. 40 – 41.

Tabelle 3: Beispiele für verschiedene Produkte beruhend auf demselben Funktionsprinzip

Marke	Funktionsprinzip	Produkt	Anwendungen
Fin Ray Effekt®	Schwanzflossen der Knochenfische biegen sich bei seitlichem Druck entgegen der Druckrichtung. Biegeelastische, verbundene Längsstrahlen verschieben sich bei gleichem Abstand gegeneinander. Es ergibt sich ein Formschluss um den druckausübenden Gegenstand.	Vileda Wischmop PowerPress®	Haushaltsgeräte
		Vileda Slalom Staubwischer	
		Rückenlehne des Autositzes, BMW Group	Automobilindustrie
		Festo AG; ⁹⁰ z. B. Greifer DHDG, Airacuda, Air_ray, AquaJelly, AirJelly	Automatisierungstechnik, Robotik
Wölbstrukturierung	Struktur der Bienenwaben und andere hexagonale Strukturen sind sehr stabil und leicht. Dünne Bleche oder Folien bilden bei Unterdruck selbstständig sechs- oder achteckige Strukturen aus, die stabil und biegeelastisch sind: Leichtbau mit geringem Materialeinsatz.	Schontrommel von Miele	Haushaltsgeräte
		Katalysatorgehäuse für Motorräder: Emitec „Leichtbaukat“	Fahrzeugbau
		HEXAL-Leuchte von SITECO mit Funktionsintegration	Beleuchtungstechnik
		3D-Dachkonstruktion der Sporthalle in Odessa	Architektur
Lotus-Effekt®	Superhydrophobe selbstreinigende mikro- und nanostrukturierte raue Oberflächen von Pflanzen wie Lotus oder Kapuzinerkresse. Raue anstelle von glatten technischen Oberflächen.	Lotusan Fassadenfarbe und Fassadenputz der Sto AG	Bauindustrie
		Erlus Lotus® Tondachziegel von Erlus	Technische Textilien, Bekleidung
		Schmutzabweisende Textilien der Hohenstein Institute	
		Glasbeschichtungen für Mautsystemkameras der Ferro GmbH	Verkehrslentechnik
Gecko-Tape®	Zehen der Geckos sind mit Lamellen und feinen Härchen im Nanometerbereich ausgestattet. Sie erzeugen eine reversible Haftung durch van-der-Waals-Kräfte. Nanostrukturierte, sich selbst organisierende technische Härchen sorgen für eine sehr starke, aber reversible Haftung an glatten Oberflächen.	Gecko®-Tape zur reversiblen Haftung der Binder GmbH	Verschiedene Branchen
		Haftpads zum Klettern an glatten Fassaden; entwickelt von der Stanford University	Arbeiten an glatten Innen- und Außenfassaden, gegebenenfalls Freizeitgestaltung
		NanoForceGripper von Festo zum automatischen Umsetzen von Mobiltelefonen (Ablösung mit Hilfe des FinRay-Effekts®)	Automatisierungstechnik

⁹⁰ Vgl. Festo (2017a).

3.3 Bionische Produkte und Lösungsansätze

Im Folgenden wird eine Auswahl an bionischen Produkten und Prototypen mit besonderem Bezug zur Ressourceneffizienz vorgestellt. Zu Beginn wird das spezifische Innovationsziel formuliert. Es ist Ausgangspunkt für eine Lösungssuche im Rahmen eines Produktentwicklungsprozesses. Das biologische Funktionsprinzip und die technische Umsetzung werden kurz erläutert. Sofern dies aus den vorliegenden Quellen abgeleitet werden kann, wird das Ressourceneffizienzpotenzial der bionischen Lösung qualitativ bewertet und die Lebenswegphase mit den relevanten Auswirkungen benannt. Zusätzliche Vorteile, die über die Aspekte der Ressourcenschonung oder Ressourceneinsparung hinausgehen, werden erwähnt.

3.3.1 Materialausnutzung und Materialsubstitution

Formsteife und biegeelastische Bauteile

Eine Struktur, die in der Natur häufig anzutreffen ist und durch Selbstverformung ausgebildet wird, ist das regelmäßige Sechseck. Beispiele lassen sich von der Struktur des Benzolrings über Bienenwaben bis zu Seeschildkrötenpanzern finden. Die hexagonale Struktur von Bienenwaben bildet sich bei einer von den Bienen erzeugten Temperatur von ca. 40 °C aus einer runden Form spontan aus.⁹¹ Hexagonale Strukturen haben viele Vorteile: Sie sind bei geringem Materialeinsatz stabil und nutzen die vorhandene Fläche optimal aus. Dünnwandige Materialien wie Metalle, Kunststoffe, Pappe und Papier bilden die so genannte sechs- oder achteckige Wölbstruktur in einem Zylinder unter Druck von selbst aus.⁹²

Herkömmliche Verfahren wie Walzen, Prägen oder Hydroforming haben hohe Plastifizierungsgrade und geringe Reserven für sekundäre Umformung oder Crash. In der Regel werden zur Herstellung teure und komplizierte Werkzeuge und Maschinen benötigt. Bei der Wölbstrukturierung bildet sich die Struktur im Material bei minimaler Plastifizierung spontan aus. Das Material nimmt die energetisch günstigste Form an. Die struktu-

⁹¹ Vgl. Pirk, C. W. W.; Hepburn, H. R.; Radloff, S. E. und Tautz, J. (2004), S. 350 – 353.

⁹² Vgl. Dr. Mirtsch GmbH (2009).

rierten Folien und Bleche weisen eine hohe Biegesteifigkeit bei geringerer Wanddicke auf. Geräusche von Wänden und Bauteilen werden minimiert, die Wärme- und Stoffübertragung wird verbessert. Zudem verfügen wölbstrukturierte Bauteile über eine hohe Oberflächengüte und blendfreie Lichtreflexion.⁹³

Bionisches Produkt: Wölbstrukturierte Bleche und Folien

Ziel	Formsteife und biegeelastische Bleche und Folien für vielfältige Anwendungen
Biologisches Vorbild	Selbststrukturierende Bienenwaben aus Wachs, geformte Rückenpanzer von Schildkröten
Funktionsprinzip	Selbststrukturierung unter bestimmten Umweltbedingungen
Technische Umsetzung	Selbstverformung der Bleche oder Kunststofffolien zu sechs- oder achteckigen Strukturen bei Unterdruck (bionische Wölbstrukturierung)
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Energieeinsparung in der Nutzungsphase (je nach Endprodukt)
Zusätzliche Vorteile	Erhalt der Oberflächengüte bei der Verformung, höherer Eigenfrequenzbereich
Entwicklungsstadium	Verschiedene Produkte am Markt

Das Verfahren der Wölbstrukturierung wird von der Dr. Mirtsch GmbH als Dienstleistung in der Produktentwicklung für Unternehmen angeboten. Aus diesen Kooperationen ist bereits eine Vielzahl an innovativen und effizienten Produkten entstanden. Ausgewählte Beispiele dafür sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Je nach Produkt sind durch den biegeelastischeren und formsteiferen Leichtbau nennenswerte Materialeinsparungen von 30 Prozent oder mehr in der Herstellungsphase möglich. Im Herstellungsprozess der strukturierten Bleche oder Folien wird lediglich ein Werkzeug benötigt, mit dem bei Unterdruck strukturierte Endlosbleche oder -folien hergestellt werden können. Im Vergleich zu Präge- oder Stanzverfahren werden bei der Wölbstrukturierung Werkzeuge und Prozessschritte und somit Material und Energie eingespart. In der Nutzungsphase ist – aufgrund der Leichtbauteile bei bewegten Endprodukten – eine Energieeinsparung zu verzeichnen.⁹⁴ Produkte, die aus Aluminiumblechen anstatt aus anderen Metallen oder Verbundmaterialien hergestellt werden, könnten gegebenenfalls besser recycelt werden. Dies würde sich günstig

⁹³ Vgl. VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2016).

⁹⁴ Vgl. Dr. Mirtsch GmbH (2017).

auf die Ressourceneffizienz in der Verwertungsphase auswirken. Demgegenüber stehen jedoch die Ressourcenaufwendungen für die Werkstoffalternativen in der Phase der Produktherstellung. Diese müssten bei einer umfassenden Ressourceneffizienzbetrachtung berücksichtigt werden.

Leichtbaukomponenten für den Flugzeugbau

Schleimpilze wachsen von einem zentralen Punkt in Richtung erreichbarer Nährstoffe und breiten sich so netzförmig aus. In diesem zweidimensionalen Netzwerk bilden sich verschiedene Knotenpunkte, die mit einer minimalen Anzahl an Schleimfäden verbunden werden. Aus diesem biologischen Wachstumsprozess haben Entwickler bei Airbus einen Algorithmus entwickelt, der dabei hilft, eine Kabinentrennwand, die das Begleitpersonal während des Flugs von den Passagieren trennt, zu optimieren. Mit Hilfe des Algorithmus können die Verbindungspunkte der aus einzelnen Streben aufgebauten Trennwand optimal verknüpft werden. Zusätzlich werden die Anschlussstellen und Formen der Streben nach dem Vorbild des Knochenwachstums optimiert. Der daraus entwickelte Biocomputation-Prozess liefert eine Vielzahl an Designvorschlägen, die ausgewertet und weiterentwickelt werden können.⁹⁵

Bionisches Produkt: Kabinentrennwand für Airbus A320

Ziel	Gewichtsreduktion von Bauteilen im Flugzeugbau
Biologisches Vorbild	Wachstum des Schleimpilzes, Knochenwachstum
Funktionsprinzip	Hierarchisch aufgebaute strukturelle Verbindungen natürlichen Wachstums ermöglichen stabilen Leichtbau
Technische Umsetzung	Algorithmus abgeleitet von verschiedenen natürlichen Wachstumsprinzipien; 3D-Druck aus Scalmalloy®
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Energieeinsparung in der Nutzungsphase, recycelbar am Lebensende
Zusätzliche Vorteile	Gewichtseinsparung
Entwicklungsstadium	Prototyp, Testreihe abgeschlossen, erster Testflug geplant

Zur technischen Umsetzung hat Airbus zusammen mit seiner Tochterfirma APWORKS ein hochperformantes Aluminiumpulver, so genanntes Scalmalloy, entwickelt, das im 3D-Druck (Additive Layer Manufacturing, ALM) eingesetzt werden kann. Die daraus hergestellten Bauteile weisen nahezu eine Festigkeit wie Titan auf.⁹⁶ Zur Fertigstellung werden 116 Einzelbau-

⁹⁵ Vgl. Ars Electronica (2016).

⁹⁶ Vgl. APWORKS (2017).

teile additiv hergestellt und verschraubt. Dies ist erforderlich, da eine Kabinentrennwand – nicht zuletzt aufgrund der Größe – nicht in einem Stück gedruckt werden kann.

Bundesumweltministerin Hendricks zeichnete die bionische Kabinentrennwand am 28. November 2016 mit dem Bundespreis Ecodesign in der Kategorie „Konzept“ aus. Gründe waren der herausragende Leichtbau und die damit verbundene Treibstoffeinsparung in der Nutzungsphase.⁹⁷

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Durch die additive Fertigung konnte in der Herstellungsphase eine nennenswerte Materialeinsparung erzielt werden, die bei gleicher Festigkeit zu einer Gewichtsreduktion von 45 Prozent (30 kg) im Vergleich zu bisherigen, herkömmlich gefertigten Trennwänden führt. Airbus schätzt, dass mit dem leichteren Bauteil in der Nutzungsphase etwa zehn Tonnen CO₂-Emission pro Flugzeug im Jahr eingespart werden können.⁹⁸ Zudem ist Scalmalloy vollständig rezyklierfähig.

Fassadenverschattung

Bewegliche Strukturen sind Grundlage für die meisten komplexen technischen Produkte. Relativ einfache Bewegungen wie Öffnen und Schließen werden dabei in der Regel mit Gelenken aus Scharnieren, steifen Stäben und Platten sowie einem (elektrischen) Antrieb umgesetzt. Diese beweglichen Strukturen müssen oftmals mit Schmierstoffen gängig gemacht werden und verschleifen in der Nutzungsphase.

Öffnen und schließen sind in der Natur sehr häufig zu beobachtende Mechanismen. Beispielsweise schließen sich fleischfressende Pflanzen sehr schnell, sobald eine Beute auf ihnen gelandet ist. Blütenblätter, Fichtenzapfen und Samenkapseln weisen unterschiedliche Öffnungsmechanismen auf, die ohne zusätzliche Bauteile auskommen und aufgrund von biegeelastischen Strukturen funktionieren. In den Fokus der Forschung ist die Paradiesvogelblume (Strelitzie) gerückt. Diese Blume stammt aus Südafrika und wird von Vögeln bestäubt. Dazu lassen sie sich auf einer von der Blüte

⁹⁷ Vgl. HamburgAviation (2016).

⁹⁸ Vgl. Airbus (2017).

gebildeten Sitzstange nieder, die aus zusammengewachsenen Blütenblättern gebildet wird. Durch das Gewicht des Vogels und den Druck nach unten öffnen sich die Blütenblätter und die Pflanze gibt Pollen ab, der am Federkleid des Vogels hängen bleibt. So kann der Vogel den Pollen auf die nächste Blüte übertragen.⁹⁹ Dieser Effekt ist besonders interessant, da Tests gezeigt haben, dass die Blüte der Strelitzie bis zu 3.000 Mal aufgebo-gen werden kann, ohne dass es zu einem Materialversagen kommt.¹⁰⁰

Bionisches Produkt: Flectofin®

Ziel	Wartungs- und verschleißarmes Verschattungssystem für große und komplexe Gebäude
Biologisches Vorbild	Elastischer Verformungsmechanismus der Blüte der Paradiesvogelblume
Funktionsprinzip	In der Mitte verbundene Blütenblätter klappen bei der Bestäubung elastisch zur Seite (Bestäubung durch Vögel; ihr Gewicht verbiegt die Sitzstange)
Technische Umsetzung	Lamellen aus Faserverbundmaterial befestigt an einer deformierbaren Mittelstange; elastische Verformung der Stange erzeugt stufenloses Öffnen und Schließen der Lamellen
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Material- und Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Zeiteinsparung durch lange Wartungsintervalle, stufenlose Steuerung
Entwicklungsstadium	Modell „One Ocean“, bislang keine weiteren Produkte bekannt

Dieser Klappmechanismus, seine Abstraktion und technische Umsetzung dienten der Entwicklung der Fassadenverschattung Flectofin® als biologisches Vorbild. Dazu wurden biegsame, hochelastische Lamellen aus Glasfaserverbundmaterial entwickelt, die ohne Gelenke oder Scharniere bewegt werden können. Für die Lamellen wurden mehrere Materialschichten übereinander laminiert. An einer Kante befindet sich ein steifes Rückgrat und gegenüber ein elastisch deformierbares Segel. Wird nun eine Kraft auf das Rückgrat ausgeübt, klappt die Zugspannung im Material das Segel um. Abhängig von der Stärke der Verformung verschattet das Segel die Fassade ganz oder nur teilweise.¹⁰¹ Zu sehen war dieses Verschattungssystem im Jahr 2012 am Themenpavillon „One Ocean“ bei der Weltausstellung in Südkorea.¹⁰²

⁹⁹ Vgl. Baulinks (2014).

¹⁰⁰ Vgl. Speck, T.; Speck, O.; Neinhuis, C. und Bargel, H. (2012), S. 104 – 105.

¹⁰¹ Vgl. Lienhard, J.; Schleicher, S.; Poppinga, S.; Masselter, T.; Milwich, M.; Speck, T. und Knippers J. (2011).

¹⁰² Vgl. Universität Stuttgart (2012).

Dieser Klappmechanismus ist eine wichtige Entwicklung im Bauwesen, der allerdings im eigentlichen Verständnis der Ingenieurwissenschaften ein Materialversagen darstellt. Dass sich ein Bauteil unter großer Last deutlich verbiegt, gilt es klassischerweise zu verhindern. Ohne die biologische Inspiration wäre diese Form einer Fassadenverschattung wahrscheinlich nie entstanden. Der Flectofin® ist für die Anwendung bei großen, hohen Nutzgebäuden wie Bürogebäuden und Produktionshallen geeignet.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: In der Herstellungsphase werden Rohstoffe eingespart, da die bionische Fassadenverschattung aus weniger Bauteilen besteht als klassische Verschattungssysteme. In der Nutzungsphase ist der Flectofin® im Gegensatz zu klassischen Verschattungssystemen grundsätzlich wartungsfrei und zeigt nahezu keinen Verschleiß. Auf Schmierstoffe kann vollständig verzichtet werden. Die Verformung benötigt verhältnismäßig wenig Energie und kann sensorisch in Abhängigkeit vom Grad der Sonneneinstrahlung gesteuert werden. Somit werden in der Nutzungsphase des Verschattungssystems Energie und Material eingespart.

Selbstschärfende Klingen

Über Jahrmillionen hinweg haben sich die Zähne von Nagetieren zu effizienten Kau- und Schneidwerkzeugen entwickelt. Trotz ihrer vergleichsweise geringen eigenen Härte sind diese Zähne in der Lage, harte Materialien zu zerschneiden. Dies wird auf einen Zahnaufbau mit kombinierten Materialien zurückgeführt: Eine Zahnschmelzschicht an der Zahnvorderseite (Härte: HV 400) und ein etwa halb so weicher Zahnkern aus Dentin (Härte: HV 200) sind durch ein räumliches Raster perfekt verzahnt und in ihrer Härte gradiert. Dadurch erreichen die Zähne eine große Wirkung. Die dünne Schmelzschicht bildet die Freifläche beim Schneiden, sie wird durch das freigelegte Dentin getragen und stabilisiert.¹⁰³ Dieser Zahnaufbau ist auch verantwortlich für den Selbstschärfungseffekt der Zähne. Durch den gerichteten Verschleiß des gegenüber dem Zahnschmelz weicheren Den-

¹⁰³ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 14.

tins bleibt an der Zahnvorderkante eine harte Schmelzschicht stehen und erzeugt eine scharfe Schneidkante.^{104, 105}

Bionisches Produkt: Rodentics®

Ziel	Selbstschärfende Messer für den industriellen Einsatz
Biologisches Vorbild	Zähne von Nagetieren mit weichem innenliegenden Dentin und hartem außenliegenden Zahnschmelz
Funktionsprinzip	Selbstschärfung durch gerichtete Abrasion
Technische Umsetzung	Klingen aus zwei Werkstoffkomponenten: innen: Hartmetall, Außenschicht: Keramik
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung und Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Längere Wartungsintervalle, dadurch Zeiteinsparung
Entwicklungsstadium	Praxiseinsatz

Das natürliche Nachwachsen der Zähne gleicht einen hohen Zahnverschleiß aus. Dieses biologische Prinzip wurde bei der Entwicklung und Konstruktion von Werkzeugen für Schneidanwendungen durch die vier Fraunhofer-Institute für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Schicht- und Oberflächentechnik (IST), Produktionstechnologie (IPT) sowie Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) angewendet. Hier wurden verschiedene Werkstoffkombinationen der selbstschärfenden Klingen für spezifische Werkstück-Anwendungen getestet. Mittlerweile werden die Messer in Serie gefertigt und befinden sich im Praxiseinsatz.^{106, 107}

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Durch den selbstschärfenden Effekt der Messer werden geringe Schnittkräfte erzeugt. Die Verschleißbeträge der selbstschärfenden Schneiden sind geringer als bei konventionellen Schneiden, so dass sich die Nutzungsdauer der Schneiden erhöht und weniger Schneidteile benötigt werden. Diese müssen somit nicht mehr gefertigt werden, was mit einer Material- und Energieeinsparung einhergeht. Das Ressourceneffizienzpotenzial in der Herstellungsphase selbstschärfender Messer, im Vergleich zu konventionellen Schneidteilen, müsste im Einzelfall - je nach Einsatzgebiet und verwendetem Werkstoff für das zu bearbeitende Werkstück - bestimmt werden.

¹⁰⁴ Vgl. Gäbler, J.; Kusumah, I. und Pleger, S. (2007).

¹⁰⁵ Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2017).

¹⁰⁶ Vgl. Gäbler, J.; Kusumah, I. und Pleger, S. (2007).

¹⁰⁷ Vgl. BOKON (2014b).

Optimierte Textilien

Die Seidenfäden von Spinnen stehen schon seit langem im Fokus der Forschung. Sie sind extrem leicht, reißfest und dabei elastisch. Spinnenseide kann dreimal mehr Energie aufnehmen als Kevlar, bevor sie reißt.¹⁰⁸ Es gelang, die Gensequenz zur Herstellung der Seidenproteine zu entschlüsseln und diese von E.coli-Bakterien produzieren zu lassen. Die so biotechnisch gewonnenen pulverförmigen Seidenproteine haben erstaunliche Eigenschaften und können zu unterschiedlichen Applikationen verarbeitet werden. Beispielsweise sind sie biokompatibel und gut verträglich, so dass daraus transparente Wundauflagen, durch die der Heilungsprozess beobachtet werden kann, oder Beschichtungen für Implantate hergestellt werden können.¹⁰⁹

Die eigentliche Bionik kommt erst bei dem Spinnprozess zum Einsatz. Das herkömmliche Verfahren, Fäden durch Extrusion herzustellen, ist für die Seidenproteine ungeeignet, da die Proteine nicht richtig ausgerichtet werden können. Aus diesem Grund musste der Spinnapparat aus Spinndrüse, Spinnkanal und Spinnwarze technisch abstrahiert und nachgebildet werden. In dem bionischen Spinnverfahren wird der Spinnkanal durch Ionenaustauschkanäle nachempfunden und ein Zugmechanismus sorgt für die richtige Proteinausrichtung, um tatsächlich Seidenproteine spinnen zu können.¹¹⁰

Die AMSilk GmbH bei München ist eine Ausgründung der Technischen Universität München und stellt diese Seiden-Biopolymere her. Vermarktet werden sie unter dem Label Biosteel®. Die textilen organischen Fasern sind unter anderem biokompatibel, atmungsaktiv, sehr robust und bioabbaubar.¹¹¹

¹⁰⁸ Vgl. Scheibel, T. (2009), S. 23 – 25.

¹⁰⁹ Vgl. Dostert, E. (2017).

¹¹⁰ Vgl. Scheibel, T. (2009), S. 23 – 25.

¹¹¹ Vgl. Amsilk (2017).

Bionisches Produkt: Biosteel®

Ziel	Leichte, hautverträgliche und umweltverträgliche textile Materialien
Biologisches Vorbild	Seidenfäden von Netzspinnen (z. B. Gartenkreuzspinnen)
Funktionsprinzip	Seidenproteine werden zu extrem reißfesten, leichten, elastischen Fäden in der Spinnrüse versponnen
Technische Umsetzung	Biotechnologische Herstellung einer Proteinsuspension; technische Verknüpfung der Proteine zu endlosen Mono- oder Multifilamenten
Ressourceneffizienzpotenzial	Material- und Energieeinsparung in der Produktherstellung, Ressourcenschonung in der Entsorgungsphase
Zusätzliche Vorteile	Längere Produktlebensdauer, besserer Tragekomfort, Naturmaterial
Entwicklungsstadium	Prototyp

Der Sportbekleidungshersteller Adidas hat im November 2016 einen Laufschuh auf den Markt gebracht, dessen Obermaterial aus Seiden-Biopolymeren der Firma AMSilk hergestellt wird.¹¹² Bei Adidas wird dieser Schuh unter „Futurecraft Biofabric“ als Innovation bei Sportartikeln angeboten. Das Unternehmen will weitere Forschung dazu durchführen, wie die Biosteel®-Fasern in größerem Maßstab in weiteren Produkten verarbeitet werden können.¹¹³

Ein anderes aktuelles Forschungsprojekt beschäftigt sich mit der Herstellung von Seidenfasern aus Proteinen der Kuhmilch-Molke. Dabei machen sich die Forscher zunutze, dass sich unter bestimmten Umgebungsbedingungen Nanofibrillen selbstorganisiert ausbilden. Diese Fibrillen werden unter seitlichen Wasserstrahlen durch einen Kanal gepresst und zu Fasern verdichtet. Das verwendete Molke-Protein bildet unter Einfluss von Hitze und Säure entsprechende Nanofibrillen von etwa 2.000 Nanometer Länge und vier bis sieben Nanometer Dicke. Potenzial für zukünftige Anwendungen sehen die Forscher beispielsweise im Rahmen von Biosensoren oder selbstauflösenden Wundverbänden.¹¹⁴

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Spinnenseidenpolymere werden biotechnologisch erzeugt und ersetzen damit fossile Rohstoffe bei der Produktherstellung. Es ist zu vermuten, dass in der Produktherstellung Material und Energie eingespart werden können. Allerdings wurde der Herstellungsprozess der biotechnologisch gefertigten Proteine nicht einem Her-

¹¹² Vgl. ADIDAS AG (2016).

¹¹³ Vgl. Bioökonomie.de (2016).

¹¹⁴ Vgl. Kamada, A.; Mittal, N.; Söderberg, L. D.; Ingverud, T.; Ohm, W.; Roth, S. V.; Lundell, F. und Lendel, C. (2017), S. 1232 – 1237.

stellungsprozess von ölbasierten Polymeren gegenübergestellt, so dass eine abschließende Aussage zur Ressourceneffizienz in der Produktherstellung nicht möglich ist. Hervorzuheben ist, dass die Fasern aus Spinnenseidenpolymeren bioabbaubar sind und damit einen Beitrag zur Ressourceneffizienz in der Verwertungsphase leisten können. Zudem ist anzunehmen, dass die Biosteel®-Fasern sehr haltbar sind und die Laufschuhe gegebenenfalls seltener ersetzt werden müssen, was zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer und damit zu einer Materialeinsparung führen könnte.

3.3.2 Oberflächenschutz und Oberflächenfunktion

Oberflächenstrukturen zum Flüssigkeitstransport

Bei der Entwicklung funktionaler Oberflächen für einen passiven, gerichteten Flüssigkeitstransport war die texanische Krötenechse das biologische Vorbild. Um ihren Flüssigkeitsbedarf zu decken, kann sie Flüssigkeit auf ihrer Haut sammeln. Dies wird durch die besondere Oberflächenstruktur mit Kapillarkanälen zwischen ihren Schuppen möglich. So sammelt sie mit Hilfe der periodisch und asymmetrisch wechselnden Formen von Kapillaren, die sich zusammenziehen und wieder weiten, kleinste Wassermengen aus feuchtem Sand. Das kondensierte Wasser gelangt über eine Verbindung der Kapillarkanäle, die zudem einen Rückstrom verhindern, über die Kopfgregion direkt ins Maul der Echse. Dieser gerichtete, passive Flüssigkeitstransport funktioniert auch entgegen der Schwerkraft.¹¹⁵ Technisch umgesetzt, könnten solche funktionalen Mikrostrukturen bei Lagern oder Schneidwerkzeugen die Verteilung von Schmierstoffen verbessern und damit den Verschleiß mindern. Für die Entwicklung eines Prototyps konnte die funktionale Oberfläche der texanischen Krötenechse mit Hilfe des Laserstrahlstrukturierens auf metallische Bauteile aufgebracht werden. Weitere denkbare Einsatzmöglichkeiten bestehen bei der Entwicklung neuer Sensoren, Filtersysteme, Ölabscheidevorrichtungen oder Wärmetauscher.¹¹⁶

¹¹⁵ Vgl. Comanns, P.; Buchberger, G.; Buchsbaum, A.; Baumgartner, R.; Kogler, A.; Bauer, S. und Baumgartner, W. (2015).

¹¹⁶ Vgl. Fraunhofer IPT (2013).

Bionisches Produkt: BioLas.exe

Ziel	Gezielter Flüssigkeitstransport auf Oberflächen
Biologisches Vorbild	Schuppenstruktur der texanischen Krötenechse
Funktionsprinzip	Periodisch und asymmetrisch wechselnde Form von Kapillaren, die sich zusammenziehen und wieder weiten; Verbindung zwischen den Kapillarkanälen, die ein Rückströmen verhindert
Technische Umsetzung	Sägezahn-förmige Kapillarstrukturen durch Laserstrukturierung in technische Oberflächen; Software zur Übertragung der Strukturen auf frei geformte Oberflächen
Ressourceneffizienzpotenzial	Material- und Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	z. B. Verbesserung der Verteilung von Schmierstoffen bei Lagern oder Schneidwerkzeugen (dadurch: Verschleißverringering)
Entwicklungsstadium	Demonstrator, Prototyp

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die gleichmäßige Verteilung von Schmierstoffen auf Werkzeugen kann eine Einsparung in der Nutzungsphase der Werkzeuge zur Folge haben. Optimierte geschmierte Bauteile weisen einen geringeren Verschleiß auf. Damit geht einher, dass Bauteile seltener repariert oder ausgetauscht werden müssen. Dies ist ein Beitrag zur Materialeinsparung in der Nutzungsphase. Weiterhin ist der Energieaufwand in der Bearbeitungsphase bei gut geschmierten Bauteilen in der Regel geringer. Insofern lässt sich auch hier eine Einsparung in der Nutzungsphase ableiten.

Fassadenfarben

Aus ästhetischen Gründen, aber auch aus Gründen der Erhaltung der Baustanz, soll verhindert werden, dass sich an der Außenfassade von Gebäuden Bakterienfilme bilden und Algen sowie Pilze anheften. Diese können die Fassade verfärben oder mit ihren Stoffwechselprodukten die Baustanz angreifen. Zum Anheften oder Besiedeln benötigen diese Organismen ein feuchtes Mikroklima. Daher ist es sinnvoll, Fassadenfarben einzusetzen, bei denen Regen- oder Kondenswasser möglichst schnell abfließt, um für eine schnell trocknende Oberfläche zu sorgen.

Das biologische Vorbild für eine bionische Fassadenfarbe der Sto SE & Co. KGaA war der Nebeltrinkerkafer, dessen Funktionsprinzipien auch bei der Entwicklung des Nebelfängers genutzt werden (siehe weiter unten). Die besondere Oberflächenstruktur des Käfer-Rückenpanzers aus hydrophilen Hügel und hydrophoben Tälern ermöglicht eine schnelle Kondensation

des Wassers, gefolgt von einem raschen Abfließen in Richtung Schwerkraft.¹¹⁷ Dieses Funktionsprinzip wurde für die Dryonic® Fassadenfarbe durch eine Mischung aus Bindemitteln, Pigmenten und Füllstoffen technisch umgesetzt. Insbesondere die Füllstoffe mit unterschiedlicher Teilchengröße und Oberflächenpolarität nehmen einen wesentlichen Einfluss auf den gewünschten Effekt. In der Trocknungsphase bildet sich durch Selbstorganisation der eingesetzten Rohstoffe eine Struktur aus hydrophilen und hydrophoben Bereichen. Aufgrund des schnellen Abtrocknens der Oberfläche konnte auf den Zusatz von Bioziden verzichtet werden.¹¹⁸

Bionisches Produkt: Dryonic®

Ziel	Schnelle Trocknung von Außenfassaden nach Regen oder Taubildung
Biologisches Vorbild	Mikrostrukturierung der Oberfläche von Deckflügeln des Nebeltrinkerkäfers
Funktionsprinzip	Oberfläche mit hydrophilen Spitzen und wasserableitenden, hydrophoben Tälern kondensiert Feuchtigkeit und leitet diese ab
Technische Umsetzung	Dispersionssilikat-Fassadenfarbe mit selbst-organisierender Bindemittel-Füllstoff-Architektur
Ressourceneffizienzpotenzial	Rohstoffeinsparung in der Nutzungsphase, Material- und Energieeinsparung in der Produktherstellungsphase, Schonung der Ökosystemleistungen in der Entsorgungsphase
Zusätzliche Vorteile	Gegebenenfalls Schutz des Untergrundmaterials (kein Eindringen von Feuchtigkeit in Bauteile); CO ₂ -Zertifikate: CO ₂ -neutrale Farbe
Entwicklungsstadium	Produkt am Markt erhältlich

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Das Ressourceneffizienzpotenzial der Fassadenfarbe Dryonic® lässt sich lediglich anhand des technischen Merkblattes¹¹⁹ und der Herstellerangaben abschätzen. Fassaden werden im Laufe der Zeit, ungeachtet der Qualität der Farbe, von Bakterien, Algen und Pilzen besiedelt. Die bionische Fassadenfarbe bietet das Potenzial, dass – je nach Umweltbedingungen – der Anstrich seltener erneuert werden muss. Dies kann zu einer Einsparung an Rohstoffen in der Nutzungsphase führen, da insgesamt weniger Farbe verwendet wird. Eine Aussage über die Ressourceneffizienz in der Produktherstellung gegenüber anderen Fassadenfarben ist nur in Bezug auf die Verwendung von Bioziden möglich: Da auf diese verzichtet wird, müssen sie nicht hergestellt werden. Dies führt zu einer Material- und Energieeinsparung in der Produktherstellung. In der

¹¹⁷ Vgl. Baulinks (2015).

¹¹⁸ Vgl. Fraunhofer IPA (2015).

¹¹⁹ Vgl. Sto (2016).

Verwertungsphase ist aufgrund des Verzichts auf Biozide eine umweltfreundlichere Beseitigung der Fassadenfarbe möglich, was sich positiv auf die Ressource Wasser und die Biodiversität auswirkt. Somit werden Ökosystemleistungen geschont.¹²⁰

Trinkwassergewinnung

In Mittel- und Nordeuropa ist es schwer vorstellbar, dass es auf der Welt mehr als eine Milliarde Menschen gibt, die keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben. 2,6 Milliarden Menschen leben ohne Wasserversorgung und Abwassersystem. Insbesondere in den Entwicklungsländern verbringen meist Frauen täglich mehrere Stunden mit der Beschaffung von Wasser.¹²¹ Aufgrund dieser Tatsache, die durch den Klimawandel voraussichtlich noch verstärkt wird, wurde unter der Federführung des Instituts für Textil- und Faserforschung Denkendorf (ITV) eine bionische Wassersammlung für Wüstenregionen entwickelt. Denn auch in den Wüstenregionen der Welt gibt es Wasser, hier allerdings in Form von Abend- und Frühnebel. Der Nebeltrinkerkäfer ist in der Lage, das Wasser aus dem Nebel zu sammeln.¹²²

Die vorliegenden Entwicklungen für so genannte Nebelfänger wurden in einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt vom ITV-Denkendorf mit Hilfe des biologischen Vorbilds optimiert. Ziel war es, sauberes Wasser in nennenswerter Ausbeute zu sammeln. Nach Analyse der Oberflächeneigenschaften des Rückenpanzers des Nebeltrinkerkäfers konnte das Funktionsprinzip in technische Fasern umgesetzt werden.

¹²⁰ Vgl. Baulinks (2015).

¹²¹ Vgl. Naturefund (2017).

¹²² Vgl. Granitza, E. (2013).

Bionisches Produkt: Nebelfänger

Ziel	Trinkwassergewinnung in Wüstengebieten
Biologisches Vorbild	Mikrostrukturierung der Oberfläche von Deckflügeln des Nebeltrinkerkäfers
Funktionsprinzip	Oberfläche mit hydrophilen Spitzen und wasserableitenden, hydrophoben Tälern kondensiert Feuchtigkeit und leitet diese ab
Technische Umsetzung	Mehrlagiges, auf Abstand gehaltenes Polyestergewebe; Aufstellung senkrecht zur Windrichtung; kondensiertes Wasser läuft über Rinne in Auffangbehälter
Ressourceneffizienzpotenzial	Energie- und Materialeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Bereitstellung von Trinkwasser in trockenen Regionen, Steigerung der Lebensqualität der Bewohner
Entwicklungsstadium	Machbarkeitstests in der Wüste erfolgreich, Prototyp

An die technischen Textilien wurde eine Reihe von Rahmenbedingungen gestellt. So ist es erforderlich, dass sie eine möglichst große dreidimensionale Oberfläche aufweisen, damit ausreichend Wasser kondensiert. Trotzdem müssen sie einen geringen Luftwiderstand haben, so dass die Nebelfänger nicht von Stürmen zerstört werden, zudem müssen sie UV-beständig sein. Als besonders geeignet haben sich mehrere Lagen aus Gewebe erwiesen, die aus Polyesterschlaufen aufgebaut sind. Mehrere Lagen des Gewebes werden mit Abstandhaltern versehen und wie ein Netz in den Nebelstrom gespannt. Der daran kondensierte Nebel kann abgeleitet und in Kanistern gesammelt werden. Im Projekt wurden Prototypen entwickelt, die in der Lage sind, in extrem trockenen Gegenden ca. drei Liter Wasser pro Tag und in feuchteren Gebieten bis zu zehn Liter pro Tag zu sammeln. Das Wasser muss nur noch gefiltert werden und steht dann als Trinkwasser zur Verfügung.¹²³

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Das Ressourceneffizienzpotenzial dieser Entwicklung leitet sich in erster Linie von einer Energie- und Materialeinsparung in der Nutzungsphase der technischen Textilien zur Wassergewinnung ab. Auch wenn der Aufwand der Herstellung der Nebelfänger betrachtet werden muss, steht diesem Aufwand der Material- und Energieaufwand zur Herstellung und Nutzung von Bohrern, Pumpen oder Tankwagen zum Bau und Betrieb von Brunnen und Wassertransporteinrichtungen entgegen. Primäres Ziel der bionischen Lösung ist eine Verbesserung der Lebensqualität der Wüstenbewohner durch die Versorgung mit lebensnot-

¹²³ Vgl. ITV (2013), S. 42 ff.

wendigem Trinkwasser. Das Ausschöpfen von Ressourceneffizienzpotenzialen ist diesem Ziel untergeordnet. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese dezentrale Lösung aus den oben genannten Gründen auch einen nennenswerten Beitrag zur Ressourceneffizienz leistet.

3.3.3 Energetische Wirkungsgradsteigerung

3.3.3.1 Strömungsoptimierung - Medium Luft

Ziel einer Strömungsoptimierung im Medium Luft ist die Reduktion von Strömungsverlusten, um den energetischen Wirkungsgrad zu erhöhen und gegebenenfalls Schallemissionen zu senken. Dabei bedient sich die Technik sowohl fliegender Organismen (aerodynamischer Vorbilder) als auch biologischer Vorbilder aus den Gewässern (hydrodynamischer Vorbilder).

Axialventilatoren

Axial-Lüfter werden in der IT-Branche hunderttausendfach verwendet und in den verschiedensten Bauteilen oder Baueinheiten wie in Computern oder Servern zur Kühlung eingesetzt. Durch den permanenten Betrieb ist eine ständige Geräuschemission unvermeidbar, die am Arbeitsplatz oft als unangenehm empfunden wird. Neben einer Steigerung der Effizienz der Lüfterleistung stellt die Geräuschreduzierung ein unternehmerisches Entwicklungsziel während des Betriebs dar. Um dieses Ziel zu erreichen, hat sich die Blacknoise GmbH systematisch mit den größten Lärmquellen beim Lüfterbetrieb beschäftigt und diese durch gezielte Optimierungen abgeschwächt.¹²⁴ Messungen mit speziellen Akustikkameras haben ergeben, dass insbesondere an den Spitzen der rotierenden Flügel Strömungsabriss erzeugt werden, die in Form großer Luftwirbel die Hauptlärmquelle typischer Ventilatoren ergeben.¹²⁵ Die auffälligsten Merkmale der neu entwickelten Ventilatoren sind die in sich geschlossenen Schlaufenrotoren. Bei der Fortbewegung von Pinguinen unter Wasser wurde erkannt, dass in der Natur große Strömungswirbel durch unregelmäßige Körperformen aufgebrochen werden. Daraus resultiert eine Vielzahl kleiner Wirbel, die sich in

¹²⁴ Vgl. Blacknoise (2013).

¹²⁵ Vgl. Eckardt, M. (2012).

der Summe - auch aus energetischer Sicht - als deutlich effektiver im Vergleich zu wenigen großen Wirbeln erweisen.¹²⁶ Es handelt sich um eine Anpassung, die sich beispielsweise auch an den aufgefächerten Flügelspitzen großer Gleitvögel erkennen lässt.

Bionisches Produkt: BionicLoopFan®

Ziel	Geräuschärmere und energieeffiziente Axial-Lüfter
Biologisches Vorbild	Schwimmphase bei Pinguinen, Flügel von Vögeln; Aufspreizung der Schwingen und Form von Langstreckenfliegern
Funktionsprinzip	Aufspreizen der Handschwingen vermindert große Turbulenzen, verhindert Strömungsabrisse
Technische Umsetzung	Schlaufenförmiger Rotor bildet eine theoretisch unendliche Tragfläche ohne Abrisskante
Ressourceneffizienzpotenzial	Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Lärmreduktion
Entwicklungsstadium	Produkt am Markt erhältlich

Durch die Übertragung dieser Prinzipien auf die Flügelform der Ventilatoren und die damit einhergehende Strömungsoptimierung konnte Blacknoise nach eigenen Angaben eine Reduzierung der Lärmemission von 25 bis 35 Prozent im Vergleich zu hochwertigen Lüftern herkömmlicher Bauart bei gleicher Förderleistung erzielen.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Zur angestrebten Lärmreduktion ist eine Verbesserung der Energieeffizienz in der Betriebsphase von bis zu 30 Prozent zu verzeichnen.¹²⁷ Dies wird durch die verbesserten Strömungseigenschaften des Ventilators möglich.

Radialventilatoren

Die Brust- und Schwanzflosse des Buckelwals sind das biologische Vorbild bei der Entwicklung des Radialventilators der Firma Ziehl-Abegg.¹²⁸ Bei Radialventilatoren für Klimazentralgeräte oder für den Industrieinsatz trifft der Luftstrom je nach Winkel des Volumenstroms auch in unterschiedlichen Winkeln auf die Ventilatorschaufel. Eine ungünstige Schaufelgeometrie erzeugt Strömungsabrissse und sorgt für Wirkungsgradeinbußen. Der Wal hat beim Schwimmen im Meer ähnliche Herausforderungen

¹²⁶ Vgl. BIONKON (2015).

¹²⁷ Vgl. Blacknoise (2013).

¹²⁸ Vgl. Ziehl-Abegg (2016).

zu meistern und ändert die Winkelstellung seiner Brustflossen beim Schwimmen ständig, um im Wasser zu manövrieren. Spezielle Ausbuchtungen (Tuberkel) an den Flossen helfen dabei, ein Ablösen der Strömung zu verhindern.¹²⁸ Darüber hinaus wird die Stabilität der Strömung durch die Körperform des Buckelwals, seine Tuberkel und die Form der Fluke (Schwanzflosse) unterstützt.

Bionisches Produkt: ZBluefin

Ziel	Leisere und strömungsoptimierte Radialventilatoren
Biologisches Vorbild	Ausbuchtungen an Brustflossen von Buckelwalen optimieren Druckverteilung und verhindern Strömungsabriss
Funktionsprinzip	Angepasste Winkelstellung der Flossen verhindert Strömungsverluste. Tuberkel (golfballgroße Ausbuchtungen) haben zusätzliche günstige strömungsmechanische Eigenschaften
Technische Umsetzung	Günstiger strömungsoptimierter Winkel und Ausbuchtungen wurden an der Vorderkante der Ventilatorschaukel in Form eines gewellten Profils umgesetzt
Ressourceneffizienzpotenzial	Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Lärmreduktion, Verminderung des Kondens- und Schmutzwassereintrags: geringere Korrosion und Unwucht
Entwicklungsstadium	Produkt am Markt erhältlich

Die Tuberkel haben die Entwickler an der Vorderkante ihrer neuen Ventilatorschaukel nachempfunden und als gewelltes Profil umgesetzt. Die Form der Fluke wiederum wurde als Vorbild für eine v-förmige Kontur des hinteren Ventilatorflügelabschnitts herangezogen¹²⁹. Dies verzögert Strömungsabriss, was den Ventilator für viele unterschiedliche Druckbereiche einsetzbar macht.¹³⁰

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die bionisch optimierte Form der Ventilatorschaukeln mit besseren Strömungseigenschaften führt nach Herstellerangaben zu einer Energieeinsparung von bis zu zehn Prozent in der Nutzungsphase. Es kann angenommen werden, dass die verbesserten Strömungseigenschaften den Ventilator weniger schwankenden Drücken aussetzen, was eine Reduktion des Verschleißes nach sich ziehen kann. In diesem Fall läge ebenfalls eine Materialeinsparung vor, da die Bauteile seltener repariert oder ersetzt werden müssten.

¹²⁹ Vgl. Stocker, F. (2016).

¹³⁰ Vgl. Der Konstrukteur (2016).

Strukturierte Oberflächen zur Lärmreduktion

Bei vielen Eulenarten hat sich ein spezialisiertes Gefieder entwickelt, das das aerodynamische Geräusch ihrer Flügel wirksam eliminiert, so dass sie ihre Beute geräuschlos jagen und fangen können. Eulenflügel besitzen dafür drei verschiedene Gefiedertypen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften. Federn mit Haken an der Flügelvorderseite und Fransen am Ende führen dazu, dass sich winzige Mikroturbulenzen an der Oberfläche der Flügel bilden, die die Haftung des Luftstroms verbessern.¹³¹ Dies führt zu erheblichen Geräuschreduktionen und hat bereits Unternehmen bei der Produktgestaltung inspiriert.^{132, 133} Zusätzlich wird auch durch das Daunengefieder auf der Oberfläche des Flügels eine Geräuschreduktion erreicht.¹³⁴ An einem 3D-Nachdruck des Eulenflügelbaus konnte gezeigt werden, dass das Windgeräusch um zehn Dezibel reduziert werden konnte, ohne die Aerodynamik zu beeinflussen.¹³⁵

Bionisches Produkt: Optimierte Rotorblätter von Windturbinen

Ziel	Lärmreduktion von Windturbinen ohne Einschränkungen der Aerodynamik
Biologisches Vorbild	Daunen an Federn von Eulen
Funktionsprinzip	Strukturen von Daunen mit fast senkrecht stehenden und verzweigten Haaren, die sich in Richtung der Strömung biegen können
Technische Umsetzung	3D-gedruckte faserige Abdeckungen, „Finlets“, werden an die Kanten der Rotorblätter angebracht
Ressourceneffizienzpotenzial	Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Lärmreduktion (minus zehn Dezibel) im Betrieb, höhere Akzeptanz von Windenergieanlagen
Entwicklungsstadium	Forschungsarbeit, Prototyp

Die Forscher geben an, dass die Daunenfedern der Eule auch als Vorbild für Anwendungen beim Flügeldesign von Windenergieanlagen dienen können, um eine Geräuschemissionsreduktion weiter zu optimieren und damit die Akzeptanz von Windenergieanlagen zu erhöhen. Darüber hinaus kann es auch auf andere niederfrequente aerodynamische Situationen

¹³¹ Vgl. Schmidt, F. (2012).

¹³² Vgl. BIONIKON (2014a).

¹³³ Vgl. Schindlbeck, C. (2013).

¹³⁴ Vgl. Clark, I. A.; Daly, C. A.; Devenport, W.; Alexander, W. N.; Peake, N.; Jawooski, J. W. und Glegg, S. (2016), S. 33 – 54.

¹³⁵ Vgl. Phys.org (2016).

angewendet werden, z. B. zur Reduktion von Luftgeräuschen an geöffneten Autotürfenstern.¹³⁶

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Es ist davon auszugehen, dass die angestrebte Geräuschemissionsreduktion mit einer Energieeinsparung einhergeht, da der Strömungswiderstand insgesamt verringert wird. In Veröffentlichungen zum Forschungsprojekt werden aber keine Angaben über Ressourceneffizienzpotenziale getroffen, wodurch keine konkreteren Angaben vorgenommen werden können.

Strömungsoptimierte Rotorblätter

Die Haut der Haie ist mit sogenannten Placoidplättchen ausgestattet, die beweglich in der Oberhaut der Haie verankert sind. Diese Flexibilität und eine rillenförmige Mikrostrukturierung auf den Schuppen, die Ribletstruktur, reduzieren den oberflächennahen Strömungswiderstand. Weiterhin wird verhindert, dass sich Meereslebewesen wie Seepocken oder Algen dauerhaft ansiedeln können und so den Strömungswiderstand erhöhen.

Eine Übertragung dieses Funktionsprinzips auf Schiffsrümpfe sollte dazu führen, dass zum einen die Strömungseigenschaften verbessert werden und ein Fouling (Bewuchs des Schiffsrumpfs) verhindert wird. Ein Anstrich mit Antifouling-Eigenschaften wurde von der Vosschemie GmbH in Kooperation mit der Hochschule Bremen entwickelt.¹³⁷

Wissenschaftliche Untersuchungen widmen sich seit längerem den Effekten der Ribletstrukturen und überprüfen eine Übertragung auch auf andere Anwendungsfelder. In einem Forschungsprojekt soll neben experimentellen Untersuchungen ein Prognosetool zur Berechnung der Effizienzsteigerung bei der Übertragung von Ribletstrukturen auf real gefertigte Bauteile entwickelt werden.¹³⁸ Es wird versucht, die strömungsoptimierenden Ribletstrukturen auf Rotorblätter von Windkraftanlagen, Gasturbinen oder auf andere Bauteile oder Baueinheiten, die umströmt werden, zu übertra-

¹³⁶ Vgl. Schmidt, F. (2012).

¹³⁷ Vgl. Kesel, A. und Liedert, R. (2017).

¹³⁸ Vgl. Jadewelt (2016).

gen. Beispiele dafür sind Oberflächen von Zügen oder Flugzeugen. Schwierigkeiten bereitet dabei allerdings das Turbulenzverhalten durch die verschiedene Skalierung von Oberflächenstrukturen und Umgebungsbedingungen.

Bionisches Produkt: Künstliche Haihaut

Ziel	Strömungsoptimierte Oberflächen der Rotorblätter von Windenergieanlagen
Biologisches Vorbild	Ribletstruktur auf Placoidschuppen der Haut schnellschwimmender Fische (z. B. Haie)
Funktionsprinzip	Feine Rillen in den Schuppen (Ribletstruktur) vermindern den Strömungswiderstand durch Reduktion von Turbulenzen
Technische Umsetzung	Abstrahierte Rillen werden mittels Hochrate-Laserstrukturierungstechnologien in die Oberfläche von Materialien gebracht
Ressourceneffizienzpotenzial	Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Entwicklung eines Prognosetools für Berechnungen
Entwicklungsstadium	Forschungsprojekt, industrielle Anwendung ab 2018 geplant

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die neuen Untersuchungen zur Übertragung der Ribletstrukturen auf umströmte Bauteile oder Baueinheiten lassen vermuten, dass in der Nutzungsphase Energie eingespart werden kann. Bei der Betrachtung der Ressourceneffizienz des bei der Vosschemie GmbH erhältlichen Schiffslacks lassen sich Potenziale in verschiedenen Phasen des Produktlebenswegs erkennen: So ist am Rumpf großer, mit Haihaut beschichteter Containerschiffe ein bis zu 70 Prozent geringerer Bewuchs mit Algen, Seepocken und anderen Meeresorganismen zu verzeichnen. Bereits ein geringer Bewuchs von wenigen Millimetern erhöht den Treibstoffverbrauch um mehr als 25 Prozent.¹³⁹ Wird von einem Treibstoffbedarf von ca. 180 Tonnen pro Tag für ein mittelgroßes Containerschiff, z. B. der Panamax-Klasse, ausgegangen, ergeben sich durch das Fouling ein zusätzlicher Bedarf von wenigstens 15.000 Tonnen und Mehrkosten von rund fünf Millionen Euro pro Jahr.¹⁴⁰ Zudem verursacht ein Bewuchs pro Schiff einen zusätzlichen Ausstoß von etwa vier Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr und ca. 150.000 Tonnen Stick- und Schwefeloxiden.¹⁴¹ Darüber hinaus ersetzt die ungiftige Haihaut einen toxischen Anstrich aus Tributylzinnhydrid (TBT). Dieser muss weder material- und energieauf-

¹³⁹ Vgl. Brady, R. F. und Singer, I. L. (2000).

¹⁴⁰ Vgl. Hellio, C.; Marechal, J.-P.; Véron, B.; Bremer, G.; Clare, A. S. und Le Gal, Y. (2004).

¹⁴¹ Vgl. THB (2009).

wendig hergestellt noch entsorgt/verwertet werden. Neben einer Energie- und Materialeinsparung in der Produktherstellung werden die Ressource Wasser und die Meeresbiodiversität als Teil der Ökosystemleistung sowie das Klima durch einen geringeren CO₂- und Schadstoff-Ausstoß geschont.¹⁴²

Kleinwindkraftanlage

Mit dem DualWingGenerator hat die Festo GmbH & Co. KG im Rahmen des Bionic Learning Network eine kleine Energiegewinnungseinheit für geringe Windgeschwindigkeiten entwickelt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Kleinwindkraftanlagen nutzt das System zwei gegenläufig schwingende Flügelpaare anstelle von Rotorblättern zur Energiegewinnung.¹⁴³

Bionisches Produkt: DualWingGenerator

Ziel	Windenergieanlage für geringe Windgeschwindigkeiten
Biologisches Vorbild	Flügel Schlag von Vögeln
Funktionsprinzip	Gekoppelte Schlag-Dreh-Bewegung mit großer Hubamplitude und kleiner Drehung erzeugt Schub
Technische Umsetzung	Umkehrung des Prinzips: kleine Hubbewegung und große Drehamplitude; technische Flügel werden vom Wind bewegt und treiben einen Generator an
Ressourceneffizienzpotenzial	Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Ausnutzung auch geringer Windgeschwindigkeiten, selbstständige Anpassung an schwankende Windgeschwindigkeiten
Entwicklungsstadium	Prototyp und erfolgreiche Machbarkeitsstudie

Das Prinzip der Anlage besteht in der Umkehrung des natürlichen Schlagflugprinzips: Vögel erzeugen mit ihrem Flügelschlag die nötige Leistung, um sich in der Luft fortzubewegen. Ein stationäres System wie der DualWingGenerator kann dagegen die kinetische Energie aus dem Luftstrom entnehmen. Dabei besteht die Anlage aus zwei gegenläufig schwingenden Flügelpaaren, die an einer Mittelsäule angebracht sind. Im Windstrom bewegen sich die Tragflächen auf und ab. Zwischen den Tragflächen entstehen dadurch extreme Geschwindigkeiten. Die lineare Hubbewegung der Flügel wird in eine Drehbewegung umgesetzt. Ein integrierter Elektrogenerator wandelt die gewonnene Energie in Strom um. Der DualWingGenerator

¹⁴² Vgl. Neubert, H.-J. (2010).

¹⁴³ Vgl. Festo (2017c).

ist selbstoptimierend und kann sich an unterschiedliche Windverhältnisse anpassen.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Im Praxistest hat sich gezeigt, dass die Anlage bei geringen Windgeschwindigkeiten im Bereich zwischen vier und acht m/s einen hohen Wirkungsgrad aufweist.¹⁴⁴ Dies bedeutet, dass die Energieausbeute insbesondere bei geringeren Windgeschwindigkeiten deutlich besser ist und damit der DualWingGenerator einen Beitrag zur Energieeffizienz leistet.

3.3.3.2 Optimierte Energieübertragung und -speicherung

Fluidbasierte Wärmeübertragung

Bei Wärmeübertragungsprozessen ist es in der Regel wichtig, dass ein gleichmäßiger Wärmeübertrag über die gesamte Fläche erfolgt. Dazu werden bislang in großem Umfang serielle oder parallele Kanalsysteme aus gut leitenden Metallen eingesetzt. Ziel ist es, den Wärmeübertrag zu optimieren, d. h. eine gleichmäßige Durchströmung mit geringem Druckverlust zu gewährleisten. In der Natur wird dies beispielsweise bei den Leitbündeln von Blättern, bei Blutgefäßen oder auch in den Verzweigungen der Lungen erreicht. Mit Hilfe dieser biologischen Vorbilder wurde am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) ein Algorithmus entwickelt, mit dem sich die verzweigten Fraktale darstellen und technisch umsetzen lassen (FracTherm®). Dieser Algorithmus wird bereits für die Anwendung in Kollektoren und anderen Wärmetauschern eingesetzt.¹⁴⁵ Vorteile dieser Fraktale sind, dass die Pumpleistung ohne Durchströmungsverluste verringert und der Wirkungsgrad der Wärmeübertragung durch sehr eng aneinanderliegende Kanäle erhöht werden kann.

Eine besondere Herausforderung stellt die Kühlung von Formwerkzeugen im Automobilbau dar. Dabei handelt es sich in der Regel um dreidimensionale Bauteile, die gleichmäßig gekühlt werden müssen, bevor sie weiterverarbeitet werden können. Hier könnte die Konstruktion eines Kühlwerk-

¹⁴⁴ Vgl. Pluta, W. (2014).

¹⁴⁵ Vgl. Fraunhofer ISE (2017a).

zeugs auf Basis eines dreidimensionalen FracTherm®-Algorithmus zielführend sein. Gemeinsam mit dem Fraunhofer ISE hat die Grunewald GmbH & Co. KG in einer Machbarkeitsstudie untersucht, wie sich der 2D-FracTherm®-Algorithmus auf 3D übertragen lässt.¹⁴⁶

Bionisches Produkt: FracTherm® 3D

Ziel	Effiziente und bedarfsgerechte Kühlung von Formwerkzeugen, gleichmäßige Durchströmung, geringerer Druckverlust
Biologisches Vorbild	Aufbau Blutgefäßsystem, Leitbündel von Blättern
Funktionsprinzip	Verzweigung der Blutgefäße und Leitbündel zu immer feineren Kapillaren; Durchströmung und Druck bleiben nahezu gleich
Technische Umsetzung	Geometrischer Algorithmus zur Erstellung fraktaler Strukturen; Anpassung an dreidimensionale Strukturen
Ressourceneffizienzpotenzial	Energieeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Reduzierung der Taktzeit bei der Bauteilfertigung durch besseren Wärmeaustausch
Entwicklungsstadium	Demonstrator, Prototyp, Marktreife wird erwartet

Derzeit ergeben sich allerdings noch Schwierigkeiten bei der genauen mathematischen Beschreibung des Algorithmus für den Übergang des planen Strömungsverlaufs in die dritte Dimension. Auch die kommerzielle Herstellung eines 3D-FracTherm®-Werkzeugs stellt die Grunewald GmbH noch vor größere Herausforderungen.¹⁴⁷

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die Kühlung mit einem 3D-FracTherm®-Kühlwerkzeug führt dazu, dass kürzere Taktzeiten erzielt werden können. So kann die Abkühldauer durch eine bessere Temperaturausleitung von 88 auf 39 Sekunden gesenkt werden. Dies erhöht die Effizienz des Kühlwerkzeugs pro gekühltem Bauteil. Eine Reduktion des Energieverbrauchs lässt sich damit durch die geringere Prozessdauer darstellen, da die übrigen Parameter wie Bauteil-Ausgangstemperatur, Bauteil-Zieltemperatur, Bauteil-Geometrie oder Kühlwasser-Temperatur gleich bleiben. Weiterhin ist die Pumpleistung, die zur Durchströmung erforderlich ist, durch die druckoptimierte, fraktale Anordnung der Kanäle deutlich geringer. Der Wirkungsgrad der Kühlleistung und damit die Effizienz des Kühlwerkzeugs könnten zusätzlich gesteigert werden, indem die bislang verwendeten Edelstahl-Rohre durch Aluminiumrohre ersetzt werden.¹⁴⁸ Ob

¹⁴⁶ Vgl. Fraunhofer ISE (2017b).

¹⁴⁷ Vgl. Beismann, H.; Ossendoth, U.; Hermann, M. und Grunewald U. (2015), S. 12 ff.

¹⁴⁸ Vgl. Beismann, H.; Ossendoth, U.; Hermann, M. und Grunewald U. (2015), S. 43 ff.

diese Materialumstellung tatsächlich zu einer Ressourceneffizienzsteigerung im Lebensweg des Kühlwerkzeugs führt, muss im Einzelfall geprüft werden. Gegebenenfalls wird die Energieeffizienzsteigerung in der Nutzungsphase durch mögliche Ineffizienzen in der Produktherstellungs- oder Verwertungsphase kompensiert.

Oberflächen für Solarzellen

Die Suche nach einer Lösung zur Steigerung des Wirkungsgrads von Solarzellen führte Forscher vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu den höheren Pflanzen. Photovoltaik ähnelt im Prinzip der von Pflanzen betriebenen Photosynthese: Lichtenergie wird absorbiert und in eine andere Form von Energie umgewandelt. Dabei hängt die Effizienz entscheidend davon ab, wie gut das Lichtspektrum des Sonnenlichts ausgenutzt werden kann und ob eine hohe Absorptionsleistung auch bei verschiedenen Einfallswinkeln des auftreffenden Lichts erreicht wird. Bei der Photovoltaik ist das Lichtspektrum des Sonnenlichts, das ausgenutzt werden kann, materialabhängig und damit begrenzt.

Bionisches Produkt: Wirkungsgradsteigerung bei Solarzellen

Ziel	Effizienzsteigerung der Lichtausbeute bei der Photovoltaik
Biologisches Vorbild	Nanostrukturierte Epidermis von Blütenblättern höherer Pflanzen (hier Rosenblütenblätter)
Funktionsprinzip	Hohe omnidirektionale Lichtabsorption und Antireflexion durch Oberflächenstrukturierung
Technische Umsetzung	Nachbildung der Oberflächenstruktur und Übertragung auf einen transparenten Kleber, Integration in eine organische Solarzelle
Ressourceneffizienzpotenzial	Erhöhung der Energieumwandlungseffizienz, Material- und Energieeffizienz in der Nutzungsphase
Entwicklungsstadium	Entwicklungsstadium

Wissenschaftler untersuchten das äußere Abschlussgewebe verschiedener Pflanzen auf ihre optischen Eigenschaften und vor allem auf ihre Antireflexwirkung. Es zeigte sich, dass die Epidermis der Blütenblätter der Rose besondere Antireflexwirkungen mit einem breiten Absorptionsspektrum und hoher Einfallswinkeltoleranz aufweist. Diese Eigenschaften sind dafür verantwortlich, dass die Blütenblätter trotz unterschiedlicher Lichtverhältnisse starke Farbkontraste ausbilden und damit die Chance auf Bestäubung erhöhen. Auf der Epidermis wurde ein ungeordnetes Feld dicht gedrängter Mikrostrukturen und anscheinend zufällig platzierter Nanostrukturen entdeckt. Diese Oberflächenstrukturen wurden in einen transparenten

Kleber umgesetzt, der nach der Aushärtung durch UV-Licht in eine organische Solarzelle integriert wurde.^{149, 150}

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Durch die Integration der Oberflächenstrukturen erhöhte sich der Wirkungsgrad bei senkrechtem Lichteinfall um 12 Prozent (relative Steigerung). Bei sehr flachen Einfallswinkeln fiel die Effizienzsteigerung noch höher aus. Die Forscher führen die Steigerung vor allem auf die hervorragende richtungsunabhängige Antireflexwirkung der nachgebildeten Epidermis zurück. Aus den Ergebnissen kann eine Rohstoffeinsparung in der Nutzungsphase abgeleitet werden, da mit weniger Solarzellen ein vergleichbarer Energieertrag erzielt werden kann. Weiterhin leistet die Wirkungsgradsteigerung einen Beitrag zur effizienten Energieerzeugung.

3.3.4 Robotik und Signalübertragung

Robotik

Die Robotik ist ein weites Feld, das viele Anwendungen, z. B. für die Automationstechnik, Industrieroboter, verschiedene Assistenzroboter und Drohnen, umfasst. In der Regel werden einzelne oder mehrere Komponenten eines Roboters bionisch optimiert bzw. hergestellt, wobei ein Robotersystem meist nicht vollständig bionisch konzipiert wird. Die Richtlinie VDI 6222 Blatt 1 beschäftigt sich mit der Frage, wann von einem bionischen Roboter gesprochen werden kann, und gibt eine Vielzahl an Beispielen für bionische Anwendungen in der Robotik.¹⁵¹ Stellvertretend wird an dieser Stelle ein Beispiel aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion erläutert.

Industrieroboter sind steif, unnachgiebig und können nicht ohne Gefahr für den Menschen im selben Raum operieren, weshalb sie durch sichere Abtrennungen vom Arbeitsumfeld der Menschen separiert werden. Im Zeitalter von Industrie 4.0 und der zunehmenden Digitalisierung wird es immer

¹⁴⁹ Vgl. Karlsruher Institut für Technologie (2016).

¹⁵⁰ Vgl. BIONIKON (2016).

¹⁵¹ Vgl. VDI 6222 Blatt 1:2013-11, S. 3 und S. 24.

interessanter, Roboter zu haben, die direkt mit dem Menschen interagieren und gefahrlos zusammenarbeiten können. Dazu werden weiche, nachgiebige Systeme geschaffen, die Wahrnehmung und Kommunikation vereinen. Hier kann Bionik helfen, dass sich die Technik der Roboter an den Menschen anpasst und so intuitiv, ergonomisch und sicher wird. In einem vom BMBF geförderten Projekt wurde mit den zwei unterschiedlichen Ansätzen des BROMMI:TAK ein rüsselähnlicher Roboterarm entwickelt, der die genannten Anforderungen erfüllt.¹⁵² Dabei steht BROMMI für „Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboter-Anwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion“ und TAK für „Tripedale Alternanzkaskade“. Neben dem humanoiden Muskelroboter ZAR5 und dem kooperierenden Roboter mit Mensch-Maschine-Schnittstelle KobotAERGO wird der Roboterarm BROMMI:TAK aktuell von der interdisziplinären Nachwuchsforschergruppe MTI-engAge weiterentwickelt.¹⁵³

Bionisches Produkt: BROMMI:TAK

Ziel	Hochflexible und sichere Bewegung eines Roboterarms unter Einsatz von Leichtbau, Risikominimierung bei Interaktionen
Biologisches Vorbild	Muskulärer Aufbau des Elefantenrüssels
Funktionsprinzip	Muskeln ohne Knochen ermöglichen kontinuierliche Krümmung und hohe Beweglichkeit bei gleichzeitiger Nachgiebigkeit
Technische Umsetzung	Mehrere zusammengesetzte und ineinandergeschobene Einzelmodule; pneumatische Muskeln, zentrale Steuerung und dezentrale Antriebsregler
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung
Zusätzliche Vorteile	Sichere Mensch-Maschine-Interaktion möglich
Entwicklungsstadium	Prototyp, Weiterentwicklung im Projekt MTI-engAge

Biologisches Vorbild dieser Roboterkinematik ist der Elefantenrüssel, der aus ca. 40.000 einzelnen Muskeln besteht, die ihm eine große Beweglichkeit, Geschicklichkeit und gleichzeitig Nachgiebigkeit verleihen. Der Roboterarm ist aus bionischen Muskeln aufgebaut, die ihn dazu befähigen, sich durch Schub, Zug und Beugung in alle Richtungen zu bewegen. Die Steuerung erfolgt über dezentrale Antriebsregler mit einem echtzeitfähigen Embedded-Rechner und einer integrierten Bildverarbeitung.¹⁵⁴

¹⁵² Vgl. Elkmann, N. (2017).

¹⁵³ Vgl. MTI-engAge (2016).

¹⁵⁴ Vgl. Elkmann, N. (2017).

Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels können nachgiebige Roboter zur Unterstützung in der industriellen Produktion eingesetzt werden, aber auch im häuslichen Pflege- oder Life-Science-Bereich.

Ein weiterer nachgiebiger Roboterarm ist der bionische Handling-Assistent, mit dem Festo und das Fraunhofer IPA im Jahr 2010 den Deutschen Zukunftspreis gewonnen haben.¹⁵⁵ Auch hier ist das biologische Vorbild der Elefantenrüssel. Die einzelnen Segmente werden bei diesem Roboterarm allerdings im 3D-Druck aus Kunststoff hergestellt, über Aktoren miteinander verbunden und mit Druckluft gesteuert.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Bezogen auf die Ressourceneffizienz ist festzuhalten, dass nachgiebige kollaborative Roboter trotz ihres Leichtbaus große Lasten bewegen können und somit Materialeinsparungen in der Herstellungsphase und Energieeinsparungen in der Nutzungsphase aufweisen. Als zusätzliche Vorteile ergeben sich Raumeinsparungen in der Produktionsstätte, da diese Roboter nicht mehr vom Arbeitsumfeld des Menschen getrennt werden müssen.¹⁵⁶

Kabellose Datenübertragung unter Wasser

Meeressäuger wie Delfine und Wale nutzen Schallwellen zur Kommunikation und Positionsbestimmung. Schall breitet sich unter Wasser deutlich schneller aus als in der Luft. Delfine können so über große Distanzen kommunizieren und setzen bei der Jagd Echoortung mit Ultraschalltönen ein. Sie stoßen schnelle, klickende Geräusche aus, die von der Schädeldecke reflektiert und fokussiert werden. Nahezu alle Delfine senden hochfrequente Töne zwischen 30 und 150 Kilohertz aus, die in der Regel mit einigen Mikrosekunden sehr kurz sind. Das Echo wird von dem hinteren Teil des Unterkiefers aufgefangen, der den Schall auf Mittel- und Innenohr überträgt. Aufgrund der extrem schnellen Nervenleitung vergehen hierfür lediglich sieben bis zehn Mikrosekunden.

¹⁵⁵ Vgl. Deutscher Zukunftspreis (2010).

¹⁵⁶ Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011a).

Dieses biologische Vorbild der Schallübertragung wurde bei der Entwicklung eines Unterwassermodems zur kabellosen Datenübertragung technisch umgesetzt. Die zu sendenden Informationen werden nicht nur von einem Trägersignal durch Phasen- oder Frequenzmodulationen übertragen, sondern die Frequenz des Signals wird ständig variiert und der Umgebung angepasst. Das patentierte Verfahren (Sweep-Spread Carrier, S2C) ermöglicht die schnelle und sichere telemetrische Übertragung unterschiedlicher digitaler Daten.¹⁵⁷

Bionisches Produkt: Unterwassermodem S2C-Serie

Ziel	Kabellose Datenübertragung unter Wasser
Biologisches Vorbild	Akustische Kommunikation der Delfine über weite Strecken
Funktionsprinzip	Ständig sich verändernde Laute, um zu verhindern, dass sich Signal und Echo überlagern; Echolot
Technische Umsetzung	Übertragungsverfahren, das typische Störungen wie Rauschen und Signalüberlagerung umgeht (hall- und dopplerresistent)
Ressourceneffizienzpotenzial	Materialeinsparung in der Produktherstellung, Materialeinsparung in der Nutzungsphase
Zusätzliche Vorteile	Zeitersparnis, schnellere Datenübertragung unter Wasser, stabilere Kommunikation
Entwicklungsstadium	Produkt am Markt erhältlich

Diese Unterwassermodems werden in Messsonden, Unterwasser-Robotern, in der Umweltüberwachung und der Off-Shore-Industrie eingesetzt. Sie sind gegenüber Störungen und Rauschen unempfindlich und können zu Unterwasser-Datennetzwerken aufgebaut werden. Beispielsweise sorgen im deutschen Tsunami-Frühwarnsystem, das im Indischen Ozean erprobt wurde, Spezialmodems für die Datenverbindung zwischen Bodenstation (bis 6.000 Meter Tiefe) und Satellitenboje an der Oberfläche.¹⁵⁸

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Es ergeben sich Materialeinsparungen in der Produktherstellung pro Modem, da die bionischen Modems kleiner als herkömmliche sind. Zudem sind sie nicht kabelgebunden, so dass auf die Herstellung und Verlegung von Kabeln unter Wasser vollständig verzichtet werden kann. Eine weitere Materialeinsparung in der Nutzungsphase ergibt sich daraus, dass aufgrund der hohen Sendereichweiten weniger Modems pro Flächeneinheit notwendig sind, so dass ihre Anzahl reduziert werden kann.

¹⁵⁷ Vgl. EvoLogics (2017).

¹⁵⁸ Vgl. SpiegelOnline (2015).

3.4 Von der Natur inspiriert – aber keine Bionik

Der Blick in die Natur hat Menschen schon immer inspiriert, Neues zu erschaffen. Das gilt für industrielle Anwendungen genauso wie in der Architektur, dem Design oder der Kunst. Wie bereits zu Beginn erläutert, ist nicht alles bionisch, was von der Natur inspiriert wurde. Streng nach den Kriterien für Bionik betrachtet, können Entwicklungen, die auf den ersten Blick bionisch wirken, häufig nicht als solche bewertet werden (Kapitel 2.1). Zwar sind beispielsweise viele Elemente aus dem Jugendstil von biologischen Vorbildern inspiriert, es fanden aber keine Abstraktion eines Funktionsprinzips und keine technische Umsetzung statt.¹⁵⁹ Nicht immer ist erkennbar, ob eine Entwicklung auch wirklich bionisch ist. Ein Beispiel dafür stellen die tragenden Säulen in Terminal 3 des Stuttgarter Flughafens dar. Sie muten an wie Bäume und sind offensichtlich auch vom Aufbau der Bäume inspiriert. Ob hier allerdings ebenfalls eine Abstraktion und technische Übertragung stattgefunden haben, lässt sich ohne genaue Angaben des Planers und Architekten nicht festlegen. So haben etwa Bäume nicht die Funktion, Lasten zu tragen, die auf ihre Astspitzen wirken, was jedoch im Fall der Säulenkonstruktion im Stuttgarter Flughafen der Fall ist. Nach dieser Betrachtung handelt es sich um biologisch inspirierte Analogien, aber nicht um Bionik.

Unabhängig davon, ob es um eine bionische Entwicklung geht oder nicht: Biologisch inspirierte Entwicklungen haben eine wesentliche Bedeutung für Innovationen und Ressourceneffizienz. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle einige aktuelle Beispiele genannt, die von der Natur inspiriert sind und erhebliche Potenziale für Ressourceneffizienz bzw. einen hohen Innovationsgrad aufweisen. Teilweise werben sie auch damit, bionische Entwicklungen zu sein, erfüllen aber die standardisierten Kriterien nicht oder nur teilweise.

¹⁵⁹ Vgl. VDI 6220 Blatt 1:2012-12, S. 18.

FRIMO Street Shark

Der Street Shark ist ein Automobil, das mit einer funktionalen Oberfläche auf der Motorhaube und dem Dach versehen wurde.¹⁶⁰ Ziel war es, den Strömungswiderstand des Fahrzeugs zu reduzieren. Inspiriert wurde diese Oberfläche von der Haihaut. In Kooperation mit der Firma Eschmann Textures wurde ein Werkzeug hergestellt, dessen Oberflächen-Geometrie direkt von der Haut eines echten Haifischs genommen wurde.¹⁶¹ Diese Blaupause wurde als Modell für die Oberflächenstruktur verwendet. Mit Hilfe dieses Modells kann die künstliche Haihaut mit Lack und PU-Harz auf Bauteile aufgebracht werden. Die Anwendung ist nicht auf den Automobilbau beschränkt, sondern kann auch auf Oberflächen von Zügen, Flugzeugen oder Schiffen aufgebracht werden. Dieses Projekt wurde 2014 mit dem JEC Innovation Award in Atlanta für seine innovative Technik ausgezeichnet.¹⁶²

Nach den Kriterien für Bionik handelt es sich nicht um ein bionisches Produkt. Zwar gibt es mit der Haihaut ein biologisches Vorbild, allerdings wurde das Funktionsprinzip der Oberflächeneigenschaften nicht analysiert, sondern eine direkte Kopie angefertigt. Der Abdruck wurde allerdings technisch umgesetzt. Insofern sind zwei der drei Kriterien für Bionik erfüllt.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Die Hersteller geben an, dass durch die innovative Oberfläche der Strömungswiderstand des Fahrzeugs reduziert werden konnte. Dies soll für eine Einsparung von Treibstoffen in der Nutzungsphase sorgen. Das Herstellungsverfahren verläuft nahezu isotherm und weist vergleichsweise geringe maximale Prozesstemperaturen von weniger als 100 °C auf, so dass es sehr energieeffizient ist. Die Applikation der Oberfläche auf ein Bauteil ist relativ einfach und durch die Verwendung spezieller Lacke und Harze langlebig. Daraus kann gegebenenfalls eine Materialeinsparung entstehen, da die behandelte Oberfläche seltener repariert oder ersetzt werden muss.

¹⁶⁰ Vgl. FRIMO (2017).

¹⁶¹ Vgl. Eschmann Textures (2017).

¹⁶² Vgl. K-Zeitung online (2014).

Dreh-Wendetisch AXXO

Die Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH hat einen innovativen Dreh- und Wendetisch für die Handhabung rotationssymmetrischer Lasten wie Blech- oder Drahtcoils entwickelt. Der Auflagetisch kann in der Vertikalen rotieren. Wenn sich dieser um 180 Grad dreht, dreht sich die Last um 90 Grad und wird dabei gekippt. Zum Wenden und Aufstellen für den Gebrauch bzw. zum Ablegen für den Transport wird nur ein Werkzeug benötigt.¹⁶³ Der AXXO gewann auf der Blechexpo 2015 in der Kategorie Handhabungstechnik/Robotik den User-Award.¹⁶⁴

Als Vorbild für diese Entwicklung wird die menschliche Hand angegeben, die sowohl in der Lage ist, sich in Richtung Elle und über den Handrücken zu strecken, als auch sich seitlich zu verdrehen.¹⁶⁵ Wie beim vorherigen Beispiel liegt hier streng genommen keine bionische Entwicklung vor. Es ist anzunehmen, dass sich die Konstrukteure tatsächlich von der Beweglichkeit der Hand inspirieren ließen. Allerdings fand keine Abstraktion des komplexen Zusammenspiels von Handwurzelknochen, Speiche, Elle und den beteiligten Sehnen und Muskeln statt. Auch ein biologisches Funktionsprinzip wurde anscheinend nicht technisch umgesetzt, da sich der AXXO auf Rollen und Lagern bewegt. Hier ist lediglich das erste Kriterium „biologisches Vorbild“ für bionische Produkte erfüllt. Das Vorliegen einer herausragenden biologisch inspirierten Entwicklung wird aber nicht in Frage gestellt.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Im Vergleich zur herkömmlichen Handhabung von Blech- oder Drahtcoils ist mit dem AXXO nur noch ein einziges Werkzeug bzw. ein Lastenträger erforderlich. Damit reduziert sich der Materialaufwand auf ein einziges Werkzeug, was als zusätzlichen Vorteil Fläche in den Lagerhallen einspart. Zudem ist dieser Tisch energieeffizienter in der Nutzungsphase, da die Drehbewegung lediglich eine geringe Motorleistung, einen 400-Volt-Anschluss und damit weniger Energie zur Bewegung benötigt.

¹⁶³ Vgl. Pfeifer (2017).

¹⁶⁴ Vgl. MaschinenMarkt (2017).

¹⁶⁵ Vgl. Finus, F. (2016), S. 14 – 18.

Octobot

Elastische Roboter stehen schon seit einigen Jahren im Fokus der Robotik-Forschung. Sie können ohne das Risiko von Verletzungen als kollaborative Roboter mit Menschen zusammenarbeiten. Der Octobot ist der Versuch, einen elastischen, autonomen Roboter ohne den Einsatz metallischer Bauteile zu schaffen, der sich unabhängig von einer externen elektrischen Energiequelle bewegen kann. Wissenschaftler der Harvard University in Cambridge haben einen kleinen 3D-gedruckten, achtarmigen Roboter aus Silikon entwickelt, der als Treibstoff Wasserstoffperoxid in einem katalytischen Vorgang nutzt. Die Steuerungseinheiten wurden beim 3D-Druck in das Silikon eingebracht. Der Octobot kann die Arme selbstständig und autonom ca. acht Minuten lang bewegen.¹⁶⁶

Die Wissenschaftler haben sich, ohne selbst von einem bionischen Ansatz zu sprechen, von Weichtieren und Kopffüßern inspirieren lassen, die in der Lage sind, sich auch ohne ein Endo- oder Exoskelett nur mit Muskeln fortzubewegen. Ziel war eindeutig die Entwicklung autonomer elastischer Roboter.

Dieses zukunftsweisende Forschungsprojekt kann ebenfalls nicht als bionische Invention gewertet werden. Die Kopffüßer dienen ausschließlich als biologisches Vorbild, da sie in der Lage sind, sich ohne Skelett fortzubewegen. Es fand weder eine Abstraktion der Mechanismen der muskulären Fortbewegung statt noch eine Übertragung dieser Prinzipien in die Technik.

Beitrag zur Ressourceneffizienz: Gelänge die Herstellung eines autarken Roboters, der sich beispielsweise chemische Verfahren (gewonnen aus nachwachsenden Rohstoffen) als Energiequelle zu Nutze machen könnte, wäre dieser Roboter in der Nutzungsphase energieeffizienter als vergleichbare Modelle. Eine Materialeffizienz in der Herstellungsphase kann angenommen werden, wenn auf Metalle verzichtet wird und zudem durch Funktionsintegration weniger Materialien verwendet werden. Diese For-

¹⁶⁶ Pöppe, C. (2017), S. 22 – 24.

schungsarbeit ist noch relativ weit von der Markteinführung entfernt, lässt allerdings nennenswerte Ressourceneffizienzpotenziale erkennen.

Diese drei Beispiele verdeutlichen, dass der Blick in die Natur Inspirationen bereithält, die dem Fortschritt, dem Schutz und Erhalt der Umwelt und mit ihnen der Ressourceneffizienz dienen können. Dies gilt unabhängig davon, ob es sich um biologisch inspirierte Konzepte oder bionische Entwicklungen handelt.

4 BIONIK ALS CHANCE FÜR UNTERNEHMEN

Bionische Methoden und Herangehensweisen eröffnen nicht nur großen Unternehmen – wie Festo oder Airbus, die sich auch öffentlichkeitswirksam mit der Bionik beschäftigen –, sondern ebenso kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) die Chance für zukunftsweisende Innovationen und Ressourceneinsparungen. Die Bionik kann Unternehmen in den Bereichen Produkte, Prozesse und Dienstleistungen dabei unterstützen, Wettbewerbsvorteile zu generieren. Dabei ist die Bionik als eine zusätzliche Herangehensweise anzusehen, die es ermöglicht, den Lösungsraum für technische Fragestellungen zu erweitern (Kapitel 2.4). Es sollen damit keinesfalls etablierte und effiziente Verfahren sowie Konstruktionsprozesse ersetzt werden. Aufgrund der weiter zunehmenden Komplexität von Produkten und technischen Lösungen bedarf es neuer Denk- und Herangehensweisen. Auch normative Vorgaben und Neuerungen, die sauberere und umweltschonendere Technologien fordern, eröffnen Chancen für ressourceneffiziente und nachhaltige bionische Innovationen. Insbesondere die Umsetzung der Ökodesign-Richtlinie der EU stellt hier eine Möglichkeit dar. Ziel der Richtlinie ist die umweltfreundliche Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte unter Einbeziehung des gesamten Lebensweges. Die hierzu bestehenden Vorgaben sollen die Ökodesign-Anforderungen verbessern.¹⁶⁷ Hinzu kommt, dass bestehende Grenzwerte der Ökodesign-Richtlinie bis 2019 weiter verschärft werden sollen. Gerade der bionische Ansatz kann hier aufgrund des Bezugs zur Umwelt und Natur – und damit des Potenzials für ökologischere Produkte – für Unternehmen neue Wege eröffnen, diese Vorgaben besser zu erfüllen.

Daher sind die Gründe für Unternehmen, Bionik zu nutzen und daraus Wettbewerbsvorteile zu generieren, vielfältig:

- Bionik ermöglicht den effizienteren Einsatz von Ressourcen sowie die umweltfreundliche Gestaltung von Produkten und kann helfen, Kosten einzusparen.

¹⁶⁷ Vgl. Umweltbundesamt (2016).

- Da bionisches Arbeiten in der Regel Interdisziplinarität erfordert, eröffnen sich neue Wege, durch Kooperationen über die herkömmlichen technischen Grenzen hinwegzugehen und Innovationen hervorzubringen.
- Das biologische Vorbild bietet Optionen zur Entwicklung potenziell nachhaltiger Prozesse oder Produkte, da sie als evolutionär erprobt, ökologisch eingepasst und risikoarm gilt.¹⁶⁸
- Bionische Entwicklungen haben einen hohen Marketingwert. Aufgrund des Naturbezugs ist Bionik im Allgemeinen positiv besetzt und auch das so genannte bionische Versprechen lässt einen Zusammenhang zur Nachhaltigkeit erkennen.¹⁶⁹ Bei der Vermarktung kann der Herstellungsprozess eines Produkts anhand der Funktionalität und über das biologische Vorbild interessant und nachvollziehbar dargestellt werden.

Viele Unternehmen sind es nicht gewohnt, mit Bionikern bzw. Naturwissenschaftlern interdisziplinär zusammenzuarbeiten. Auch wenn sich die Vorteile erschließen, fehlt oft die Vorstellungskraft, wie genau die Bionik im eigenen Unternehmen und für die eigenen Produkte von Nutzen sein kann.¹⁷⁰

Methodische und fachliche Unterstützung bei der Produktentwicklung

Unternehmen, die sich einen Zugang zur bionischen Herangehensweise erschließen möchten, haben viele Möglichkeiten, sich einen ersten Überblick zu verschaffen. Unter anderem geben Standards wie VDI-Richtlinien oder DIN/ISO-Normen gute Hilfestellungen. Standards werden in der Regel für erprobte und bewährte Verfahren in der Produkt- und Prozessentwicklung erstellt. Es ist aber auch möglich, bereits dann technische Regeln festzuschreiben, wenn Anwendungen forschungsnah und in der Produktentwicklung noch nicht etabliert sind, um Innovationen im Sinne eines

¹⁶⁸ Vgl. Speck, T.; Speck, O.; Neinhuis, C. und Bargel, H. (2012), S. 128 – 129.

¹⁶⁹ Vgl. von Gleich, A. (2006), S. 19.

¹⁷⁰ Vgl. Banthin, H. (2014), S. 40 – 41.

Technologietransfers in einem neuen Technologiebereich zu beschleunigen. Der VDI hat 2007 begonnen, in einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt vornormative Richtlinien zur Bionik zu entwickeln.¹⁷¹ Mittlerweile sind neun VDI-Richtlinien zur Bionik erschienen (Tabelle 4). Sie geben sowohl Hinweise zu dem Prozess des bionischen Arbeitens und der Abgrenzung von bionischen zu konventionellen Produkten als auch Verfahrensbeschreibungen zu bionischen Bereichen wie funktionalen bionischen Oberflächen, bionischen Robotern oder bionischer Informationsverarbeitung.

Aufgrund der hohen internationalen Bedeutung der Bionik wurden bereits verschiedene ISO Normen zur Bionik festgeschrieben, die auf der Vorarbeit nationaler Standards beruhen (Übersicht bei ISO¹⁷²).

Tabelle 4: VDI-Richtlinien zur Bionik

VDI-Richtlinie	Titel	Ausgabedatum
6220 Blatt 1	Bionik – Konzeption und Strategie – Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten	2012 – 12
6221 Blatt 1	Bionik – Bionische Oberflächen	2013 – 09
6222 Blatt 1	Bionik – Bionische Roboter	2013 – 11
6223 Blatt 1	Bionik – Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile	2013 – 06
6224 Blatt 1	Bionische Optimierung – Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung	2012 – 06
6224 Blatt 2	Bionische Optimierung – Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile	2012 – 08
6224 Blatt 3	Bionik – Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses	2016 – 04 (Entwurf)
6225 Blatt 1	Bionik – Bionische Informationsverarbeitung	2012 – 09
6226 Blatt 1	Bionik – Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign – Grundlagen	2015 – 02

Für den **Aufbau neuer Kooperationen** zwischen Unternehmen, Hochschulen und/oder Forschungseinrichtungen können sowohl das deutschlandweite Bionik-Netzwerk BIONIKON e. V. als auch die verschiedenen Netzwerke der Länder (z. B. Baden-Württemberg, Hessen, Bayern, Bremen, Saarland) als erste Anlaufstelle dienen.¹⁷³ In den Netzwerken zur Bionik sind die Kompetenzen der Unternehmen, Hochschulen, Forschungseinrichtun-

¹⁷¹ Vgl. VDI (2013), S. 5.

¹⁷² Vgl. International Organization for Standardization (2017).

¹⁷³ Vgl. Seitz, H. (2013), S. 47 f.

gen und weiterer Akteure gebündelt, so dass erste Ansprechpartner für spezifische Fragestellungen von den jeweiligen Geschäftsstellen vermittelt werden können. Auch zu Förderinitiativen des Bundes und der Länder vermitteln die Netzwerke einen Zugang.

Regional erwähnenswert ist der „Kompetenzatlas Bionik in Hessen“, der im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung vom Bionik-Netzwerk Hessen erstellt wurde.¹⁷⁴ Neben einer Übersicht der Bionik-Landschaft in Hessen sind hier eine Kompetenzmatrix und Kompetenzprofile mit Ansprechpartnern derjenigen Unternehmen in Hessen zu finden, die sich mit Bionik beschäftigen. Die Matrix lässt erkennen, in welchen Bereichen der Bionik die jeweiligen Unternehmen aktiv sind. Darüber hinaus findet sich eine Übersicht über regionale und überregionale Netzwerke sowie über aktuelle Förderprogramme, in denen Unternehmen finanzielle Unterstützung bei ihrer bionischen Produktentwicklung beantragen können.

Ein für **KMU** speziell in der Grenzregion Deutschland-Niederlande hilfreiches Förderprojekt im Kooperationsprogramm „INTERREG Deutschland-Niederland“ ist im Jahr 2016 gestartet. KMU im deutsch-niederländischen Grenzgebiet können an dem Projekt „Bionik in KMU“ teilnehmen und gemeinsam mit Bionik-Experten und Partnerunternehmen zusammenarbeiten. Dafür wurde von den Projektpartnern ein Konzept entwickelt, bei dem die ersten Phasen bis zur Identifizierung bionischer Lösungen kostenfrei sind. Erst wenn es um die detaillierte Umsetzung geht, werden Kosten anteilig berechnet.¹⁷⁵ Das Projekt wird von verschiedenen Ministerien beider Länder und weiteren Organisationen kofinanziert und von Hochschulen, Instituten und Unternehmen inhaltlich getragen.

Spezialisierte Entwicklungsunternehmen können Unternehmen bei der bionischen Produktentwicklung unterstützen. Sie bieten systematische Vorgehensweisen, um gemeinsam mit den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Unternehmen ein erfolgreiches Bionik-Projekt durchzuführen. Im Folgenden werden beispielhaft zwei Arbeitsweisen zur Unterstützung von Unternehmen kurz dargestellt.

¹⁷⁴ Vgl. Lübke, K. und Belzer, S. (2015).

¹⁷⁵ Vgl. Bionik in KMU (2017).

Die fünf Schritte, die das Entwicklungsunternehmen „die Bioniker“ in einem Bionik-Projekt vermitteln, sind¹⁷⁶

- (1) die Problemanalyse, aus der hervorgeht, auf welche Funktionen der Fokus gelegt werden soll,
- (2) das Screening nach geeigneten biologischen Vorbildern,
- (3) die Abstraktion als Dienstleistungsangebot,
- (4) ein Kreativ-Workshop, in dem gemeinsam mit den Mitarbeitern des Unternehmens Ideen zur technischen Umsetzung und Lösung entwickelt werden, und schließlich
- (5) die Umsetzung über Prototyp, Tests und Entwicklung der Problemlösung oder des innovativen Produkts.

Abbildung 7 stellt beispielhaft die Zusammenarbeit zwischen Entwicklungsunternehmen und Industriepartner dar.

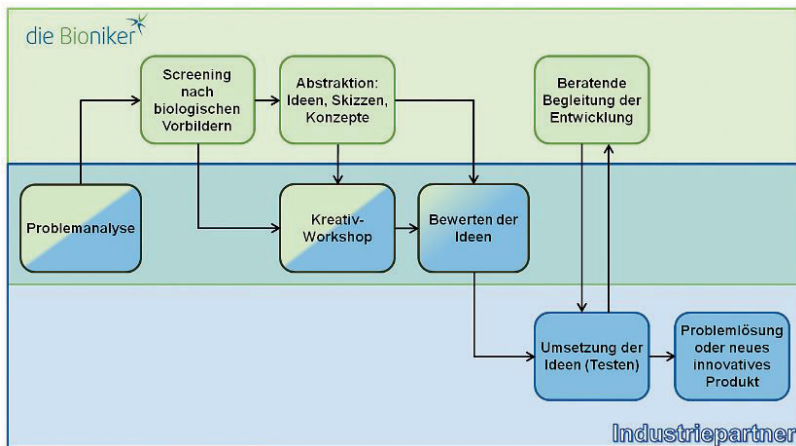


Abbildung 7: Schema einer beispielhaften Zusammenarbeit zwischen einem Entwicklungsunternehmen und Industriepartnern¹⁷⁷

¹⁷⁶ Vgl. Banthin, H. (2014), S. 40 f.

¹⁷⁷ Banthin, H. (2014), S. 41.

Ein ähnliches Vorgehen verfolgt auch die Pumacy Technologies AG.¹⁷⁸ Die Berater im Innovationsmanagement bieten Unternehmen eine Zusammenarbeit bei der Lösungssuche durch Bionik an und verdeutlichen dies anhand von 13 biologischen Vorbildern und deren Potenzialen für technische Anwendungen.¹⁷⁹

Wenn Produktentwickler prüfen möchten, welche biologischen Vorbilder sich für die Lösung ihrer technischen Fragestellung eignen oder wenn sie bereits genauere Vorstellungen davon haben, wie eine bionische Lösung aussehen könnte, bieten verschiedene **Datenbanken** Suchoptionen. Derartige Datenbanken bzw. Softwarelösungen sind insbesondere deshalb hilfreich, weil die Biologie mittlerweile in eine unüberschaubare Anzahl an verschiedenen Fachgebieten aufgeteilt ist. Hier das jeweilige Experten- oder Spezialwissen zu finden, ist überaus aufwendig.¹⁸⁰ Das Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO hat ein datenbankgestütztes Technik-Biologie-Wörterbuch - BIOPS: Biology Inspired Problem Solving - entwickelt, dessen Demoversion kostenfrei verfügbar ist.¹⁸¹ Um zu Vorschlägen für eine technische Fragestellung zu gelangen, können die Fragestellungen mit englischen Schlüsselwörtern in ein Suchfeld eingegeben werden. Der Nutzer erhält anschließend eine Auswahl an möglichen biologischen Vorbildern, deren Funktionsprinzipien zum technischen Problem passen könnten. In einem weiteren Schritt werden entweder passende Publikationen zu diesem Thema angezeigt oder es wird auf weitere Datenbanken verwiesen, in denen entsprechende Suchen durchgeführt werden können (Tabelle 5).

Die bisher verfügbaren Datenbanken benötigen für Aufbau, Aktualisierung und Pflege viel Zeit und erfahrene Mitarbeiter, die die Betreuung übernehmen. Zudem gibt es einige Datenbanken, die nicht allgemein verfügbar sind und nur unternehmensintern verwendet werden. Aus diesem Grund gibt es derzeit auf ISO-Ebene im ISO/TC 266, WG 4, Bestrebungen, eine so

¹⁷⁸ Vgl. Pumacy Technologies AG (2017a).

¹⁷⁹ Vgl. Pumacy Technologies AG (2017b).

¹⁸⁰ Vgl. Bertling, J. (2014), S. 159.

¹⁸¹ Vgl. BIOPS® (2017).

genannte „Knowledge infrastructure of biomimetics“ zu entwickeln, die einfacher zu handhaben und frei verfügbar sein soll. Unter japanischer Leitung soll in den kommenden Jahren ein ontologiegestützter Thesaurus zur Auffindung von Analogien in der Natur erstellt werden.¹⁸²

Tabelle 5: Datenbanken zur Recherche nach biologischen Vorbildern

Datenbank	URL	Beschreibung
BIOPS®, Fraunhofer IAO	www.greentechxchange.com/biops/demo.cgi	Suche nach Analogien
BioPat, Fraunhofer IAO	www.iao.fraunhofer.de/lang-de/ueber-uns/presse-und-medien/336-biopat.html	Fraunhofer-interne Datenbank: Dienstleistungsangebot
AskNature, Biomimicry Institute, Montana USA	https://asknature.org/	Suche nach technischen Lösungen und biologischen Vorbildern
ScienceDaily, LLC, Maryland USA	www.sciencedaily.com	Suche nach Publikationen
Freepatentsonline	www.freepatentsonline.com	Patentsuche

Die größte Schwierigkeit bei der datenbankgestützten Suche nach geeigneten biologischen Vorbildern zur Lösung technischer Probleme besteht darin, dass die Nutzer über ein solides naturwissenschaftliches Wissen verfügen müssen. Die Einschätzung, ob das gefundene biologische Vorbild Funktionsprinzipien aufweist, aus denen die gesuchten Lösungen abgeleitet werden können, ist zum Teil sehr komplex und erschließt sich nicht notwendigerweise auf den ersten Blick. Aus diesem Grund wurde die BIOPS®-Datenbank von Mitarbeitern des Fraunhofer IAO zu der nur intern verwendeten Software BioPat® weiterentwickelt. Die Software findet biologische Funktionsprinzipien und unterstützt ebenfalls die Übertragung dieser auf die technischen Lösungen.¹⁸³ Da aber auch bei dieser Softwarelösung meist naturwissenschaftliche Vorkenntnisse erforderlich sind, bietet das Fraunhofer IAO zusätzlich eine Bionikpotenzialanalyse als Dienstleistung an. Hier werden der Umgang mit der Software, eine Analyse der technischen Ausrichtung und der Kernkompetenzen des Unternehmens sowie verschiedene Workshops genutzt, um in Kooperation mit den Unternehmen bionische Lösungen bis hin zur Prozessoptimierung und Produktentwicklung zu generieren.¹⁸⁴

¹⁸² Vgl. International Organization for Standardization (2017).

¹⁸³ Vgl. Fraunhofer IAO (2017a).

¹⁸⁴ Vgl. Fraunhofer IAO (2017b).

Bionik als Baustein für Innovationen - drei Unternehmensbeispiele

Die **Festo AG & Co. KG** ist ein Unternehmen der Steuerungs- und Automatisierungstechnik, das weltweit ca. 18.700 Mitarbeiter beschäftigt. Im Jahr 2006 gründete das Unternehmen das „Bionic Learning Network“ als Entwicklungsplattform für innovative Technologien und Fertigungsverfahren.¹⁸⁵ Ziel ist es, innerhalb eines Kernteams gemeinsam mit Partnern aus Hochschulen und Unternehmen neue biologisch inspirierte kreative Ideen und Lösungen zu entwickeln, die dabei helfen, die Steuerungs- und Automatisierungstechnik voranzutreiben. Dabei geht es darum, für die Kunden von Festo neue Produkte und Anwendungen zu entwickeln und zu optimieren. Ein weiteres Ziel liegt darin, junge Menschen über die Bionik für Technik zu begeistern und neue Talente für das Unternehmen zu finden. Dazu gehört auch Festo Didactic als Dienstleister für technische Bildung.¹⁸⁶

Ein bionisches Projekt dauert bei Festo etwa ein Jahr. Die Neuheiten werden regelmäßig auf der Hannover Messe präsentiert. Bausteine der entwickelten bionischen Lösungen werden anschließend gegebenenfalls mit Kunden in der Produktion umgesetzt.¹⁸⁷ Mit diesem Vorgehen hat Festo gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) im Jahr 2010 den Deutschen Zukunftspreis für die Entwicklung eines bionischen Handling-Assistenten gewonnen.¹⁸⁸ Dieser Assistent wurde vom inneren Aufbau des Elefantenrüssels inspiriert, ist aus nachgiebigen Materialien aufgebaut und wird mit Druckluft betrieben. Als Greifer dient eine dreigliedrige „Hand“, die nach dem FinRay®-Effekt funktioniert. Durch diese Form der Soft-Robotics ist eine direkte Zusammenarbeit mit Menschen möglich, ohne dass die Gefahr einer Verletzung besteht. Für Festo ist die Bionik ein Treiber für Innovationen und Wettbewerbsvorteile, aber auch öffentlichkeitswirksam und imagebildend.

Ähnlich wie Festo plant auch **Airbus**, die Bionik verstärkt als Inspiration heranzuziehen. Der Flugzeugbauer ist insbesondere daran interessiert,

¹⁸⁵ Vgl. Festo (2017a).

¹⁸⁶ Vgl. Festo (2017b).

¹⁸⁷ Vgl. Wolfangel, E. (2016).

¹⁸⁸ Vgl. Deutscher Zukunftspreis (2010).

Leichtbau unter Einsatz bionischer Verfahren in Kombination mit additiven Verfahren zu nutzen.¹⁸⁹ Hierzu hat das Unternehmen ein internes Netzwerk ins Leben gerufen, das Konferenzen, Wettbewerbe und Workshops durchführen soll, um die Aktivitäten aus der Bionik unternehmensweit zu vernetzen und Synergien zu schaffen.¹⁹⁰ Das interne Wissen über Bionik in der gesamten Airbus Group wird zudem mit Bionik-Experten aus Hochschulen, anderen Netzwerken und Forschungsinstituten weiterentwickelt. Unter anderem arbeitet Airbus mit der Pumacy Technologies AG zusammen. Diesen fach- und unternehmensübergreifenden Austausch schätzt Airbus als zunehmend wichtigen Bestandteil seiner Innovationskultur ein. Auf diese Weise ist ein bionisches Airbus Concept Plane entstanden, das zeigt, wie ein intelligenter Rumpf, innovative Antriebe oder Kabinenbauteile aussehen könnten. Ziel ist es, zukünftig Flugzeuge zu entwickeln, die ein effizienteres und umweltschonenderes Fliegen ermöglichen.¹⁹¹

Ein mittelständisches Unternehmen, das ebenfalls Bionik als einen wesentlichen Baustein nutzt, ist die **sachs engineering GmbH**.¹⁹² Das Ingenieurbüro für Dienstleistungen im Bereich Produktentwicklung, CAD-Konstruktion und FEM-Berechnung verwendet die bionischen Topologieoptimierungen Computer Aided Optimization (CAO) und Soft Kill Option (SKO) für materialeffiziente Leichtbaulösungen in zahlreichen Branchen. Der Fokus liegt dabei allerdings auf dem Automobilbau. Hier gelingt es, für verschiedene Bauteile – von der Pleuelstange über Motorhalter bis zur Radnabe – bei gleicher oder besserer Stabilität Gewichtseinsparungen von mehr als 22 Prozent zu erreichen.¹⁹³

¹⁸⁹ Vgl. Kaiser, O. S.; Krauss, O.; Seitz, H. und Kirmes, S. (2016), S. 34 – 35.

¹⁹⁰ Vgl. Flugrevue (2014).

¹⁹¹ Vgl. Sander, P. und Hollermann, M. (2014), S. 42 – 43.

¹⁹² Vgl. sachs engineering (2017).

¹⁹³ Vgl. Sachs, W. (2016), S. 164 – 165.

5 FAZIT

Die Bionik eröffnet der Ressourceneffizienz enorme Chancen. Gerade für die Anforderungen der EU an ein umweltfreundlicheres Produktdesign energieverbrauchsrelevanter Produkte im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie können bionische Lösungen erfolgversprechende Alternativen bieten. Neben der Erhöhung der Energieeffizienz können bionische Lösungen auch zu einer Steigerung der Materialeffizienz beitragen.

Auf Basis der vorliegenden Literatur konnten in dieser Kurzanalyse Ressourceneffizienzpotenziale bionischer Lösungen qualitativ und rückblickend auf die bereits vorliegenden Produkte und Lösungsansätze bewertet werden. Der größte Hebel zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Produkten liegt in der Konzeption und Gestaltung der Produkte im Produktentwicklungsprozess. Dazu kann die Bionik einen bedeutenden Beitrag leisten. Diesen Hebel gilt es, zukünftig besser zu nutzen und dafür Anreize für Unternehmen zu schaffen.

Unternehmen erhalten immer dann einen einfachen und schnellen Zugang zur Bionik, wenn bereits etablierte bionische Methoden oder Produkte eingesetzt werden können. Beim Einsatz bionischer Methoden muss der ursprüngliche Prozess des bionischen Arbeitens nicht bei jeder Entwicklung erneut durchlaufen werden. Dies trifft insbesondere für evolutionäre Algorithmen oder Methoden des bionischen Leichtbaus zu.

Im Gegensatz zu KMU ist es für Großunternehmen, die in der Regel größere Entwicklungsabteilungen vorweisen, einfacher, Bionik zusätzlich zu den klassischen Produktentwicklungsmethoden zu integrieren. Eine gewisse Anzahl von Entwicklungsmitarbeitern mit interdisziplinärer Ausrichtung, ausgestattet mit ausreichendem Entwicklungsbudget, steht hier für innovative Entwicklungsaufgaben zur Verfügung. Oftmals haben größere Unternehmen auch genügend Entwicklungsvorlauf, um vielversprechende Ansätze weiterzuentwickeln.

Insbesondere KMU müssen zwischen Kosten, Aufwand und Nutzen abwägen. Eine bionische Lösung ist immer dann interessant, wenn die Lösungen, die mit klassischen Herangehensweisen erzielt werden, keine weite-

ren oder nur geringere Vorteile mit sich bringen. Allerdings bietet die Bionik wie auch alle anderen Innovationsmethodiken keine Erfolgsgarantie.

Für KMU steht eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Verfügung, um einen Zugang zum bionischen Arbeiten zu erhalten. Dennoch wurde deutlich, dass es verschiedener Maßnahmen bedarf, um die Potenziale der Bionik auch zukünftig für innovative und ressourceneffiziente Produkte ausschöpfen zu können. Einen wesentlichen Baustein stellt die interdisziplinäre Ausbildung des Nachwuchses in Lehre und Studium dar. Insbesondere in der Wissenschaftsdisziplin Bionik zeigt sich, wie wichtig es ist, alle notwendigen Methoden einzubeziehen, wesentliche Kompetenzträger zur Lösung von Problemen zusammenzuführen und über fachliche Grenzen hinweg zusammenzuarbeiten. Die Erlangung dieser interdisziplinären Fähigkeiten muss Eingang in die Ausbildung des Nachwuchses finden.

Über die unternehmerischen Aspekte hinaus spielt die strategische Forschungsförderung eine wichtige Rolle, um die Bionik als Innovationsmethode im unternehmerischen Umfeld zu etablieren:

- bionische Grundlagenforschung zur Beschreibung der Potenziale natürlicher Prinzipien für technische Anwendungen,
- Forschung an effizienten Verfahren zur Herstellung komplexer bionischer Strukturen,
- interdisziplinäre Verbundforschung unter Einbeziehung von KMU mit Hochschulen und Forschungsinstitutionen zur Herstellung innovativer, wirtschaftlicher bionischer Produkte und Methoden und nicht zuletzt
- Untersuchungen und Handlungsempfehlungen, wie Ressourceneffizienz als immanenter Bestandteil über den gesamten Produktlebensweg in das bionische Arbeiten integriert werden kann.

TEIL 2: FACHGESPRÄCH

6 PROGRAMM DES FACHGESPRÄCHS „RESSOURCENEFFIZIENZ DURCH BIONIK“

Berlin, 9. Februar 2017

Moderation: Dr. Martin Vogt (Geschäftsführer VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH)

TOP 1: Begrüßung und Vorstellungsrunde

TOP 2: Vortrag: Bionik als Baustein für eine ressourceneffiziente Wirtschaft, Dr. Rainer Erb (BIOKON e. V., Berlin)

TOP 3: Vortrag: Ressourceneffizienz durch Bionik - Ergebnisse einer Kurzanalyse des VDI ZRE, Dr. Heike Seitz (VDI TZ GmbH, Düsseldorf)

TOP 4: Vortrag: Bionik als Innovationsstrategie für effiziente und konsistente Lösungen, Dr. Jürgen Bertling (Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen)

TOP 5: Moderierte Diskussion zu den Vorträgen

TOP 6: Vortrag: Unternehmen den Zugang zur Bionik erleichtern, Markus Hollermann (Altran Deutschland S.A.S. & Co. KG, Hamburg), vertreten durch Herrn Dr. Rainer Erb (BIOKON e. V., Berlin)

TOP 7: Vortrag: Oberflächennahe Temperierung - mit bionischen Werkzeugen zu mehr Effizienz, Ulrich Grunewald (Grunewald GmbH & Co KG, Bocholt)

TOP 8: Vortrag: StoColor Dryonic - Bionik-Lösung für trockene Fassaden, Uwe Brühl (Sto SE & Co. KGaA, Stühlingen), vertreten durch Herrn Dr. Christian Schaller (Pfinder KG, Böblingen)

TOP 9: Vortrag: Synergetische Produkteigenschaften durch bionischen Wölbstrukturierungsprozess, Prof. Dr. Frank Mirtsch (Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH, Berlin)

TOP 10: Moderierte Diskussion und Abschlussdiskussion

TOP 11: Zusammenfassung und Ausblick

7 DOKUMENTATION DES FACHGESPRÄCHS

Am 9. Februar 2017 fand in Berlin ein Fachgespräch zum Thema „Ressourceneffizienz durch Bionik“ mit 24 Teilnehmenden aus Forschung, Industrie, Politik und fachlichen Netzwerken statt. Zum Fachgespräch lud die VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH ein. In Diskussionsblöcken wurde die Rolle der Ressourceneffizienz bei bionischen Produkten und Prozessen betrachtet. Neben Fragen nach den Potenzialen der Bionik für Ressourceneffizienz in den einzelnen Lebenswegphasen stand die Umsetzung ressourceneffizienter bionischer Lösungen in die Praxis bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) – vor allem im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses – im Mittelpunkt der Diskussion. Zudem wurden Hemmnisse diskutiert, die Unternehmen davon abhalten, Bionik als Innovations- und Effizienzmethode zu nutzen.

7.1 Potenziale der Bionik für Ressourceneffizienz

Die Teilnehmenden sind sich einig, dass bionische oder auch bioinspirierte Lösungen große Potenziale im Hinblick auf die Einsparung natürlicher Ressourcen aufweisen können. Dies wird durch viele Beispiele aus der Praxis untermauert. So könnte beispielsweise durch die Antifouling-Eigenschaften eines künstlichen Haihaut-Anstrichs bei Containerschiffen der Verbrauch an fossilen Energieträgern in der Nutzungsphase um 40 Prozent gesenkt werden. Ein kommerzieller Anstrich ist allerdings derzeit lediglich für kleinere Schiffe verfügbar und noch nicht für die Beschichtung großer Flächen auf Containerschiffen einsetzbar. Auch die im Automobil- und Flugzeugbau bereits etablierten Konstruktionsroutinen für Leichtbauprodukte auf Basis biologischer Vorbilder führen zu einer Gewichtsverringerung des Produkts und damit zu einer Einsparung fossiler Energieträger in der Nutzungsphase. Beispiele für Konstruktionsroutinen sind das ELiSE-Verfahren oder die bionischen Methoden zur Strukturoptimierung.

In den überwiegenden Fällen orientieren sich bionische Lösungen an Einzel- oder Teilaspekten von Produkten, z. B. Oberflächen- oder Struktureigenschaften. Es gilt als erwiesen, dass durch diese Lösungen gerade bei den Gebrauchseigenschaften von Produkten herausragende Effekte erzielt werden, die häufig auch zu einer Erhöhung der Ressourceneffizienz beitra-

gen. Das zeigt etwa ein bionisches selbstschärfendes Messer mit verdoppelter Standzeit. Bei der Bestimmung der Material- (MIPS¹⁹⁴-Analysen) und Primär-Energieaufwendungen (KEA¹⁹⁵-Analysen), des Wasserverbrauchs (Waterfootprint¹⁹⁶-Analysen) oder der Umweltwirkungen (Ökobilanzen¹⁹⁷) einzelner ausgewählter bionischer Produkte im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertungen innerhalb der Fördermaßnahme BIONA des BMBF schnitten einzelne Ressourceneffizienzindikatoren im Vergleich zu konventionellen Produkten häufig besser ab. Ausnahme bildete ein Designobjekt in Form eines Stuhls, das nach dem biologischen Vorbild von Zellstrukturen im Lasersinterverfahren in Kunststoffausführung hergestellt wurde. Dieses war nicht so ressourceneffizient wie das klassische Spritzgießverfahren. Die im Fachgespräch vorgestellten Bewertungen der bionischen Produkte erfolgten nur über eine Analyse einzelner Ressourceneffizienzindikatoren, z. B. KEA oder MIPS, und nicht auf Basis des kompletten Indikatorensets für Ressourceneffizienz. Somit waren belastbare quantifizierte Daten zur Bewertung des effizienten Einsatzes aller Ressourcenkategorien bei den vorgestellten Analysen bionischer Produkte nicht verfügbar.

Die Teilnehmenden schätzen das Ressourceneffizienzpotenzial biologischer Vorbilder jedoch weitaus größer ein, als es bisher ausgeschöpft wird. Die Reduktion biologischer Lösungen auf Einzel- oder Teilaspekte von Produkten wird den Potenzialen und Möglichkeiten biologischer Prozesse und Prinzipien nicht gerecht. Gerade Konsistenzstrategien der Natur wie solares Wirtschaften, Zirkularität, Modularität, Multifunktionalität, Selbstorganisation, Kooperation und dynamische Adaptivität bergen ein enormes, noch nicht zu bezifferndes Ressourceneffizienzpotenzial. Die physikalischen und/oder chemischen Prozesse und Grundprinzipien, die diesen Strategien zugrunde liegen, müssen in Zukunft entschlüsselt und verstanden werden, damit sie in technische Lösungen überführt werden können. Dies kann zu Innovationen oder sogar zu Paradigmenwechseln in Produktionsprozessen und Prozessketten – auch für jahrelang etablierte konventi-

¹⁹⁴ MIPS: Material Input pro Serviceeinheit.

¹⁹⁵ KEA: Kumulierter Energieaufwand (gemäß VDI 4600:2012-01).

¹⁹⁶ Vgl. Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M. und Mekonnen, M. M. (2011).

¹⁹⁷ Vgl. DIN EN ISO 14044.

onelle Fertigungsverfahren - führen. Um dies zu erreichen, sind noch viele Anstrengungen in der Grundlagenforschung und Entwicklungsarbeit notwendig. Neben den Ressourceneffizienzaspekten müssen dabei Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Qualitätssicherung und Arbeitsschutz berücksichtigt werden. Dafür ist eine öffentliche Förderung unerlässlich, sowohl im Bereich Grundlagenforschung als auch auf dem Gebiet anwendungsorientierter Innovationsforschung. Gerade bei der anwendungsorientierten Forschung ist die Einbeziehung von Unternehmen - insbesondere von KMU - in Forschungsverbünde und -kooperationen notwendig.

Eine weitere Chance für ressourceneffiziente bionische Lösungen sehen die Teilnehmenden in sich ändernden rechtlichen Rahmenbedingungen, wie sie im neuen Kreislaufwirtschaftspaket der EU vorgesehen sind. Die darin verankerten Regelungen und Anforderungen an Produkte zu Aspekten wie Reparierbarkeit, Lebensdauer oder Recyclingfähigkeit fordern und fördern die Entwicklung optimierter bzw. innovativer technischer Lösungen. Somit können Kundenanforderungen ordnungspolitisch in Richtung Ressourceneffizienz gelenkt und eine Innovationskultur in Unternehmen angeregt werden. Die Bionik kann Antworten auf diese regulativen Anforderungen geben.

7.2 Bionik und Ressourceneffizienz in KMU

Ressourceneffizienz-Maßnahmen können in Unternehmen zu maßgeblichen Kosteneinsparungen führen und sind daher zunehmend im Fokus von Unternehmensstrategien in KMU. Im Rahmen des Fachgesprächs stellte sich die Frage, ob auch die Entwicklung bionischer Produkte oder Prozesse zunehmend in die strategische Ausrichtung von Unternehmen eingebunden wird.

Aus Erfahrungen der teilnehmenden Unternehmensvertreter stehen meist die Kriterien Preis, Qualität, Innovation von Produkten und kurzfristig realisierbare Liefertermine im Zentrum der Unternehmensstrategie. Diese Kriterien tragen maßgeblich zur Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen bei. Dabei ist es unerheblich, ob die angebotenen Produkte bionischen oder konventionellen Charakters sind. Bei einem Beispielfall machen Kundenanfragen zu bionischen Lösungen weniger als fünf Prozent aller Anfragen aus. Somit besteht derzeit kein Market-pull für bionische Lösungen, da die

Innovations- und Ressourceneinsparpotenziale der Bionik in vielen Unternehmen noch nicht hinreichend bekannt sind.

Sind bionische Lösungsansätze in der Produktentwicklung erst einmal vertraut, werden sie grundsätzlich als eine wertvolle Möglichkeit zur Erweiterung des Lösungsraums verstanden, da Bionik häufig mit einem hohen Innovationspotenzial verknüpft wird, auch wenn sie nicht in allen Fällen die beste Lösung für ein bestimmtes Produkt oder einen bestimmten Prozess bieten kann. Firmeninterne Problemstellungen können unter Hinzunahme externer Bionik-Experten diskutiert werden. Dabei wird erfahrungsgemäß die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Mitarbeiter gestärkt und ihre Kreativität angeregt, neue Zusammenhänge zwischen Natur und Technik zu erkennen. Damit ist die Bionik ein Mittel und Werkzeug, um den Unternehmenshorizont bei der Produktentwicklung zu erweitern. Ob diese kreative Auseinandersetzung mit biologischen Vorbildern auch zu marktfähigen bionischen Produkten oder Prozessen führt, hängt maßgeblich von anderen unternehmensstrategischen Kriterien ab, da die Umstellung auf bionische Prozesse mit einem hohen unternehmerischen Risiko verbunden ist. Dennoch wird das bionische Vorgehen als eine wertvolle Ergänzung im Produktentwicklungsprozess angesehen, welches ebenso bei weiteren Entwicklungsprozessen zu einem Routinebaustein werden kann. Auch bei den konventionell umgesetzten Herstellungsprozessen kann von den natürlichen Prozessen gelernt werden.

Wenn ein Unternehmen die Entwicklung und Umsetzung bionischer Lösungen strategisch verankert, ist dies vor allem auf ein visionäres Anliegen der Unternehmensführung zurückzuführen. Die Entwicklung bionischer Produkte kann von der Idee bis zur Marktdurchdringung einen langen Zeitraum einnehmen und bis zu zehn Jahre dauern. Eine Herausforderung stellt dabei die lange Entwicklungszeit durch komplexe Fragestellungen, durch die Identifikation des passenden biologischen Vorbilds, durch interdisziplinäre Abstimmungsprozesse im Entwicklungsteam, durch die Einbindung und gegebenenfalls Anpassung vor- oder nachgelagerter konventioneller Fertigungstechnologien und die damit verbundene Kosten- und Zeitintensität dar. Anders als bei manchen Großunternehmen, die über eine bionische Entwicklungsabteilung verfügen, müssen KMU die Herausforderungen mit geringeren personellen und finanziellen Mitteln stemmen.

Förderprogramme des Bundes wie das ZIM-Programm (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand) leisten auch im Bereich der Entwicklung bionischer Produkte und Prozesse einen wertvollen Beitrag. Für die Entwicklung serientauglicher Softwarelösungen, z. B. zur Abbildung biologischer Prozesse und Prinzipien, waren die finanziellen Mittel aus einer ZIM-Förderung in einem Beispielfall zu gering.

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die Teilnehmenden in der Verknüpfung von Ressourceneffizienz mit Bionik und damit in der Entwicklung ressourceneffizienter bionischer Produkte und Prozesse eine große Chance für Unternehmen sehen, den zukünftigen rechtlichen Rahmenbedingungen, den Marktanforderungen und Erfordernissen einer ressourcenschonenden Wirtschaft zu begegnen. Dazu müssen Ressourceneffizienzaspekte in die Lastenhefte bzw. in die Zielformulierung bionischer Entwicklungsprozesse eingebunden werden. Eine Anregung liegt darin, die Ressourceneffizienz-Maßnahmen- und -Strategietabelle aus den VDI-Richtlinien VDI 4800 Blatt 1 und VDI 4801 um bionische Lösungen zu erweitern. Eine Auflistung bionischer Strategien kann eine intensive Zusammenarbeit mit Experten zur Identifizierung spezifischer biologischer Lösungsansätze für individuelle unternehmensrelevante Fragestellungen nicht ersetzen. Jedoch werden durch eine derartige Übersicht Impulse und Denkanstöße für Unternehmen geliefert, die Bionik für weitere Innovationen oder als eine weitere Innovationsmethode in Erwägung ziehen.

Neben dem Wunsch nach Fördermaßnahmen oder -strategien zur grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung sehen die Teilnehmenden eine große Chance in der gezielten Förderung des Nachwuchses. Dabei sind die Vermittlung von biologischem, ingenieurwissenschaftlichem und systemischem Grundlagenwissen bei der Ausbildung und die Anregung von Denk- und Kreativitätsprozessen von besonderer Bedeutung. Die Hochschulausbildung hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht, vor allem durch eine Verankerung der Bionik in die technischen Hochschulstudiengänge in Bocholt und Bremen sowie durch die Integration des Themas Ressourceneffizienz in Vorlesungsmodule unterschiedlichster Fachrichtungen. Die Ausbildungsaktivitäten rund um Bionik, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz werden durch zielgruppengerechte Informationsangebote unterstützt. Aktuell befasst sich die BMUB-geförderte Kampagne

„green up your future“ mit der Aufklärung von Jugendlichen über grüne Berufe und nachhaltige Ansätze von und in Unternehmen.

LITERATURVERZEICHNIS

ADIDAS AG (2016): Adidas präsentiert weltweit ersten Performance-Schuh aus Biosteel®-Fasern [online]. ADIDAS AG, Herzogenaurach, 18. Nov. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.adidas-group.com/de/medien/newsarchiv/pressemitteilungen/2016/adidas-praesentiert-weltweit-ersten-performance-schuh-aus-biosteel/

Airbus (2017): Breakthrough for future Airbus A320 - A partition designed to save weight (and fuel) [online]. Airbus Defence and Space GmbH, München [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/Pioneering-bionic-3D-printing.html

Alfred-Wegener-Institut (2016): ELiSE - Von der Natur zum fertigen Produkt. Internetauftritt ELiSE [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.elise.de

Amsilk (2017): Biosteel® [online]. AMSilk GmbH, Planegg [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.amsilk.com/industries/biosteel-fibers

Antony, F.; Griebhammer, R.; Speck, T. und Speck, O. (2014): Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure. *Bioinspiration & Biomimetics*, **9**(1), S. 016013 (15 Seiten), DOI: 10.1088/1748-3182/9/1/016013.

Antony, F.; Mai, F.; Speck, T. und Speck, O. (2012): Bionik - Vorbild Natur als Versprechen für nachhaltige Technikentwicklung? *Naturwissenschaftliche Rundschau*, **65**(4), S. 175 - 182.

APWORKS (2017): Duktil wie Titan, leicht wie Aluminium [online]. Airbus APWORKS GmbH, Taufkirchen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.apworks.de/scalmalloy/

Ars Electronica (2016): Bionic Partition: Generative Design for Aerospace [online]. Ars Electronica Linz GmbH, 12.09.2016, Linz, Österreich [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.aec.at/radicalatoms/de/bionic-partition/

Banthin, H. (2014): Bionisches Arbeiten in der Praxis – Hemmnisse abbauen, Chancen ergreifen! Konstruktion, Springer-VDI-Verlag, Sept. 2014, S. 40 – 41, auch verfügbar als PDF unter: www.diebioniker.de/wp-content/themes/diebioniker/images/die-Bioniker_VDI-Artikel_HB_092014.pdf

Barthlott, W. (2017): Superhydrophobe selbstreinigende Oberflächen: Der Lotus-Effekt®. [online]. Nees-Institut für Biodiversität der Pflanzen, Bonn [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.lotus-salvinia.de/index.php/de-de/funkpri/8-das-biologische-vorbild-selbstreinigende-oberflaechen

Baulinks (2014): Bionische Fassadenverschattung Flectofin auch für gebogene Fassaden geeignet [online]. ARCHmatic - Alfons Oebbeke, Neustadt [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.baulinks.de/webplugin/2014/0173.php4

Baulinks (2015): Vom Nebeltrinkerkäfer inspiriert: neue CO₂-neutrale Fassadenbeschichtung ohne Biozide [online]. ARCHmatic - Alfons Oebbeke, Neustadt [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.baulinks.de/webplugin/2015/0151.php4

Beismann, H.; Ossendoth, U.; Hermann, M. und Grunewald U. (2015): Machbarkeitsstudie zur Optimierung der Kühlung von Formwerkzeugen durch bionische Methoden zur Erhöhung der Taktzahl bei der Ausformung von Produkten und damit einer Effizienzsteigerung zur Ressourcenschonung und Energieeinsparung. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Az: 30156/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Bocholt, 14. Sept. 2015.

Bertling, J. (2014): Bionik als Innovationsstrategie. In: Herstatt, C. (2014). Innovationen durch Wissenstransfer (Hrsg.). Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, DOI: 10.1007/978-3-658-01566-4_7.

BIOKON (2014a): Leise wie ein Eulenflügel [online]. BLOKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V., 21. Aug. 2014 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.biokon.de/newsuebersicht/leise-wie-ein-eulenfluegel/

BIOKON (2014b): Von den Ratten abgeschaut: Selbstschärfende Messer in Industriemaschinen [online]. BIONIKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V., Presse//15. Jan. 2014 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.biokon.de/bionik/best-practices/detail/?tx_nenews_uid=1646&cHash=2095adfb5c79610d3ae09573e7a8a07f

BIOKON (2015): Superleise bionische Lüfter mit Schlaufenrotor [online]. BIONIKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V., Presse//9. Juli 2015 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.biokon.de/news-uebersicht/superleise-bionische-luefter-mit-schlaufenrotor/

BIOKON (2016): „Flower Power“: Photovoltaik nach dem Vorbild der Rose [online]. BIONIKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V., Presse//2. Juli 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.biokon.de/news-uebersicht/flower-power-photovoltaik-nach-dem-vorbild-der-rose/

BIOKON (2017): Die BIONIKON-Fachgruppen - Die Think-Tanks der Bionik [online]. BIONIKON - Forschungsgemeinschaft Bionik-Kompetenznetz e. V., Berlin 2017 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.biokon.de/netzwerk/fachgruppen

BIONA (2012): Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien [online]. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Bonn 2012 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.bionische-innovationen.de

Bionik in KMU (2017): Bionik, etwas für Sie? [online]. Bionik in KMU, INTERREG Deutschland/Neederland, Groeningen, NL [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.bionikkmu.eu/bionik-etwas-fur-sie

Bioökonomie.de (2016): Sneaker aus Biotech-Spinnseide [online]. bioökonomie.de, Berlin, 22. Nov. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.biooekonomie.de/nachrichten/sneaker-aus-biotech-spinnseide

BIOPS® (2017): Biology Inspired Problem Solving - Suchwerkzeug im Ideenreservoir der Natur [online]. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.greentechxchange.com/biops/index.html

Blacknoise (2013): Bionische Ventilatoren-Technologie [online]. Blacknoise Deutschland GmbH, Hilden [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.blacknoise.com/site/de/technologien/bionische-ventilatoren-technologie.php

Brady, R. F. und Singer, I. L. (2000): Mechanical factors favoring release from fouling release coatings. *Biofouling*, **15**(1 - 3), S. 73 - 81, DOI: 10.1080/08927010009386299.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2005): Innovationen aus der Natur - Förderkonzept Bionik. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Bonn, Berlin 2005, auch verfügbar als PDF unter: www.fona.de/download_publikation/Innovationen_aus_der_natur_bionik.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011a): Bionische Rüsselkinematik für sichere Roboteranwendungen in der Mensch-Maschine-Interaktion - „BROMMI“. Projektblatt. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Bonn, 2011, auch verfügbar als PDF unter: www.bionische-innovationen.de/download/Projektblatt_brommi.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011b): Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien - Wege der Bionik [online]. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Bonn, 2011 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.bionische-innovationen.de/#bionik.html

Clark, I. A.; Daly, C. A.; Devenport, W.; Alexander, W. N.; Peake, N.; Jawooski, J. W. und Glegg, S. (2016): Bio-inspired canopies for the reduction of roughness noise. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 385, S. 33 - 54. ScienceDirect®, Elsevier B. V., verfügbar unter: www.dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.08.027

Comanns, P.; Buchberger, G.; Buchsbaum, A.; Baumgartner, R.; Kogler, A.; Bauer, S. und Baumgartner, W. (2015): Directional, passive liquid transport: the Texas horned lizard as a model for a biomimetic 'liquid diode' [online]. *Journal of the royal society interface* 12: 20150415, The royal society publishing, July 2015 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.rsif.royalsocietypublishing.org/content/12/109/20150415

Der Konstrukteur (2016): Effizienztiere [online]. *Der Konstrukteur* 11/2016, S. 71 von 116 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.digital.derkonstrukteur.de/der-konstrukteur-11-2016/56280946/70

Deutscher Zukunftspreis (2010): Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation – Preisträger 2010 [online]. Geschäftsstelle Deutscher Zukunftspreis Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, Essen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.deutscher-zukunftspreis.de/de/preistraeger-2010

DIN EN ISO 14044/A1:2017-01: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen – Änderung 1. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 18458:2016-08: Bionik – Terminologie, Konzepte und Methodik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN ISO 18459:2016-08: Bionik – Bionische Strukturoptimierung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dostert, E. (2017): Wie Seide [online]. Süddeutsche Zeitung, Süddeutsche Zeitung GmbH, München, 21. Febr. 2017 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.sueddeutsche.de/wirtschaft/technik-wie-seide-1.3388484

Dr. Mirtsch GmbH (2009): Selbstbildende wölbstrukturierte Materialien für funktionelle Leichtbauprodukte mit Ressourcenschonung [online]. iw-online.de, jaboo.solutions, Moers, 27. Mai 2009 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.iw-online.de/selbstbildende-woelbstrukturierte-materialien-fuer-funktionelle-leichtbauprodukte-mit-ressourcenschonung

Dr. Mirtsch GmbH (2017): Wölbstruktur – Referenzen [online]. Dr. Mirtsch Wölbstrukturierung GmbH, Berlin [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.woelbstruktur.de/referenzen.php

Eckardt, M. (2012): Noiseblocker Bionic-Loop-Lüfter im Test 2/8: Innovativ dank Mutter Natur [online]. ComputerBase [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.computerbase.de/2012-09/test-noiseblocker-bionic-loop-luefter/2/

Elkmann, N. (2017): Roboter – sichere Helfer des Menschen. Bionischer Roboterarm [online]. Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/brommi.html

Eschmann Textures (2017): Naturstrukturen [online]. Eschmann Textures International GmbH, Gummersbach, 2017 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.eschmanntextures.de/designbeispiele/natur/

EvoLogics (2017): S2C R 42/65 Underwater Acoustic Modem [online]. EvoLogics GmbH, Berlin [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cr_42_65.html

Festo (2017a): Bionic Learning Network – Neue Impulse für die Fabrik- und Prozessautomation [online]. Festo Vertrieb GmbH & Co. KG, Esslingen, [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.festo-didactic.com/de-de/

Festo (2017b): Willkommen bei Festo Didactic [online]. Festo Vertrieb GmbH & Co. KG, Esslingen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.festo.com/group/de/cms/10156.htm

Festo (2017c): DualWingGenerator – Energiegewinnung mit dem Flügel-schlagprinzip [online]. Festo Vertrieb GmbH & Co. KG, Esslingen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.festo.com/group/de/cms/10222.htm

Finus, F. (2016): Genial abgeschaut [online]. blechnet 2016-4, S. 14 – 18, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.blechnet.com/genial-abgeschaut-a-547582/

Flugrevue (2014): Technische Innovationen aus der Natur – Airbus setzt auf bionische Projekte [online]. Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, 19. Nov. 2014 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.flugrevue.de/flugzeugbau/systeme/airbus-setzt-auf-bionische-projekte/600194

Fraunhofer IAO (2017a): „BioPat“: Suchwerkzeug im Ideenreservoir der Natur [online]. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.iao.fraunhofer.de/lang-de/ueber-uns/presse-und-medien/336-biopat.html

Fraunhofer IAO (2017b): Bionikpotenzialanalyse. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart, auch verfügbar als PDF unter: www.iao.fraunhofer.de/images/produktblaetter/bionikpotenzialanalyse.pdf

Fraunhofer IPA (2015): Fassadenfarbe nach dem Vorbild des Nebeltrinker-Käfers. Sto SE & Co. KGaA gewinnt „DIE OBERFLÄCHE 2015“ [online]. Presseinformation des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart, Jul. 2015 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.ipa.fraunhofer.de/oberflaeche_2015.html

Fraunhofer IPT (2013): Biolas.exe - Bionisch funktionalisierte Oberflächen durch Laserstrahlstrukturieren. Presseinformation des Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie, Aachen, Januar 2014, auch verfügbar als PDF unter: www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Produktbl%C3%A4tter/504_wds_13.pdf

Fraunhofer ISE (2017a): Wärmeverteilung in einer FracTherm®-Struktur [online]. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Karlsruhe [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/solarthermie/thermische-kollektoren-und-komponenten/waermeuebertrager-und-kollektorentwicklung.html

Fraunhofer ISE (2017b): Kühlung von Formwerkzeugen durch bionische Methoden – Bionische Werkzeugtemperierung [online]. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Karlsruhe [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/bionische-werkzeugtemperierung.html

Fraunhofer UMSICHT (2017): Rodentics - Cutting an Milling [online]. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Oberhausen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.rodentics.de/info.html

FRIMO (2017): Der Street Shark[online]. FRIMO Group GmbH, Lotte, 2017 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.street-shark.com/de/

Gäbler, J.; Kusumah, I. und Pleger, S. (2007): Selbstschärfende Rodentics-Zerspanungswerkzeuge. wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 97, H. 6, S. 425 - 426, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, auch verfügbar als PDF unter: www.springer-vdi-verlag.de/library/common/425.pdf

Granitza, E. (2013): Textilforschung – Wasser aus dem Nebel der Wüste [online]. Stuttgarter-Zeitung.de, Stuttgarter Zeitung Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.textilforschung-wasser-aus-dem-nebel-der-wueste.a177896b-c0b6-45ed-ba4f-94f36d8c4863.html

Haller, S. (2013): Gestaltfindung – Untersuchungen zur Kraftkegelmethode. Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Materialien, Band 27. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), KIT Scientific, Publishing ISBN 978-3-7315-0050-6.

HamburgAviation (2016): Airbus erhält Bundespreis Ecodesign für Entwicklung bionischer Trennwand [online]. HAMBURG AVIATION e. V., Hamburg, 5. Dez. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.hamburg-aviation.de/de/presse/news/article/meldung/airbus-erhaelt-bundespreis-ecodesign-fuer-entwicklung-bionischer-trennwand.html

Hamm, C. E.; Merkel, R.; Springer, O.; Jurkojc, P.; Maier, C.; Prechtel, K. und Smetacek, V. (2003): Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection. *Nature* **421**(6925), S. 841 – 843.

Handelsblatt (2016): Additive Fertigung – 3D-Druck erreicht den Maschinenbau [online]. Handelsblatt GmbH, Düsseldorf [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/additive-fertigung-3d-druck-erreicht-den-maschinenbau/12932564.html

Hellio, C.; Marechal, J.-P.; Véron, B.; Bremer, G.; Clare, A. S. und Le Gal, Y. (2004): Seasonal variation of antifouling activities of marine algae from the Brittany Coast (France). *Marine Biotechnology*, **6**(1), S. 67 – 82, DOI: 10.1007/s10126-003-0020-x.

Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M. und Mekonnen, M. M. (2011): The Water Footprint Assessment Manual - Setting the global standard. Water Footprint Network, Earthscan Publisher, London, Washington, auch verfügbar als PDF unter: www.waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf

International Organization for Standardization (2017): ISO/TC 266 Bionimetics [online]. International Organization for Standardization, Genf, Schweiz [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.iso.org/iso/standards_development/technical_committees/other_bodies/iso_technical_committee.htm?commid=652577

ITV (2013): Entwicklung innovativer textiler Werkstoffe zur Trinkwassergewinnung aus Nebel. Abschlussbericht, BMBF-Forschungsprojekt, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV) Denkendorf, auch verfügbar als PDF unter: www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/02WT0905-908_-_Abschlussbericht.pdf

Jadewelt (2016): Effizient wie ein Hai auf der Jagd - Strömungsmechanisches Forschungsprojekt bewilligt [online]. Jadewelt - Online-Magazin der Jade Hochschule Wilhelmshaven Oldenburg Elsfleth, 3. Nov. 2016, [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.jade-hs.de/jadewelt/forschung/detailseite/article/effizient-wie-ein-hai-auf-der-jagd-stroemungsmechanisches-forschungsprojekt-bewilligt/

Jessel, B.; Tschimpke, O. und Walser, M. (2009): Produktivkraft Natur. Hoffmann und Campe, Hamburg, ISBN: 978-3455501407.

Kaiser, O. S. und Seitz, H. (2014): Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (Hrsg.), Berlin, Aug. 2014, Kurzanalyse Nr. 9, auch verfügbar als PDF unter: www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-VDI-ZRE-09-Ressourceneffizienz-Windenergieanlagen.pdf

Kaiser, O. S.; Krauss, O.; Seitz, H. und Kirmes, S. (2016): Ressourceneffizienz im Leichtbau. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (Hrsg.), Berlin, Nov. 2016, Kurzanalyse Nr. 17, auch verfügbar als PDF unter: www.ressourcendeutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/Kurzanalyse_17_Ressourceneffizienz_im_Leichtbau.pdf

Kamada, A.; Mittal, N.; Söderberg, L. D.; Ingverud, T.; Ohm, W.; Roth, S. V.; Lundell, F. und Lendel, C. (2017): Flow-assisted assembly of nanostructured protein microfibers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 114(6), S. 1232 - 1237, DOI: 10.1073/pnas.1617260114.

Karlsruher Institut für Technologie (2016): „Flower Power“: Photovoltaik nach dem Vorbild der Rose [online]. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Presseinformation 097/2016 vom 22. Juni 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.kit.edu/kit/pi_2016_097_flower-power-photovoltaik-nach-dem-vorbild-der-rose.php

Kesel, A. und Liedert, R. (2017): Patentveröffentlichung Antifouling coating. EP1981659 (B1) [online]. Europäisches Patentamt, Espacenet Patent search, 25. Jan. 2017 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=EP&NR=1981659B1&KC=B1&FT=D#

K-Magazin (2017): Bionik in der Luft [online]. Henrich Publikationen GmbH, Gilching, 24. Febr. 2017 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.k-magazin.de/index.cfm?pid=1630&pk=171432#.WLA4eXrK6QP

Kopfmüller, J.; Brandl, V.; Jörissen, J.; Paetau, M.; Banse, G.; Coenen, R. und Grunwald, A. (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. In: Global zukunftsfähige Entwicklung - Perspektiven für Deutschland, Bd. 1, Edition Sigma, Berlin, ISBN 3-89404-571-X.

K-Zeitung online (2014): Street Shark mit JEC Innovation Award ausgezeichnet [online]. [abgerufen am: 20. April 2017], Giesel Verlag GmbH, Hannover, 18. Aug. 2014, verfügbar unter: www.k-zeitung.de/street-shark-mit-jec-innovation-award-ausgezeichnet/150/1085/81045

Lange, U. und Oberender, C. (2017): Ressourceneffizienz durch Strategien in der Produktentwicklung. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (Hrsg.), Berlin, Sept. 2017, Kurzanalyse Nr. 19.

Lienhard, J.; Schleicher, S.; Poppinga, S.; Masselter, T.; Milwich, M.; Speck, T. und Knippers J. (2011): Flectofin: a hingeless flapping mechanism inspired by nature. *Bioinspiration & Biomimetics*, 6(4), S. 045001, DOI: 10.1088/1748-3182/6/4/045001.

Lübbe, K. und Belzer, S. (2015): Kompetenzatlas Bionik in Hessen. Hessen Trade & Invest GmbH (Hrsg.), Wiesbaden, 2. Auflage, auch verfügbar als PDF unter: www.hessen-nanotech.de/mm/mm001/Bionik_Atlas_de_web.pdf

Luther, W.; Beismann, H. und Seitz, H. (2011): Nanotechnologie in der Natur – Bionik im Betrieb. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Band 20 der Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech, Aug. 2011, auch verfügbar als PDF unter: www.hessen-nanotech.de/mm/mm001/NanoBionik_web.pdf

MaschinenMarkt (2017): Wenden von Lasten wie aus dem Handgelenk [online]. Vogel Business Media GmbH & Co.KG, Würzburg [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.maschinenmarkt.vogel.de/wenden-von-lasten-wie-aus-dem-handgelenk-a-564404/

Mattheck, C. (2006): Verborgene Gestaltgesetze der Natur – Optimalformen ohne Computer. 1. Auflage, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, ISBN 978-3-923704-53-8.

Mattheck, C. (2010): Denkwerkzeuge nach der Natur. 1. Auflage, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, ISBN 978-3923704736.

Mattheck, C. (2017): Die Körpersprache der Bauteile: Enzyklopädie der Formfindung nach der Natur. 1. Auflage, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, ISBN 978-3923704910.

MTI-engAge (2016): Sozio-technische Interaktion von Mensch und Roboter im Kontext des demographischen Wandels [online]. Technische Universität Berlin [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.mti-engage.tu-berlin.de

Nachtigall, W. und Wisser, A. (2013): Bionik in Beispielen: 250 illustrierte Ansätze. Springer Spektrum Verlag 20. Feb. 2013, 326 Seiten, ISBN 978-3642347665.

Naturefund (2017): Milliarden Menschen fehlt sauberes Wasser [online]. Naturefund e. V. Wiesbaden [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.naturefund.de/erde/atlas_des_klimas/ursachen/milliarden_menschen_fehlt_sauberes_wasser.html

Neubert, H.-J. (2010): Bionik - Haifischhaut gegen faulende Schiffe [online]. ZEIT ONLINE GmbH, 11. Jan. 2010 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.zeit.de/wissen/2009-12/haihaut-antifouling

Pfeifer (2017): Dreh-Wendetisch AXXO [online]. PFEIFER Holding GmbH & Co. KG, Memmingen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.pfeifer.info/de/produkte-leistungen/Produkte/Lastaufnahmemittel-und-Wendegeraete/Wendegeraete/Dreh-Wendetisch-AXXO.html

Phys.org (2016): Owl-inspired wing design reduces wind turbine noise by 10 decibels [online]. Phys.org, 16. Nov. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.phys.org/news/2016-11-owl-inspired-wing-turbine-noise-decibels.html

Pirk, C. W. W.; Hepburn, H. R.; Radloff, S. E. und Tautz, J. (2004): Honeybee combs: construction through a liquid equilibrium process? *Naturwissenschaften*, **91**(7), S. 350 – 353.

Pluta, W. (2014): Windenergie – Strom erzeugen mit Flügelschlag [online]. Golem Media GmbH, 11. April 2014 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.golem.de/news/windenergie-strom-erzeugen-mit-fluegelschlag-1404-105812.html

Pöppe, C. (2017): Robotik – Künstliche Weichtiere. *Spektrum der Wissenschaft*, 2017/1, S. 22 – 24.

Poppinga, S. und Speck, T. (2016): 3D-gedruckte, bewegliche Strukturen inspiriert von langsamen und schnellen Pflanzenbewegungen. In: *Patente aus der Natur*, Tagungsunterlagen 8. Bremer Bionik-Kongress 21. – 22. Okt. 2016. Bionik-Innovations-Centrum Bremen (Hrsg.).

Pumacy Technologies AG (2017a): Bionik nutzen für nachhaltigen Unternehmenserfolg [online]. Pumacy Technologies AG, Bernburg [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.pumacy.de/innovationsmanagement/bionik

Pumacy Technologies AG (2017b): Biomimetics. Adapt. Evolve. 13 things to learn from biological models. Pumacy Technologies AG, Bernburg, auch verfügbar als PDF unter: www.pumacy.de/wp-content/uploads/pr_Bionik_Pumacy.pdf

sachs engineering (2017). Leichtbau und Formverbesserung durch den Einsatz von Bionik [online]. sachs engineering GmbH, Engen [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.sachs-engineering.com/ingenieursdienstleistungen/leichtbau-und-bionik

Sachs, W. (2016): Engineering made by nature. Ausrüster, Komponenten, Zulieferer aus Baden-Württemberg e. V., Offenburg, 28. Jan. 2016, auch verfügbar als PDF unter: www.akz-online.de/wp-content/uploads/2015/04/Exzellente_Unternehmen_sachs_engineering_Üersand.pdf

Sander, P. und Hollermann, M. (2014): Bionik bei Airbus – Inspiration für den Flugzeugbau. Konstruktion 09-2014, Springer-VDI-Verlag.

Scheibel, T. (2009): Spinnenseide – was Spiderman wissen sollte. BIOspektrum, Jan 2009, S. 23 – 25.

Schindlbeck, C. (2013): Leise wie ein Eulenflügel [online]. smarter-world.de, 04 Nov. 2013 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.smarterworld.de/smart-energy/sonstige/artikel/102587/

Schmidt, F. (2012): Eulenflügel als Vorbild für leisere Flugzeuge [online]. Deutsche Welle, Bonn, 7. April 2012 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.dw.com/de/eulenfl%C3%BCgel-als-vorbild-f%C3%BCr-leisere-flugzeuge/a-15860994

Seitz, H. (2013): Bionik: Evolution – Natur – Technik. Dossier. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.

Siteco (2016): Hexal® LED [online]. Siteco Beleuchtungstechnik GmbH [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.siteco.de/de/de_de/produkte/katalog-innenleuchten/chapter/175/category/15069/family/14919.html

Speck, T. und Erb, R. (2011): Prozessketten in Natur und Wirtschaft. In: Otto, K.-S. und Speck, T. (Hrsg.): Darwin meets Business – Evolutionäre und bionische Lösungen für die Wirtschaft, Gabler Verlag Wiesbaden, ISBN 987-3-8349-2443-8.

Speck, T.; Speck, O.; Neinhuis, C. und Bargel, H. (2012): Bionik – Faszinierende Lösungen für die Natur für die Technik der Zukunft. Freiburg: Lavori Verlag, 2012, ISBN: 978-3-935737-21-0

SpiegelOnline (2005): Tsunami-Warnsystem – Delphin-Modem erreicht Analog-Geschwindigkeit [online]. SPIEGELnet GmbH, Hamburg, 21. Jul. 2005 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.spiegel.de/wissenschaft/natur/tsunami-warnsystem-delphin-modem-erreicht-analog-geschwindigkeit-a-366190.html

Sto (2016): Technisches Merkblatt StoColor Dryonic. Sto Ges. m.b.H., Villach, 8. Nov. 2016, auch verfügbar als PDF unter: http://www.sto.de/webdocs/0000/SDB/T_09548-001_0101_DE_08_00.PDF

Stocker, F. (2016): Der Buckelwal als Vorbild [online]. Maschinenmarkt - Das Industrieportal, 12. April 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/betriebstechnik/articles/529328/

THB (2009): Umweltbelastung durch Schiffe steigt. Täglicher Hafenbericht: Deutsche Schifffahrts-Zeitung, DVV Media Group GmbH, Hamburg, 27. Februar 2009.

Umweltbundesamt (2016): Ökodesign-Richtlinie [online]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt, 19. Aug. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaftskonsum/produkte/oekodesign/oekodesign-richtlinie

Universität Stuttgart (2012): Entwicklung der Uni Stuttgart auf der EXPO 2012 in Yeosu, Südkorea[online]. Presseinformation Nr. 28 vom 14. Mai 2012. [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.uni-stuttgart.de/hkom/presseservice/pressemitteilungen/2012/028_expo.html?__locale=de

VDI (2013): Positionspapier „Zukunft der Bionik: Interdisziplinäre Forschung stärken und Innovationspotenziale nutzen“. Verein Deutscher Ingenieure, auch verfügbar als PDF unter: https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/news_bilder/News_Bionik/Broschue_re_TLS_Positionspapier_Zukunft_der_Bionik_06.pdf

VDI 2221:1993-05: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4600:2012-01: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 1:2016-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4800 Blatt 2:2016-03 (Entwurf): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 4801:2016-02 (Entwurf): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Ressourceneffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - Strategien und Vorgehensweisen zum effizienten Einsatz natürlicher Ressourcen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6220 Blatt 1:2012-12: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Konzeption und Strategie - Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6221 Blatt 1:2013-09: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Funktionale bionische Oberflächen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6222 Blatt 1:2013-11: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Bionische Roboter. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6223 Blatt 1:2013-06: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6224 Blatt 1:2012-06: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionische Optimierung - Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6224 Blatt 2:2012-08: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionische Optimierung - Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturell-mechanischen Optimierung technischer Bauteile. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6224 Blatt 3:2016-04 (Entwurf): Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6225 Blatt 1:2012-09: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Bionische Informationsverarbeitung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI 6226 Blatt 1:2015-02: Verein Deutscher Ingenieure e. V., Bionik - Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign - Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (2016): Bionische Wölbstrukturen - Die Natur als Vorbild für Ressourceneffizienz [online]. VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Berlin, 16. Dez. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.ressource-deutschland.tv/themen/metallverarbeitung/bionische-woelbstrukturen-die-natur-als-vorbild-fuer-ressourceneffizienz/

von Gleich, A. (2006): Möglichkeiten und Grenzen einer leitbildorientierten Technikgestaltung - Bionik: Vorbild Natur. Ökologisches Wirtschaften, 1/2006, S. 45 - 60.

von Gleich, A.; Pade, C.; Petschow, U. und Pissarski, E. (2007): Bionik: Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale. BMBF, auch verfügbar als PDF unter: www.ioew.de/uploads/tx_ukioewdb/Bionik_Aktuelle_Trends_und_zuk%C3%BCnftige_Potenziale.pdf

Wissner, C. (2010): Beiträge zum Fail Safe Design. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.

Wolfangel, E. (2016): Bionik - „Wir haben den Vogelflug entschlüsselt“ [online]. Stuttgarter Nachrichten, 11. Okt. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.bionik-wir-haben-den-vogelflug-entschluesselt.8c35710b-dfe3-477a-b571-a2273d7c16b6.html

Ziehl-Abegg (2016): Bionische Profilierung setzt neue Bestmarken [online]. Ziehl-Abegg SE, 25. Feb. 2016 [abgerufen am: 20. April 2017], verfügbar unter: www.ziehl-abegg.com/de/de/details-news/news/bionische-profilierung-setzt-neue-bestmarken/

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin
Tel. +49 30 2759506-0
Fax +49 30 2759506-30
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE