

DIN ISO 18457

ICS 07.080

**Bionik –
Bionische Werkstoffe, Strukturen und Bestandteile (ISO 18457:2016)**

Biomimetics –

Biomimetic materials, structures and components (ISO 18457:2016)

Biomimétisme –

Matériaux, structures et composants biomimétiques (ISO 18457:2016)

Gesamtumfang 44 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	3
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	3
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Abkürzungen.....	8
5 Biologische Werkstoffe.....	9
5.1 Merkmale.....	9
5.1.1 Allgemeines	9
5.1.2 Biologische Werkstoffe: multifunktional, fehlertolerant, modular und adaptiv.....	10
5.1.3 Technische Bauteile: monofunktional, langlebig und nur beschränkt anpassungsfähig	11
5.2 Leistungsvermögen.....	11
6 Methodik der bionischen Werkstoff- und Bauteilentwicklung.....	20
6.1 Analyse	20
6.2 Analogiebetrachtung.....	21
6.3 Abstraktion	23
6.3.1 Allgemeines	23
6.3.2 Modellierung und Simulation	23
6.4 Werkstoffauswahl	24
7 Gründe und Gelegenheiten für die Nutzung von bionischen Werkstoffen, Strukturen und Bauteilen in Unternehmen.....	25
Anhang A (informativ) Beispiele für bionische Werkstoffe, Strukturen und Bauteile.....	26
Anhang B (informativ) Analysenverfahren.....	37
Literaturhinweise.....	43

Nationales Vorwort

Dieses Dokument enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 18457:2016, die vom Technischen Komitee ISO/TC 266 „Biomimetics“ erarbeitet wurde, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-08-60 AA „Bionik“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Als Grundlage für ISO 18457 diente die Richtlinie VDI 6223 Blatt 1. Die Erstellung der ISO 18457 erfolgte im Rahmen des Förderprojekts ISOBIONIK 01FS10008. In den Richtlinien VDI 6220 bis VDI 6226 zur Bionik werden derzeit relevante Themen zur Bionik behandelt. Die drei Richtlinien VDI 6220 Blatt 1, VDI 6223 Blatt 1 und VDI 6224 Blatt 2 (ersatzlos zurückgezogen 2017-04) haben besondere Relevanz für die Definitionen und Begriffsfestlegungen im Bereich Bionik sowie für industrielle Anwendungen und dienen daher im Rahmen des Förderprojekts ISOBIONIK 01FS10008 als Grundlage für die Erstellung der Internationalen Normen ISO 18457, ISO 18458 und ISO 18459.

Für die in diesem Dokument zitierten internationalen Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 18458 siehe DIN ISO 18458

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 18458, *Bionik — Terminologie, Konzepte und Methodik*

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung von Nationalen Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird normalerweise von ISO Technischen Komitees durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale Organisationen, staatlich und nicht-staatlich, in Liaison mit ISO, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) bei allen elektrotechnischen Themen zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Im Besonderen sollten die für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten notwendigen Annahmekriterien beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der empfangenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname wird als Information zum Nutzen der Anwender angegeben und stellt keine Anerkennung dar.

Eine Erläuterung der Bedeutung ISO-spezifischer Benennungen und Ausdrücke, die sich auf Konformitätsbewertung beziehen, sowie Informationen über die Beachtung der Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) zu technischen Handelshemmnissen (TBT, en: Technical Barriers to Trade) durch ISO enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Das für dieses Dokument verantwortliche Komitee ist ISO/TC 266, *Biomimetics*.

Einleitung

Die steigende Komplexität technischer Lösungen und Produkte erfordert neue Herangehensweisen. Insbesondere bei der Entwicklung und Optimierung von Werkstoffen, Strukturen und Bauteilen stoßen klassische Forschungs- und Entwicklungsverfahren und Innovationsansätze häufig an ihre Grenzen. Die Identifikation geeigneter biologischer Prinzipien und ihre Übertragung auf technische Anwendungen im Sinne der Bionik können daher einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von funktionalen, adaptiven, effizienten (in Bezug auf Ressourcen) und sicheren (in Bezug auf die Human- und Umwelttoxizität) Werkstoffen, Strukturen, Bauteilen und Fertigungstechniken leisten.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm stellt ein Rahmenwerk der Bionik für die Entwicklung von Werkstoffen, Strukturen, Oberflächen, Bauteilen und Fertigungstechnologien zur Verfügung.

Diese Internationale Norm legt die Prinzipien biologischer Systeme fest, insbesondere das Leistungsverhalten biologischer Werkstoffe, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien, die die Motivation und Begründung für bionische Ansätze liefern. Sie legt die Methodik auf der Grundlage der Analyse biologischer Systeme fest, die zu Analogien und Abstraktionen führt. Der Übertragungsprozess von der Biologie in die Technik wird auf der Grundlage von Beispielen bionischer Werkstoffe, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien beschrieben. In dieser Internationalen Norm sind Messverfahren und Parameter zur Charakterisierung von Eigenschaften bionischer Werkstoffe beschrieben. Diese Internationale Norm stellt Informationen zur Relevanz bionischer Werkstoffe, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien für die Industrie bereit.

Diese Internationale Norm stellt auch Verbindungen zu andern Teilbereichen der Bionik her, da grundlegende Entwicklungen bei Werkstoffen, Strukturen, Oberflächen, Bauteilen und Fertigungstechnologien häufig die Grundlage für vielfältige weitere Neuerungen bilden. Sie stellt eine Anleitung und Unterstützung für alle dar, die bionische Werkstoffe, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien entwickeln, konstruieren, verarbeiten oder anwenden. Diese Internationale Norm kann auch für diejenigen nützlich sein, die etwas über diese Themen lernen und sich damit beschäftigen möchten.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 18458, *Biomimetics — Terminology, concepts and methodology*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 18458 und die folgenden Begriffe.

3.1 Adaptivität

Anpassungsfähigkeit an variable Umweltbedingungen

3.2 Effizienz

Verhältnis zwischen den nutzbaren Outputs und allen Inputs eines Systems

3.3 generatives Fertigungsverfahren

Fertigungsverfahren, bei dem dreidimensionale Bauteile zum Beispiel durch schichtweises Aneinanderfügen von Werkstoffen erstellt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Technologien können für vier verschiedene Fertigungsebenen genutzt werden:

- Konzeptmodell (additive Fertigung): Diese Modelle sind nicht mechanisch belastbar und dienen allein der dreidimensionalen Anschauung.
- Funktionsmodelle (additive Fertigung): Diese Modelle haben ähnliche Eigenschaften wie die in der späteren Serienfertigung hergestellten Bauteile.
- Werkzeuge (schnelle Werkzeugherstellung): Es werden Werkzeuge erzeugt, die mit anderen Fertigungsverfahren kombiniert werden können.
- Kleinserien (schnelle Fertigung): Die gefertigten Geometrien entsprechen in ihren Eigenschaften den im Einsatz gewünschten.

3.4**Gradientenübergang
gradueller Übergang**

richtungsabhängige stetige Veränderung einer chemischen, physikalischen oder mechanischen Eigenschaft

Anmerkung 1 zum Begriff: Biologische Werkstoffe zeichnen sich häufig durch graduelle Übergänge hinsichtlich ihrer physikalischen und mechanischen Eigenschaften aus, die unter anderem durch Strukturveränderungen auf verschiedenen hierarchischen Ebenen erreicht werden.

3.5**Kompatibilität**

Recyclingfähigkeit und Anpassbarkeit eines Materialflusses oder einer Technologie in der Umwelt

3.6**Modularität**

Zusammensetzung eines Gesamtsystems aus einzelnen Modulen

3.7**Multifunktionalität**

Struktur und Eigenschaften eines Werkstoffs und Bauteils, die die Erfüllung mehrerer für den Organismus notwendiger bzw. technisch angestrebter Funktionen auf einem hohen und ausbalancierten Niveau ermöglichen

3.8**Redundanz**

Vorhandensein funktionell vergleichbarer Systeme, wobei ein einziges der Systeme zur Aufrechterhaltung der entsprechenden Funktion genügt (Multiplizität von Systemen)

3.9**Resilienz****Fehlertoleranz**

Toleranz eines Systems gegenüber Störungen oder Vermögen, nach einer Belastung die Funktionalität wiederherzustellen

3.10**Selbst-X-Eigenschaft**

in einem Material oder auf einer Oberfläche vorhandene Eigenschaft und Informationen, die Prozesse autonom ablaufen lassen, ohne eine spezielle Steuerung zu erfordern

Anmerkung 1 zum Begriff: Selbst-X-Eigenschaften sind bei biologischen Materialien und Oberflächen weit verbreitet und von großem Interesse für eine Übertragung auf technische Produkte. Beispiele sind Selbstorganisation, Selbstanordnung, Selbstreparatur, Selbstheilung, Selbstreinigung und Selbstschärfung.

3.11**Stereoregularität****Taktizität**

bestimmte geometrische Regelmäßigkeit im molekularen Aufbau von Polymerketten

Anmerkung 1 zum Begriff: Makromolekulare Werkstoffe mit identischer chemischer Zusammensetzung können sich aufgrund unterschiedlicher räumlicher Anordnung ihrer Atome und Atomgruppen deutlich in den mechanischen Eigenschaften unterscheiden. In der chemischen Produktionstechnik wird die molekulare Geometrie der Polymerketten während der Polymerisation durch die gewählte Reaktionstemperatur und den verwendeten Katalysator bestimmt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein klassisches Beispiel aus der Natur ist das Polyisopren, das sowohl elastisch (Naturkautschuk) als auch hart (Balata, Guttapercha) sein kann.

4 Abkürzungen

AES	Augerelektronenspektroskopie (en: Auger Electron Spectroscopy)
AFM	Rasterkraftmikroskop (en: Atomic Force Microscope)
CT	Computertomographie (en: Computed Tomography)
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (en: Differential Scanning Calorimetry)
DTA	Differenz-Thermoanalyse (en: Differential Thermal Analysis)
GC	Gaschromatographie (en: Gas Chromatography)
GC-MS/MS	Gaschromatographie-Tandem-Massenspektrometrie (en: Gas Chromatography-tandem Mass Spectrometry)
GPC	Gelpermeationschromatographie (en: Gel Permeation Chromatography)
HPLC	Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (en: High Performance Liquid Chromatography)
IR	Infrarotspektroskopie (en: Infrared Spectroscopy)
LC-MS/MS	Flüssigkeitschromatographie-Tandem-Massenspektrometrie (en: Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry)
MALDI-MS	Massenspektrometrie mittels matrixunterstützter Laser-Desorption/Ionisation (en: Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization-Mass Spectrometry)
NMR	Kernspinresonanz (en: Nuclear Magnetic Resonance)
OM	Lichtmikroskop (en: Optical Microscope)
SEM	Rasterelektronenmikroskop (en: Scanning Electron Microscope)
SEM-EDS	Rasterelektronenmikroskopie-energiedispersive Röntgenspektroskopie (en: Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersion Spectroscopy)
SIM	Mikroskopie mit strukturierter Beleuchtung (en: Structured Illumination Microscopy)
SIMS	Sekundärionen-Massenspektrometrie (en: Secondary Ion Mass Spectrometry)
SPM	Raster-Sonden-Mikroskop (en: Scanning Probe Microscope)
TEM	Transmissionselektronenmikroskop (en: Transmission Electron Microscope)
TOF-SIMS	Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (en: Time-of-Flight Secondary Mass Spectrometry)
UVVIS	Spektroskopie im ultravioletten/sichtbaren Bereich (en: Ultra Violet Visible)
XPS	Röntgenphotoelektronenspektroskopie (en: X-ray Photoelectron Spectroscopy)
XRF	Röntgenfluoreszenzanalyse (en: X-ray Fluorescence Analysis)

5 Biologische Werkstoffe

5.1 Merkmale

5.1.1 Allgemeines

Die Begriffe „Werkstoff“ und „Struktur“ werden in der Biologie und in der Technik mit zum Teil unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Klassische technische Werkstoffe werden häufig als homogen angesehen, sodass die Annahme eines isotropen Modells für Berechnung und Fertigung sinnvoll und zulässig ist. Technische Werkstoffe hängen hinsichtlich ihrer Eigenschaften hauptsächlich von der Chemie ab, während biologische Werkstoffe von der Struktur abhängen und fast ausnahmslos Verbundwerkstoffe sind.

Aufgrund ihres hierarchischen Aufbaus von der molekularen zur makroskopischen Ebene ist in der Biologie eine eindeutige Differenzierung zwischen den Begriffen „Werkstoff“ und „Struktur“ nicht möglich. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Begriff „Werkstoff“ als Überbegriff für sämtliche biologischen Werkstoffe und ihre entsprechenden Strukturen verwendet.

Einige für bionische Umsetzungen relevante Merkmale biologischer Werkstoffe sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 — Merkmale biologischer Werkstoffe

Merkmale	Biologisches Beispiel	Erläuterungen
Eigenschaften		
Multifunktionalität	Holz: u. a. Integration von Wasserleitung, Festigkeit, Dämpfung, Speicherung	Biologische Werkstoffe sind häufig auf mehrere Kriterien optimiert und besitzen eine hohe Funktionsdichte, dabei kombinieren sie häufig sich anscheinend widersprechende Funktionen.
Hierarchie	Holz: mindestens fünf Strukturebenen, vom molekularen Aufbau der Zellwand bis zur Struktur des Baumstammes	Ein besonderes Merkmal des hierarchischen Aufbaus biologischer Werkstoffe ist, dass strukturelle oder (bio)chemische Veränderungen auf einer Ebene zu spezifischen Anpassungen auf den anderen Hierarchieebenen führen. Diese ebenenübergreifende Anpassungsfähigkeit lässt eine Vielzahl von unterschiedlichen Funktionen zu.
Fehler- und Versagenstoleranz (Resilienz und Redundanz)	Knochen: gutmütiges Bruchverhalten, Toleranz gegenüber Mikrorissen, Rissstopper	Biologische Werkstoffe können Fehler und Schädigungen in hohem Ausmaß ertragen, bevor sie global versagen.
Selbst-X	Gummibaum: Selbstreparatur Nagetierzähne: Selbstschärfung Blattoberfläche: Selbstreinigung	Biologische Werkstoffe sind in der Lage, ihre komplexen Funktionen autonom, das heißt ohne Steuerung von außen, zu erzeugen und zu erhalten.
Adaptivität	Knochen: Lastadaptivität Planzenbewegung: zum Beispiel Nastien und Tropismus	Biologische Werkstoffe können durch Formveränderungen oder Wachstums- und Umstrukturierungsprozesse auf Veränderungen der Umgebungsbedingungen reagieren.
Kompatibilität	Wände von Pflanzenzellen: bestehen fast ausschließlich aus Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff	Verfügbarkeit/biologische Abbaubarkeit der biologischen Bausteine. Die produzierten Abfallprodukte sind selten Schadstoffe. Die Abfallprodukte sind vielmehr biologisch abbaubar und recyclingfähig.

Merkmale	Biologisches Beispiel	Erläuterungen
Modularität	Organisation von Organen : Zusammensetzung mehrerer unterschiedlicher Gewebe	Wiederholung von identischen Grundeinheiten auf verschiedenen hierarchischen Ebenen
Bedarfsorientierte Lebensdauer	Baum : Laubabwurf	Wichtige Eigenschaften werden durch Erneuerungen aufrechterhalten. Einzelne Komponenten sind bezüglich ihrer Lebensdauer abgestimmt und werden erneuert.
Graduelle Übergänge	Viele biologische Materialien z. B. Pflanzenstängel (z. B. Übergang Fasern/Grundgewebe), Röhrenknochen (z. B. Übergang Corticalis/Spongiosa), Übergang Knochen/Sehne/Muskel	Vermeidung von sprunghaften Eigenschaftsübergängen zur Erhöhung von Lebensdauer und Schadenstoleranz
Herstellung		
Wachstum	viele biologische Werkstoffe sowie z. B. selbstreinigende Blattoberflächen : Selbstanordnung der genetisch kodierten Wachsmoleküle	Biologische Werkstoffe und Organismen entstehen durch genetisch kontrollierte Selbstorganisation. Die Bildung geschieht über Moleküle, Organellen, Zellen, Gewebe, Organ zum Lebewesen, das heißt durch Wachstum vom Kleinen zum Großen.
Opportunismus (Nutzung leicht verfügbarer Ressourcen)	Photosynthese : Solarenergienutzung	In der Biologie werden wenige, vorwiegend leichte Elemente, die in großer Menge vorhanden und lokal verfügbar sind, verwendet (C, H, O, N, S, Ca, P, Si).
Milde Umgebungsbedingungen	Enzyme : Katalyse bei Umgebungstemperaturen	Vollwertige stoffliche Umsetzung bei niedrigen Umgebungstemperaturen.

5.1.2 Biologische Werkstoffe: multifunktional, fehlertolerant, modular und adaptiv

Die in Tabelle 1 aufgeführten Merkmale biologischer Werkstoffe können in eigenschafts- und herstellungsbezogene Merkmale untergliedert werden. Zu den Eigenschaften biologischer Werkstoffe zählen die Multifunktionalität, die Fehler- und Versagenstoleranz, die Selbst-X-Eigenschaften, die Adaptivität und die Modularität, um nur einige zu nennen. Herstellungsbezogene Merkmale, wie z. B. das biologische Wachstum, also die genetisch kontrollierte Selbstorganisation von der Ebene des Moleküls bis zur Ebene des Lebewesens selbst, und das ressourcenorientierte Konstruieren unter milden Umgebungsbedingungen sind weitere Beispiele für die Fähigkeiten biologischer Werkstoffe. Darüber hinaus besitzen biologische Werkstoffe eine begrenzte Lebensdauer. Sie werden nach dem Tod des Organismus in der Regel vollständig abgebaut und in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt. Übertragen auf eine „Lebensdauer“ technischer Anwendungen ist auch diese Eigenschaft von Interesse und wird in bionischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten untersucht.

Baumstämme sind ein biologisches Beispiel für eine Mehrfach-Kriterien Optimierung in der Natur, in denen viele und sich teilweise widersprechende Funktionen mit hoher Zuverlässigkeit gleichzeitig ausgeführt werden. Sie kombinieren mechanische Stabilität gegen auftretende Lasten (wie z. B. ihr Eigengewicht von Baumstamm und -krone sowie Wind- und Schneelasten) mit Transportfunktionen für Wasser und Stoffwechselprodukte, Speicherfunktionen und Photosynthese [1].

Ein weiteres Merkmal von Lebewesen ist ihre Anpassungsfähigkeit an variable Umweltbedingungen (Adaptivität), die es ihnen ermöglicht zu überleben. In diesem Zusammenhang ist auch die hohe Schadenstoleranz biologischer Werkstoffe zu nennen und die Fähigkeit vieler Lebewesen, Schäden schnell und effizient zu reparieren. Selbstreparaturvermögen und Adaptivität sind Merkmale von Lebewesen, die für bionische Entwicklungen von besonderem Interesse sind [2].

5.1.3 Technische Bauteile: monofunktional, langlebig und nur beschränkt anpassungsfähig

Technische Bauteile sind in der Regel mit dem Fokus auf eine dominante Funktion entwickelt und optimiert. Sie erfüllen jedoch in technischen Systemen, z. B. Fahrzeugen, häufig viele weitere Rand- und Zwangsbedingungen, wie beschränkter Bauraum, multiple mechanische Lasten, Anbindung weiterer Bauteile, fertigungs- und fügetechnische Einschränkungen, aber auch begrenzte Entwicklungszeiten. Daraus ergeben sich häufig Kompromisslösungen oder überdimensionierte Bauteile, die nicht ideal sind. Bauteile werden häufig materialorientiert vom Großen (Werkstückrohling) zum Kleinen (Produkt) hergestellt und sind in der Regel weder adaptiv noch selbstreparierend. Die Langlebigkeit eines Bauteils über die Nutzungsdauer hinaus kann problematisch sein und die Rückführung in geökologische Stoffkreisläufe oftmals schwierig.

Während Lebewesen fortwährend funktionieren müssen, um das Überleben und den Reproduktionserfolg zu sichern, können Maschinen für Wartung, Änderung und Neukonstruktion außer Betrieb genommen werden. Es ist daher möglich, Bauteile von Maschinen schnell und zielgerichtet für eine bestimmte Funktion zu optimieren, wobei für diesen Zweck sämtliche zur Verfügung stehenden Ressourcen, Materialien und Technologien genutzt werden können (z. B. Hochtemperaturprozesse bei Metallverarbeitung und Siliciumtechnologien). Dies ermöglicht – im Vergleich zu Evolutionsprozessen – sehr schnelle Entwicklungsabläufe, wobei zum Teil alte Technologien sogar vollständig von neuen abgelöst werden (z. B. Ablösung analoger durch digitale Techniken).

Diese Unterschiede führen dazu, dass biologische Evolution und menschliche Technik auch bei vergleichbaren „Problemstellungen“ zu teilweise sehr unterschiedlichen Lösungen gelangen, obwohl sie denselben physikalischen Gesetzen unterliegen und dieselbe physische Umwelt teilen [3].

5.2 Leistungsvermögen

Die Leistungsvermögen von biologischen Systemen sind variantenreich. In Tabelle 2 sind Beispiele von 151 biologischen Systemen angeführt [4]. Die Leistungsvermögen von biologischen Systemen werden in acht Kategorien unterteilt:

- a) Werkstoffe;
- b) Prozess;
- c) Selbst-X;
- d) Sensoren;
- e) Hydrodynamik;
- f) Energieeinsparung/Ressourcenschonung;
- g) Anpassungsfähigkeit an die Umwelt;
- h) Verhalten/Ökologie.

Die Kategorien enthalten 56 Arten von konkreten Beispielen. In Tabelle 2 sind 43 erwartete Anwendungsgebiete zusammengefasst, um einen Überblick über die Leistungsfähigkeit von biologischen Systemen zu erhalten. Insbesondere die Schnittstellen von biologischen Systemen zeigen besonders interessante Eigenschaften auf, die über ein großes Potential in Bezug auf neue technologische Entwicklungen verfügen; Beispiele sind Optik, Antireflexion, Benetzbarkeit, Adhäsion, Strömungsdynamik, Oberflächenspannung, Selbstorganisation, Selbstreinigung, Auftrieb, Strömungswiderstand, Reibungskontrolle.

Einige Beispiele für bionische Produkte werden im Anhang A vorgestellt.

Tabelle 2 — Leistungen von biologischen Systemen und mögliche Anwendungen in verschiedenen Kategorien

Nr.	Leistungsvermögen	Biologisches Beispiel	Mögliche Anwendungsbereiche
a) Materialien			
1	Antireflexion, Strukturfarbe, Photonik	Morphofalter (siehe A.9), Mottenaugen (siehe A.10), <i>Chrysptera cyanea</i> (Saphir-Demoiselle), Maranta (Pfeilwurz), Fischeschuppen (siehe A.4)	Flüssigkristall, Dekoration, Elektronik, funktionelle Schicht, Kosmetik
2	Lumineszenz	Glühwürmchen, Kalmar, Qualle	Automobil, elektrische Haushaltsgeräte, Dekoration
3	Leichtbaustruktur	Bambus, Pflanzenhalm, Winterschachtelhalm (siehe A.6), Kofferschiff, Kieselalge, Knochen	Architektur, Automobil, Strukturwerkstoff
4	Benetzbarkeit	Lotus (siehe A.12), Landschnecke, Schmetterlingsflügel, Zikadenflügel, Rose, Namibischer Wüstenkäfer, Kannenpflanze	Textur, Beschichtungsstoff, Architektur, Automobil, Glas, Wassersammlung und -speicherung, (Schiffahrtsindustrie)
5	Mechanische Eigenschaften	Abalone (siehe A.3), Knochen, Baum, Bambus, Spinnenseide	Textur, Architektur, Medizin, Sportindustrie
6a	Dynamik eines bistabilen Systems	Venusfliegenfalle	Schaltstrukturen
6b	Biegedrillknicken	Strelitzien	Architektur
7	Adhäsion und Befestigung	Miesmuschel, Gecko (siehe A.11), Blattkäfer, Landschnecke, Samen der Klette, Saugnäpfe von Kraken, Seeigel, Schleimpilze	Architektur, Medizin, Fertigung
8	Strömungsdynamik	Haifischhaut, Delfin, Roter Thun, Pinguin, Vogel, Libelle, Ahornsamen	Luftfahrzeug, Schiff, elektrische Haushaltsgeräte, Beschichtungsstoffe, Sportindustrie
9	Elektrische Eigenschaften/Isolator, Stromerzeugung	Zitteraal, getrocknete Schalen, getrocknete Bäume	Keramikindustrie, Elektroindustrie
10	Stoßabsorption	Pampelmuse, Cashew(nuss), Gelenk, Nashornkäfer	Automobil, Medizin, Rüstungsindustrie
11	Bio-Matrize	Tabakmosaik-Virus, DNA, Schmetterlingsflügel, Spirulina	Elektronik, Halbleiterindustrie
12	Röhrchenstruktur	Stechmücke, Schmetterling, Werftschabe	Medizin
13	Oberflächenspannung	Taumelkäfer, Rückenschwimmer	Beschichtungsstoffe
14	unidirektional	Schlangenmaul, Regenwurm, Biene, Kannenpflanze	Maschinenteile

Nr.	Leistungsvermögen	Biologisches Beispiel	Mögliche Anwendungsbereiche
b) Prozess			
15	Biomaterial	Schalen, Zähne, Knochen, Kieselalge	Medizin, Dekoration, Keramikindustrie
16	Photosynthese	Pflanze	Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie
17	Organische Synthese	Spinnenseide, Miesmuschel, Pflanzenwachs, Kiefernharz, Kautschukbaum, Ligamente von Heuschrecken (siehe A.2)	Medizin, chemische Industrie
18	Verarbeitung	Schiffsbohrwurm	Bauingenieurwesen
19	Stoffwechsel	Abbau von Cellulose, Seide, Aminosäurefermentation, alkoholische Gärung, Entomophagie, Viehzucht	Lebensmittelindustrie, Energiewirtschaft, Kunststoffindustrie
20	Mikronebel	Bombardierkäfer	Maschinenteile, Verbrennungsmotor, Beschichtungsstoffe
21	Abtrennung	Laubfall	Herstellung
22	Streuung	Mohn	elektrische Haushaltsgeräte
c) Selbst-X			
23	Selbstorganisation	Organismus	Medizin, Elektronik, Folien
24	Selbstheilung, Selbstreparatur	Haut, Knochen, Zähne, Eidechse, Pflanzenblätter, Haifischzähne, Planarie	Medizin, Beschichtungsstoffe, Automobil, Elektronik, elektrische Haushaltsgeräte
25	Selbstanordnung	Zellmembran	Medizin, Beschichtung
26	Selbstreinigung	Lotusblatt, Landschnecke, Schmetterlingsflügel, Zikadenflügel	Architektur, Automobil, Beschichtungsstoffe
27	Selbstschärfung	Zähne von Nagetieren (siehe A.5)	Werkzeuge
d) Sensor			
28	Okulares Sehen/sichtbares Licht, Infrarot, spezifische Wellenlänge	Augen, Facettenaugen, Photorezeptoren im Dornenkronen-Seestern, Ambulakralfüßchen vom Seeigel, Käfer <i>Melanophila</i> , Kohlweißling	Sensor, Architektur, elektrische Haushaltsgeräte, Automobil, Luftfahrzeug
29	Geruchssinn	Ameise, Hund, Insekt, Tiefsee-Fisch	Sensor, elektrische Haushaltsgeräte, Automobil
30	Tastsinn, Mechanorezeptor	Tasthaare von Katzen, Schwerkräftensoren von Pflanzen	Sensor, elektrische Haushaltsgeräte, Automobil
31	Chemosensorik	Ameise, Fliege, Biene	Sensor, Lebensmittelindustrie
32	Hörsinn/Ultraschallwellen, niedrige Frequenz	Fledermäuse, Bockkäfer, Delfin, Gecko	Luftfahrzeug, Sensor, Landwirtschaft (Schädlingsbekämpfung)
33	Magnetsensor	Zugvogel, Meeresschildkröten, Taube, Languste, Haifisch, Honigbiene	Luftfahrzeug, Sensor, Schiff
34	Kraftsensor	Grille	Sensor, elektrische Haushaltsgeräte

Nr.	Leistungsvermögen	Biologisches Beispiel	Mögliche Anwendungsbereiche
e) Hydrodynamik			
35	Rückstoß-Auftrieb	Nautilus, Tintenfisch, Qualle	Schiff
36	Auftrieb	Vogelflügel, Libelle	Luftfahrzeug, Energieerzeugung
37	Antriebskraft	Qualle, <i>Paramecium</i> (Pantoffeltierchen)	Roboterindustrie
38	Strömungswiderstand	Haifischhaut, Delfin, Roter Thun, Pinguin, Eisvogel, Koffersch, Flügel von Eulen, Aal	Schiff, Sportindustrie, Automobil, Luftfahrzeug
f) Energieeinsparung, Ressourcenschonung			
39	Reibungskontrolle	Schlange, Sandskink, Gelenk	Maschinenteile, Roboterindustrie, Automobil, Medizin, Sozialfürsorge
40	Temperaturregelung	Schatten von Bäumen, Eisbär, Schwan, Stink(tier)kohl, Zebra, Ameisenhaufen, Schweiß von Säugetieren, Transpiration	Architektur, Textur, Automobil
41	Feuchteregelung	Ameisenhaufen	Architektur
42	Zirkulierend (Nachhaltigkeit)/Anpassungsfähigkeit in Bezug auf Recycling, Abbaubarkeit	Nahrungsnetz, Laubfall, Pilze, Termiten	Energiewirtschaft, Landwirtschaft
g) Anpassungsfähigkeit an die Umwelt			
43	Austrocknungstoleranz	Spaltöffnungen von Pflanzen, Zuckmücke, Kaktus	Medizin, Textur
44	Kälteresistenz	Eisbär, Fisch <i>Trematomus</i> , Käfer <i>Tenebrio</i> , Rentier	Medizin, Lebensmittelindustrie, Batterie
45	Säure- oder alkalitolerant	<i>Helicobacter pylori</i> , Mikroorganismen in submarinen Vulkanen, Bakterien in heißen Quellen/Alkaliphile	Brennstoffzelle
46	Toleranz gegenüber hohen Temperaturen	Mikroorganismen in submarinen hydrothermalen Mehrmetallerzen	
47	Nutzung hoher Temperaturen	<i>Eucalyptus</i> , <i>Banksia</i> , Käfer <i>Melanophila</i>	Sensor
48	UV-Beständigkeit	Edelweiß	Kosmetik
h) Verhalten, Ökologie			
49	Mimikry/Färbung, Form, chemische Tarnung	Krake, Plattfisch, Kalmar, Chamäleon, Insekten wie Gespenstschrecken, Seepferdchen, Fanghaft, Schmetterling <i>Kallima</i> , Termiteneier	Rüstungsindustrie, Dekoration, Schädlingsbekämpfung
50	Handhabung	Elefantenrüssel, Krakenarm, Fischflosse	Roboterindustrie, Maschinenteile, Werkzeuge
51	Energieeinsparung	Fischschwarm, Vogelschwarm/Sardinen, Zugvögel	Luftfahrzeug, Automobil
52	Kollisionsvermeidung	Schwarm von Bienen/Ameisen, Fledermäuse	Luftfahrzeug, Automobil
53	Bestäuber	Insekt, Fledermaus	Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie
54	Sozialität	Honigbiene, Kolonie von staatenbildenden Insekten	Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie
55	Natürlicher Feind	Spinnmilbe gegen Raubmilbe, Biopestizid	Biotisches Pestizid, Landwirtschaft
56	Verteidigung	Zebra, Schwarm von Sardinen, Schwarm von gestreiften Korallenwelsen	Gestaltung, Dekoration