

DIN ISO 18457

ICS 07.080

Einsprüche bis 2018-01-24

Entwurf**Bionik –
Bionische Werkstoffe, Strukturen und Bestandteile (ISO 18457:2016);
Text Deutsch und Englisch**

Biomimetics –
Biomimetic materials, structures and components (ISO 18457:2016);
Text in German and English

Biomimétisme –
Matériaux, structures et composants biomimétiques (ISO 18457:2016);
Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-11-24 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 87 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	4
Nationaler Anhang NA (informativ) Literaturhinweise	4
Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Abkürzungen.....	9
5 Biologische Materialien.....	10
5.1 Merkmale.....	10
5.1.1 Allgemeines	10
5.1.2 Biologische Materialien: multifunktional, fehlertolerant, modular und adaptiv	11
5.1.3 Technische Bauteile: monofunktional, langlebig und nur beschränkt anpassungsfähig	12
5.2 Leistungsvermögen.....	12
6 Methodik der bionischen Werkstoff- und Bauteilentwicklung.....	21
6.1 Analyse	21
6.2 Analogiebetrachtung.....	22
6.3 Abstraktion	24
6.3.1 Allgemeines	24
6.3.2 Modellierung und Simulation	24
6.4 Materialauswahl	25
7 Gründe und Gelegenheiten für die Nutzung von bionischen Materialien, Strukturen und Bauteilen in Unternehmen.....	26
Anhang A (informativ) Beispiele für bionische Materialien, Strukturen und Bauteile	27
A.1 Allgemeines	27
A.2 Biologisch inspirierte Polymere	27
A.3 Biomimetische Nano- und Mikrostrukturen, Perlmuttanaloge	27
A.4 Perlglanz- und Interferenzpigmente.....	28
A.5 Selbstschärfende Werkzeuge	29
A.6 Technischer Pflanzenhalm.....	30
A.7 Orthopädische Schraube.....	31
A.8 Bionische Fertigungstechniken für Materialien und Bauteile	32
A.9 Strukturfarbe	33
A.10 Antireflexstrukturen	35
A.11 Haftband	35
A.12 Innovationsprozess zur Herstellung selbstreinigender Kunststoffteile.....	37
Anhang B (informativ) Analysenverfahren.....	38
B.1 Überblick über die Analysenverfahren	38
B.2 Messung und Charakterisierung biologischer und bionischer Oberflächen.....	43
B.2.1 Allgemeines	43
B.2.2 Benetzbarkeit.....	43
B.2.3 Morphologie/Struktur	43

B.2.4 Mechanische Analyse	43
Literaturhinweise.....	44

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 Gremium 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 haben besondere Relevanz für die Definitionen und Begriffsfestlegungen im Bereich Bionik sowie für industrielle Anwendungen und dienten daher im Rahmen des Förderprojekts ISOBIONIK 01FS10008 als Grundlage für die Erstellung der Internationalen Normen ISO 18457, ISO 18458 und ISO 18459.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

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 Materialien, 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) Materialien, Strukturen, Bauteilen und Fertigungstechniken leisten.

1 Anwendungsbereich

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

Diese Internationale Norm legt die Prinzipien biologischer Systeme fest, insbesondere das Leistungsverhalten biologischer Materialien, 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 Materialien, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien beschrieben. In dieser Internationalen Norm sind Messverfahren und Parameter zur Charakterisierung von Eigenschaften bionischer Materialien beschrieben. Diese Internationale Norm stellt Informationen zur Relevanz bionischer Materialien, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien für die Industrie bereit.

Diese Internationale Norm stellt auch Verbindungen zu anderen Teilbereichen der Bionik her, da grundlegende Entwicklungen bei Materialien, Strukturen, Oberflächen, Bauteilen und Fertigungstechnologien häufig die Grundlage für vielfältige weitere Neuerungen bilden. Sie stellt eine Anleitung und Unterstützung für alle dar, die bionische Materialien, Strukturen, Oberflächen, Bauteile und Fertigungstechnologien entwickeln, konstruieren/gestalten, 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 Materialien 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 Materialien 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 Materials 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, Selbstassemblierung (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	Atomkraft-Mikroskop (en: atomic force microscope)
CT	Computertomographie (en: computed tomography)
DSC	dynamische Differenzkalorimetrie (en: differential scanning calorimetry)
DTA	Differenzthermoanalyse (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	Flüssig(keits)chromatographie-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-energie dispersive 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 Materialien

5.1 Merkmale

5.1.1 Allgemeines

Die Begriffe „Material“ und „Struktur“ werden in der Biologie und in der Technik mit zum Teil unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Klassische technische Materialien werden häufig als homogen angesehen, sodass die Annahme eines isotropen Modells für Berechnung und Fertigung sinnvoll und zulässig ist. Technische Materialien hängen hinsichtlich ihrer Eigenschaften hauptsächlich von der Chemie ab, während biologische Materialien 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 „Material“ und „Struktur“ nicht möglich. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Begriff „Material“ als Überbegriff für sämtliche biologischen Materialien und ihre entsprechenden Strukturen verwendet.

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

Tabelle 1 — Merkmale biologischer Materialien

Merkmale	Biologisches Beispiel	Erläuterungen
Eigenschaften		
Multifunktionalität	Holz: u. a. Integration von Wasserleitung, Festigkeit, Dämpfung, Speicherung	Biologische Materialien 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	Besonderes Merkmal des hierarchischen Aufbaus biologischer Materialien 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 Materialien können Fehler und Schädigungen in hohem Ausmaß ertragen, bevor sie global versagen.
Selbst-X	Gummibaum: Selbstreparatur Nagetierzähne: Selbstschärfung Blattoberfläche: Selbstreinigung	Biologische Materialien 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 Materialien 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. Produzierte 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 Materialien sowie z. B. selbstreinigende Blattoberflächen : Selbstanordnung der genetisch codierten Wachsmoleküle	Biologische Materialien 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 Materialien: multifunktional, fehlertolerant, modular und adaptiv

Die in Tabelle 1 aufgeführten Merkmale biologischer Materialien können in eigenschafts- und herstellungsbezogene Merkmale untergliedert werden. Zu den Eigenschaften biologischer Materialien 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 Materialien. Darüber hinaus besitzen biologische Materialien 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 Materialien 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 geoökologische 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 sämtliche zur Verfügung stehenden Ressourcen, Materialien und Technologien genutzt werden können (z. B. Hochtemperaturprozesse bei Metallverarbeitung und Siliziumtechnik). 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) Materialien;
- 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, Fluidodynamik (Strömungsmechanik), 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

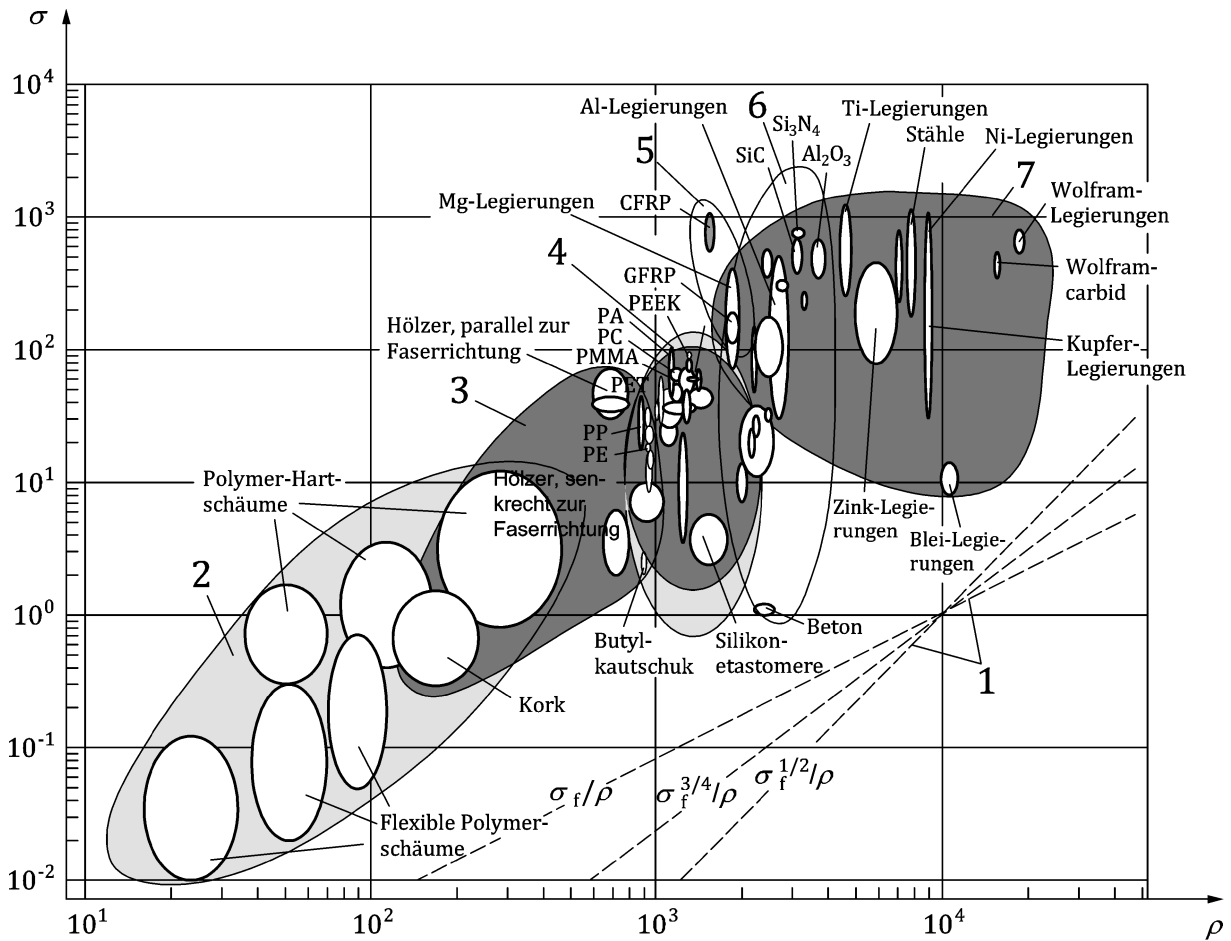
Nr.	Leistungsvermögen	Biologisches Beispiel	Mögliche Anwendungsbereiche
a) Materialien			
1	Antireflexion, Strukturfarbe, Photonik	Morphofalter (siehe A.9), Mottenaugen (siehe A.10), <i>Chrysptera cyanea</i> (Saphir-Demoiselle), Maranta (Pfeilwurz), Fischschuppen (siehe A.4)	Flüssigkristall, Dekoration, Elektronik, funktionelle Schicht, Kosmetik
2	Lumineszenz	Glühwürmchen, Kalmar, Qualle	Automobil, elektrische Haushaltsgeräte, Dekoration
3	Leichtbaustruktur	Bambus, Pflanzenhalm, Winterschachtelhalm (siehe A.6), Kofferrisch, 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	Fluiddynamik	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
b) Prozess			
15	Biomineral	Schalen, Zähne, Knochen, Kieselalge	Medizin, Dekoration, Keramikindustrie
16	Photosynthese	Pflanze	Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie

Nr.	Leistungsvermögen	Biologisches Beispiel	Mögliche Anwendungsbereiche
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, Kraftsensoren von Pflanzen	Sensor, elektrische Haushaltsgeräte, Automobil
31	Chemosensation (Wahrnehmung chemischer Reize)	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
e) Hydrodynamik			
35	Rückstoß-Auftrieb	Nautilus, Tintenfisch, Qualle	Schiff
36	Auftrieb	Vogelflügel, Libelle	Luftfahrzeug, Energieerzeugung
37	Antriebskraft	Qualle, <i>Paramecium</i> (Pantoffeltierchen)	Roboterindustrie

Nr.	Leistungsvermögen	Biologisches Beispiel	Mögliche Anwendungsbereiche
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, Plattfische, Kalmar, Seepferdchen, Chamäleon, Gespenstschrecken, 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	Konfliktvermeidung	Schwarm von Bienen/Ameisen, Fledermäuse	Luftfahrzeug, Automobil
53	Bestäuber	Insekt, Fledermaus	Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie
54	Sozialität	Honigbiene, Kolonie von sozialen (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

Die Leistungsfähigkeit biologischer Materialien im Vergleich zu technischen Materialien kann anhand von Materialeigenschaftsdiagrammen auf der Grundlage von Angaben nach Ashby [5] quantitativ dargestellt werden (siehe Bilder 1 bis 4). Da Zellen biologische Materialien produzieren, werden sie vom Molekül an aufwärts zusammengesetzt. Das erfordert, dass die Moleküle sich selbst zu größeren Strukturen zusammenfügen können und dass die sich ergebenden Strukturen sich zu noch größeren Strukturen zusammenfügen können. Somit kann ein Baum bis zu 15 Hierarchieebenen der Struktur aufweisen. Die Schnittstelle zwischen den jeweiligen Hierarchieebenen kontrolliert die Übertragung von Lasten zwischen den Ebenen, wobei ein Grad der Steuerung von Materialeigenschaften eingebracht wird, der bei technischen Materialien unerreichbar ist (siehe Bild 5).

Ein Vergleich der spezifischen Eigenschaften von biologischen und technischen Materialien ist in Bild 5 angeführt. Beide Gruppen von Materialien sind graphisch dargestellt und es zeigt sich, dass sie nahezu die gleichen Bereiche abdecken, mit Ausnahme von Hochleistungskeramik und -legierungen (erstellt aus Daten von Wegst und Ashby) [5], [6].

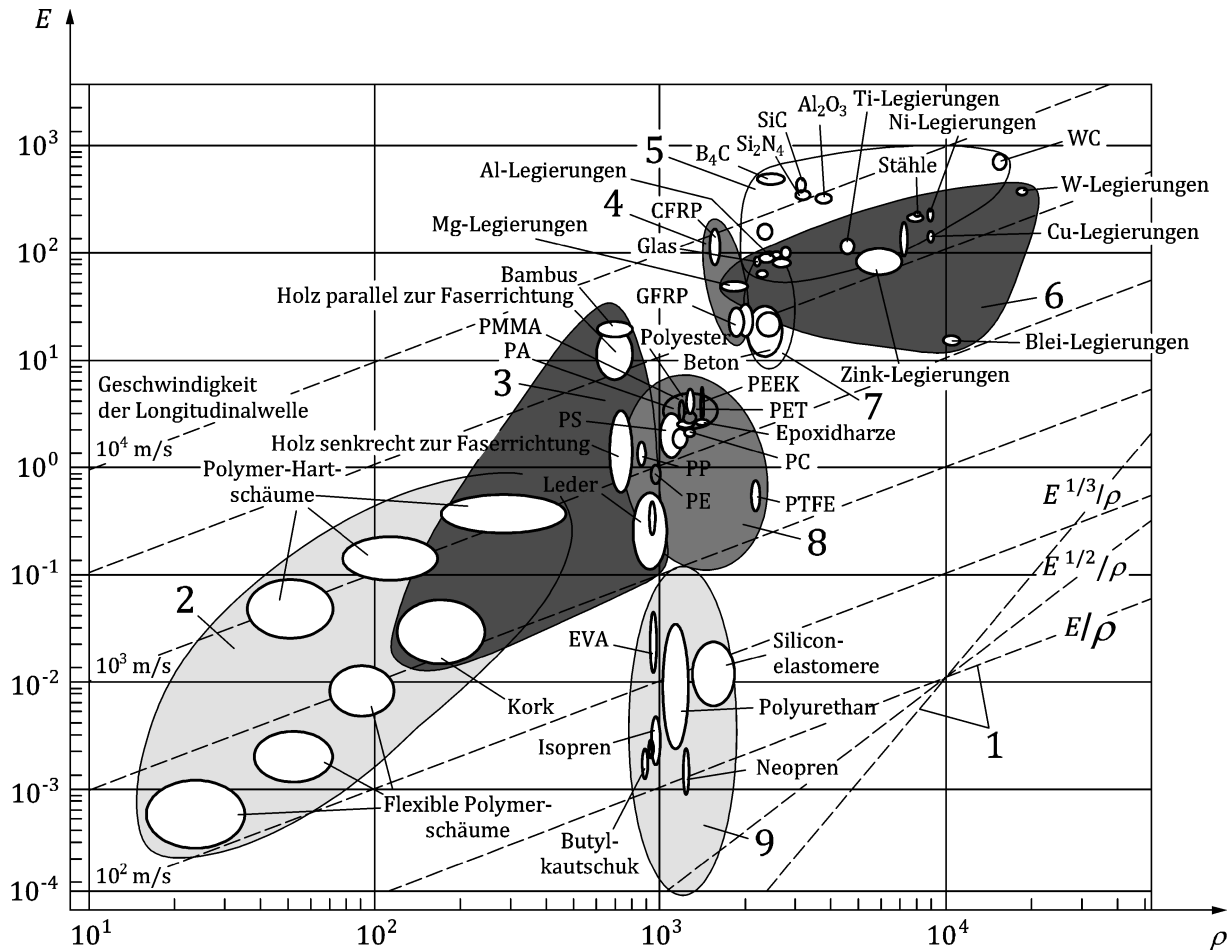


Legende

- | | |
|----------|--|
| ρ | Dichte (kg/m ³) |
| σ | Festigkeit (MPa) |
| 1 | Auswahllinien für Konstruktionen mit minimaler Masse |
| 2 | Schaumstoffe |
| 3 | natürliche Materialien |
| 4 | Polymere und Elastomere |
| 5 | Verbundwerkstoffe |
| 6 | Keramik |
| 7 | Metalle |

ANMERKUNG Im Diagramm ist die Festigkeit der Materialien über der Dichte aufgetragen, um zum Beispiel Materialien mit einem hohen Widerstand gegen plastisches Fließen (bleibende Verformung) und möglichst geringer Masse zu ermitteln.

Bild 1 — Materialeigenschaftsdiagramm auf der Grundlage von Dichte und Festigkeit aus Literaturhinweis [5]

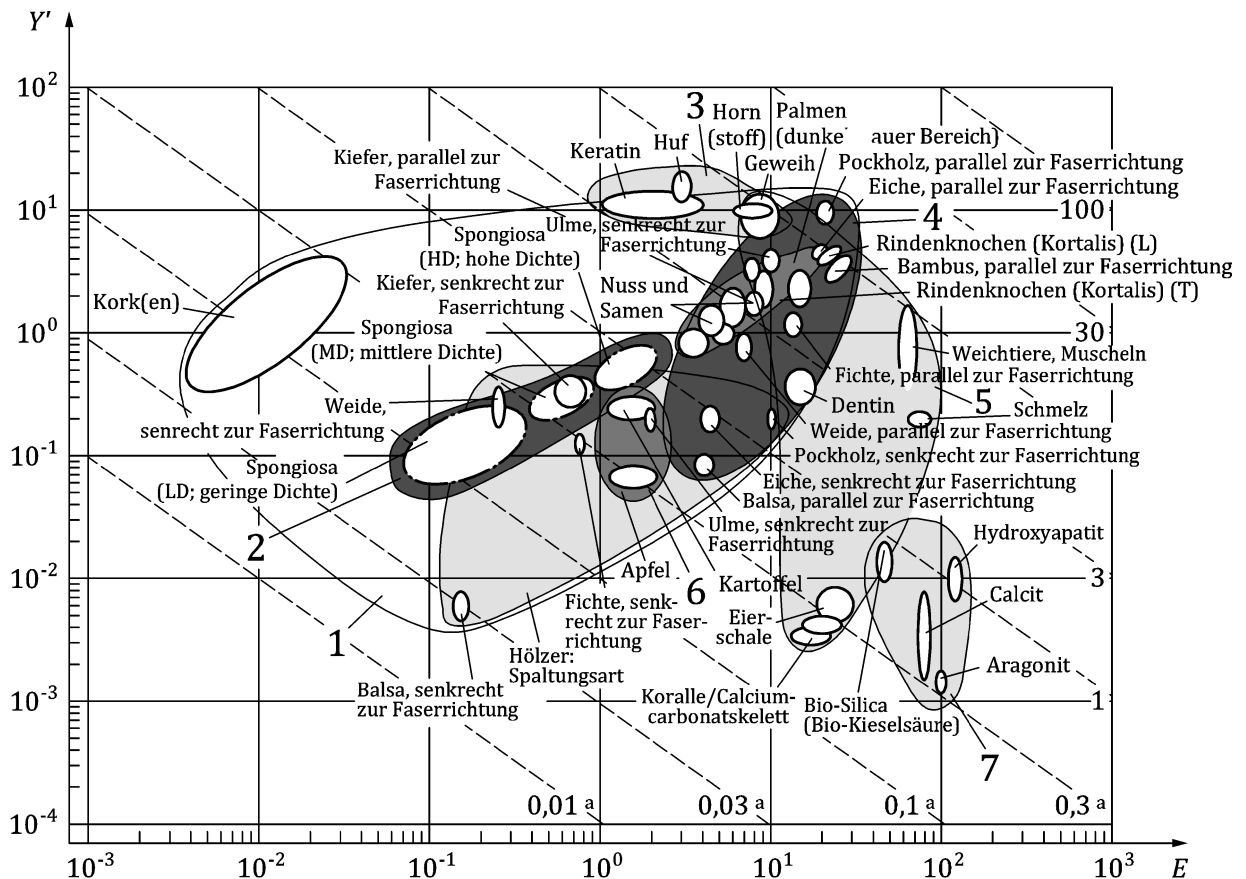


Legende

- ρ Dichte (kg/m³)
- E Elastizitätsmodul (GPa)
- 1 Auswahllinien für Konstruktionen mit minimaler Masse
- 2 Schaumstoffe
- 3 natürliche Materialien
- 4 Verbundwerkstoffe
- 5 technische Keramik
- 6 Metalle
- 7 nichttechnische Keramik
- 8 Polymere
- 9 Elastomere

ANMERKUNG Im Diagramm ist der Elastizitätsmodul über der Dichte aufgetragen, um zum Beispiel Materialien mit einer hohen Steifigkeit und der möglichst geringer Masse zu ermitteln.

Bild 2 — Materialeigenschaftsdiagramm auf der Grundlage von Dichte und Elastizität aus Literaturhinweis [5]



Legende

- E Elastizitätsmodul (GPa)
- Y' Zähigkeit (kJ/m²)
- 1 natürliche Schaumstoffe
- 2 Spongiosa
- 3 Weichgewebe
- 4 Hölzer
- 5 dichtes mineralisiertes Gewebe
- 6 Parenchym
- 7 Biokeramik
- ^a Bruchzähigkeit

ANMERKUNG Im Diagramm ist die Bruchzähigkeit über dem Elastizitätsmodul aufgetragen, um zum Beispiel möglichst steife Materialien mit einer hohen Beständigkeit gegenüber fortschreitender Rissausbreitung für ermüdungs-feste Bauteile zu ermitteln.

Bild 3 — Materialeigenschaftsdiagramm auf der Grundlage von Elastizität und Zähigkeit aus Literaturhinweis [5]

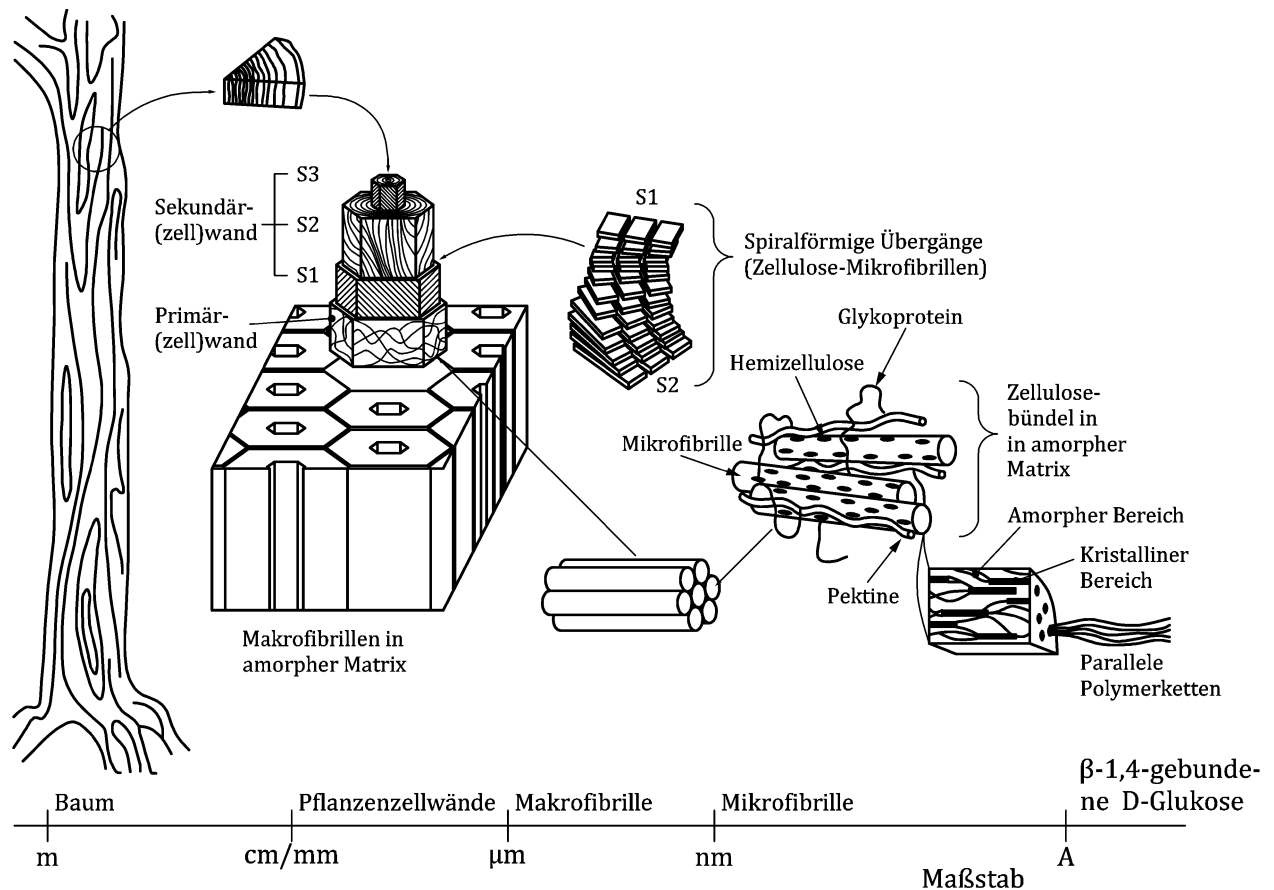


Bild 5 — Typische Analysenverfahren auf verschiedenen Hierarchieebenen am Beispiel von Holz/Fasern (siehe B.2) [8]

6 Methodik der bionischen Werkstoff- und Bauteilentwicklung

6.1 Analyse

Biologische Materialien sind grundsätzlich Verbundwerkstoffe und ihr hierarchischer und modularer Aufbau erfordert Analysen auf mehreren verschiedenen Längenskalen (siehe Bild 5).

Zur Untersuchung biologischer Materialien, einschließlich lebender Gewebe, eignen sich neuere lichtmikroskopische Verfahren. Diese Verfahren werden unter dem Überbegriff „Multiphotonenmikroskopie“, „HHG- (Higher Harmonic Generation)“ oder „3-D-SIM-Mikroskopie“ zusammengefasst. Das Auflösungsvermögen dieser Verfahren liegt deutlich unterhalb der für die klassische Lichtmikroskopie geltenden Abbé-Grenze von ca. 200 nm [9], [10], [11].

Die hohe Variabilität von Eigenschaften biologischer Materialien erfordert die Untersuchung einer relativ hohen Anzahl von Proben. Insbesondere makroskopische Analysen sind aufgrund lokaler Variation der Eigenschaften und damit fehlender Homogenität innerhalb eines Probekörpers schwierig. Eine mögliche Funktionalität dieser Variabilität muss berücksichtigt und darf nicht „herausgemittelt“ werden (z. B. im Fall der effektiven Kontaktfläche rauer Oberflächen). Bei der Analyse und Bewertung einer spezifischen Struktur-Eigenschafts-Beziehung ist es aber auch notwendig, die Multifunktionalität biologischer Systeme zu berücksichtigen.

Die Analysen sollten möglichst geeignet sein, die Materialien im nativen Zustand zu untersuchen (Feuchte, Druck, Temperatur, weitere Umgebungsbedingungen). Daher können auch die bestehenden Prüfnormen nur als Grundnormen bei der Gestaltung einer Prüfanordnung dienen. Die Prüfnormen können in der Regel nicht

unmittelbar Anwendung finden, da biologische Materialien in Bezug auf Probengeometrie, Umgebungsbedingungen, usw. zumeist sehr spezifische Anforderungen an die Analysenverfahren stellen.

Die biologische Forschung beantwortet häufig nicht die von Ingenieuren gestellten Fragen. Die von Biologen angewendeten Techniken sind jedoch relevant und in Anhang B enthalten.

6.2 Analogiebetrachtung

Im Zentrum eines bionischen Prozesses steht eine Analogie- oder Ähnlichkeitsbetrachtung zwischen einem biologischen System und einem technischen Zielsystem. Vor einer Nutzung und detaillierten Übertragung des biologischen Systems muss das Modell systematisch geprüft und analysiert werden. In diesen Prüfungen und Analysen sollte bestimmt werden, ob Funktion, Parameter, Parameterverhältnisse und Gütekriterien für das biologische System — reduziert auf den konkreten Übertragungsgegenstand — und das technische Zielsystem gleichermaßen relevant sind (siehe Bild 6).

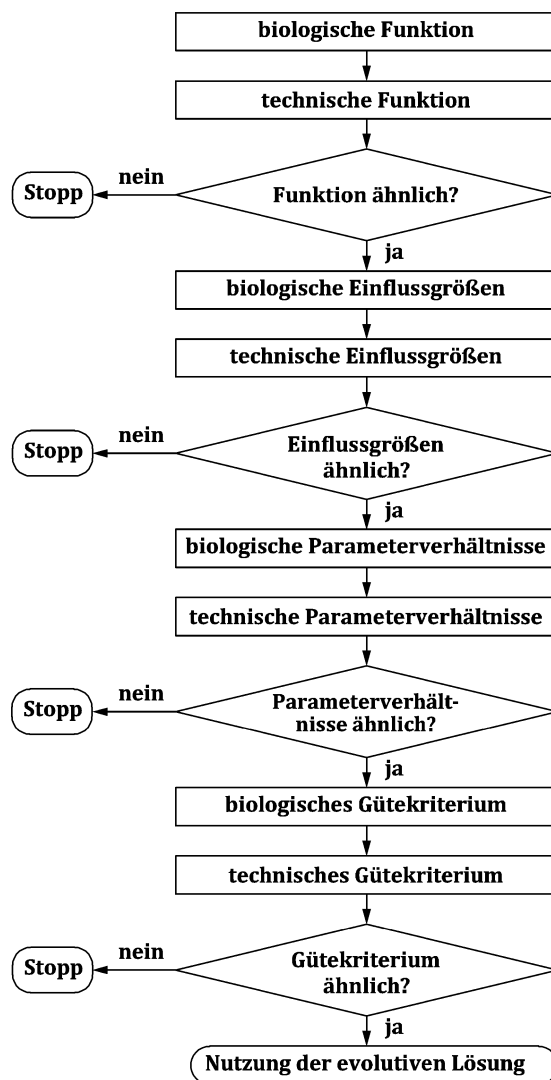


Bild 6 — Algorithmus zur Analogiebetrachtung (Das Bild wurde nach Literaturhinweis [12] überarbeitet.)

Der erste Schritt der Analogiebetrachtung ist die Prüfung, ob die Funktion des biologischen Systems der des technischen Zielsystems entspricht. Eine Funktion ist dabei die Aufgabe, die ein bestimmtes Objekt im biologischen bzw. technischen Kontext zu erfüllen hat.

Im nächsten Schritt ist es notwendig, sämtliche Parameter zu identifizieren und ihrer Relevanz für das Problem zu bestimmen. Wenn ein Faktor aufgrund fehlender Relevanz nicht berücksichtigt wird, sollte eine Begründung angeführt werden. Die Bestimmung dieser Parameter geschieht entweder intuitiv oder systematisch, beispielsweise auf Basis eines das Problem beschreibenden (Differenzial-)Gleichungssystems. An diesen Schritt kann sich die Abstraktionsphase (siehe 6.3) anschließen.

Auf Basis der problemrelevanten Parameter werden im zweiten Schritt dimensionsbehaftete oder dimensionslose Ähnlichkeitsmaßstäbe (Parameterverhältnisse) gebildet. Dazu werden die einzelnen Parameter in eine Reihe von zugehörigen Verhältnissen (Maßstäbe, Proportionen) umgewandelt. Wichtig ist dabei, dass nicht nur Maßstäbe für die geometrische Ähnlichkeit (z. B. das Verhältnis Länge zu Durchmesser einer Verstärkungsfasern) sondern auch Maßstäbe für die dynamische Ähnlichkeit abgeleitet werden. Beispiele sind das Verhältnis von Reibungs- zu Trägheitskräften, das Verhältnis von E-Modul zu Dichte oder das Verhältnis zweier E-Module (Matrix- und Dispersphase in einem Verbundwerkstoff).

Dimensionslose Kennzahlen können mittels einer Dimensionsanalyse gebildet werden [13]. Dabei gibt es etablierte Kennzahlen, die technisch wichtige Verhältnisse beschreiben und eine so weite Verbreitung gefunden haben, dass sie nach Persönlichkeiten aus der Forschung benannt sind. Dies trifft vor allem auf die Bereiche Wärme- und Stofftransport zu (Reynolds-Zahl, Nusselt-Zahl usw.). Nach dem buckinghamschen Pi-Theorem lässt sich darüber hinaus durch die Dimensionsanalyse die Anzahl der das Problem beschreibenden Parameter um die Anzahl der verwendeten Grundvariablen (Grundeinheiten) vermindern. Dies ist vor allem dort relevant, wo die Anzahl der Versuchsparameter reduziert werden muss, um einen durchführbaren Versuchsplan zu erstellen. Müssen aus einem Satz von Parametern dimensionslose Kennzahlen abgeleitet werden, im Rahmen der Dimensionsanalyse aber festgestellt wird, dass das nicht möglich ist, so sind entweder zu viele, zu wenige oder die falschen Faktoren ermittelt worden (der Umkehrschluss gilt nicht).

Eine vollständige Ähnlichkeit zwischen einem biologischen System und einem technischen Zielsystem in Bezug auf den Übertragungsgegenstand ist dann gegeben, wenn alle als relevant festgelegten Verhältnisse in Modell und Zielsystem gleich sind. Dies ist fast nie möglich. Es muss daher abgewogen werden, welche Verhältnisse von besonderer Bedeutung sind und möglichst konstant gehalten werden müssen und bei welchen Verhältnissen Abweichungen akzeptabel sind.

Beispiele für wichtige Parameter und Verhältnisse im Bereich bionischer Materialien, Strukturen und Bauteile sind:

- sämtliche geometrische Verhältnisse einer Struktur;
- auf die Dichte bezogene mechanische Materialparameter;
- Kräfteverhältnisse, insbesondere die auf die Gewichtskraft bezogenen;
- relative Widerstandsmomente und Formfaktoren.

Im letzten Schritt muss geprüft werden, ob die Gütekriterien, mit denen das technische Zielsystem bewertet wird, auch für das biologische System gelten. Beispielsweise können Gütekriterien das Einhalten von bestimmten Höchst- oder Mindestwerten, aber auch die Minimierung des Unterschieds zwischen einem gegebenen Wert und einem festgelegten Sollwert fordern. Ist die Funktion eines biologischen Systems und eines technischen Zielsystems beispielsweise „Streuen eines Pulvers“, so können die Gütekriterien bei einer Mohnkapsel (möglichst weit streuen) und Salzstreuer (Fähigkeit, Salz auf ein Ei zu streuen) sehr unterschiedlich sein.

6.3 Abstraktion

6.3.1 Allgemeines

Der Abstraktionsprozess, das heißt das Loslösen der im biologischen System gefundenen Prinzipien und ihre Verallgemeinerung, ist einer der wichtigsten, aber auch schwierigsten Schritte eines bionischen Projekts. Erst durch die Abstraktion kann neues Wissen in Form eines allgemeinen Begriffes formuliert werden. Eine Voraussetzung für die Abstraktion ist es, die für einen bestimmten Effekt wichtigen Einflussfaktoren von den unwichtigen Einflussfaktoren für eine bestimmte Wirkung zu trennen und dann die Art des Zusammenhangs zu bestimmen, der zwischen den Einflussgrößen vorliegt. Die Gültigkeit der Verallgemeinerung der Ergebnisse des Abstraktionsprozesses kann durch Beobachtung, Analyse und gezielte Experimente bestätigt werden – in der Bionik insbesondere auch an technischen Prototypen. Eine Besonderheit des bionischen Abstraktionsprozesses ist es, dass die Formulierung des Zusammenhangs zwischen den Einflussfaktoren und den Wirkungen interdisziplinär formuliert werden muss. Der Abstraktionsprozess wird durch den Umstand begünstigt, dass Vereinfachungen bei der Übertragung von der Biologie in die Technik in vielen Fällen unausweichlich sind. Die Ergebnisse des bionischen Abstraktionsprozesses können sprachlich formulierte Zusammenhänge, mathematische Modelle, Funktionsmodelle, Funktionsskizzen, Schalt- oder Baupläne sein.

6.3.2 Modellierung und Simulation

6.3.2.1 Allgemeines

Durch Modellbildung und Anwendung verschiedener Simulationstechniken kann die Realität ebenfalls abstrahiert werden. Gleichzeitig bieten Modellierung und Simulationen Möglichkeiten, die Eigenschaften von Materialien, Strukturen und Bauteilen einfach und schnell und damit kostengünstiger vorherzusagen. So ist es z. B. auf der Grundlage der Reaktion von Werkstoffen auf mechanische Belastungen möglich, Vorhersagen zur Lebensdauer von Bauteilen zu machen. Die Verringerung von Entwicklungs- und Produktionskosten und die Optimierung von Entwicklungsabläufen sind aus der Sicht der Industrie häufig die treibenden Kräfte für den Einsatz von Simulationen. Eine Voraussetzung für einen nutzbringenden Einsatz der Simulation ist ein an das zu lösende Problem angepasstes Modell.

Derzeit verfügbare Verfahren ermöglichen eine gute Beschreibung und Vorhersage der Eigenschaften realer Materialsysteme, dennoch können mit computerbasierten Verfahren nur Ausschnitte der Realität beschrieben werden; das Verständnis der vielfältigen Phänomene komplexer und vor allem biologischer Werkstoffe ist noch lückenhaft. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Zeit- und Längenskalen, in denen sich die entsprechenden Materialeigenschaften herausbilden und die damit die Materialfunktionalitäten bestimmen, viele Größenordnungen überspannen. Die Anwendung der Simulationsmodelle bei verschiedenen Zeit- und Längenskalen und die Validierung dieser Modelle ist ein kosten- und zeitaufwendiger sowie komplexer Prozess. Neben einer weiteren Erhöhung der Rechenleistung und neuen Analysenverfahren erfordert dieser Prozess auch innovative interdisziplinäre Strategien, um Simulationstechniken mit experimenteller Werkstoffanalyse und -entwicklung zu verbinden.

Die Bionik bietet den Vorteil, dass mit dem biologischen System grundsätzlich ein lebender Prototyp vorhanden ist, der für die Anpassung und Validierung des technischen Modells verwendet werden kann. Gleichzeitig ist es möglich, Strukturen, insbesondere anisotrope und mehrere Skalen übergreifende Strukturen, und aus ihnen resultierende Eigenschaften an biologischen Systemen zu untersuchen und moderne Multiskalenansätze in Materialsimulationen zu erproben.

6.3.2.2 Belastungssimulation

Die Mehrzahl der Arbeiten zur biomechanischen Simulation beschäftigen sich mit biologischen Designregeln und der Entwicklung von numerischen Optimierungsansätzen, die auf dem lastgesteuerten biologischen Wachstum beruhen. Hierbei wird die äußere Form von Bauteilen nach bionischen Prinzipien optimiert [1].

6.3.2.3 Materialsimulation

Die Natur nutzt jedoch außer der Optimierung der Form auf einer niedrigeren Hierarchieebene auch die Optimierung der inneren Struktur der Materialien, beispielsweise durch einen anisotropen und gradierten Aufbau, wie er beispielsweise in Palmen und Bambus (und anderen Gräsern) gefunden wird [14]. Bedingt durch den hierarchischen Aufbau vieler biologischer Materialien müssen zur Simulation mikromechanische Modelle bei unterschiedlichen Größenordnungen eingesetzt werden, um die Struktur möglichst vollständig zu beschreiben. Derartige Multiskalenansätze können bereits angewendet werden, um gute Vorhersagen für die elastischen Eigenschaften von Knochen [15] und Holz [16] zu erhalten.

Die außergewöhnliche Festigkeit und Zähigkeit von biologischen Materialien (z. B. Perlmutter) kann teilweise durch ihre hierarchische Struktur erklärt werden. Andererseits ist jedoch (wie bei allen Verbundwerkstoffen) die Grenzflächenmechanik von besonderer Bedeutung für das Versagensverhalten. Neuere Ansätze beschreiben daher die Grenzflächenhaftung in biologischen Materialien durch Finite-Elemente-Modelle der biologischen Struktur, in die spezielle Grenzflächenelemente (bezeichnet als kohäsive Elemente) eingebaut werden [17].

6.4 Materialauswahl

Bei der Materialauswahl zur bionischen Werkstoff- und Bauteilentwicklung sind sowohl Materialien, aus denen das biologische System besteht, als auch Materialien, die in einer möglichen technischen Umsetzung zur Anwendung kommen könnten, zu berücksichtigen.

Die Charakterisierung der biologischen Materialien erfolgt während der Analysephase (siehe 6.1). Sie dient der Bestimmung der problemrelevanten Einflussfaktoren und deren Relevanz für das technische Zielsystem (siehe 6.2).

Im Unterschied zu technischen Materialien sind biologische Materialien in der Regel Faserverbund- und Gradientenmaterialien. Sie besitzen einen hierarchischen Aufbau, der sich von der molekularen Ebene bis hin zur Gesamtstruktur erstreckt. Biologische Materialien sind nicht homogen, sondern aus mehreren Komponenten mit wechselnden Anteilen zusammengesetzt. Durch eine geeignete Ausführung und eine entsprechende Zusammensetzung der Komponenten wird das Material für seine Funktion spezialisiert [18]. Daher können nicht nur die Festigkeiten, sondern auch das Verformungs- und Bruchverhalten anisotrope Eigenschaften aufweisen. Durch Wachstum wird über die gesamte Lebensdauer Material synthetisiert und ermöglicht sowohl eine lastgerechte Anordnung, als auch Korrekturen bei Situationsänderungen bzw. eine Selbstreparatur bei Teilschäden. Biologische Materialien sind im wahrsten Sinn des Worts „intelligente Materialien“ (auch bezeichnet als „smart materials“).

Am Ende der Abstraktionsphase werden die Materialeigenschaften des biologischen Systems festgelegt, die sich im technischen Zielsystem wiederfinden sollen. Diese müssen sich jedoch nicht zwangsweise im Material des technischen Zielsystems wiederfinden, sondern können gegebenenfalls auch anderweitig realisiert werden (z. B. Materialsteifigkeit versus Struktursteifigkeit). Ebenso können andere wichtige Eigenschaften des technischen Zielsystems durch eine geeignete Materialwahl realisiert werden, obwohl sie nicht aus den Materialeigenschaften des biologischen Systems abgeleitet wurden.

Bei technischen Anwendungen wird zwischen Konstruktions- oder Strukturwerkstoffen, die primär zum Tragen mechanischer Lasten eingesetzt werden, und Funktionswerkstoffen mit speziellen funktionellen Eigenschaften unterschieden (z. B. bei Glas dessen Transparenz).

Um eine geeignete Materialauswahl für die technische Umsetzung treffen zu können, ist die Kenntnis aller durch das Material zu realisierenden Eigenschaften erforderlich. Durch einen Abgleich dieser Anforderungen mit den bekannten Materialkennwerten kann der Konstrukteur eine geeignete Auswahl treffen, oder gegebenenfalls kann ein neues Material entwickelt werden.

Eine Materialauswahl kann nach mehreren Kriterien z. B. mit dem Simplex-Verfahren optimiert werden. Die Vorgehensweise nach Literaturhinweis [5], bei der aus den verschiedenen Funktionsanforderungen an das Material ein eigenschaftsabhängiger Materialindex abgeleitet wird, kann auch als Grundlage für die Materialwahl genutzt werden. Eine graphische Darstellung dieser Vorgehensweise für zwei unterschiedliche Materialeigenschaften kann den Diagrammen von Literaturhinweis [5] (siehe 5.2, Bild 2 bis Bild 4) entnommen werden. Durch Anwendung des doppelt logarithmischen Maßstabs werden die einzelnen Materialindizes als Geraden (Auswahllinien) dargestellt und erleichtern die Materialauswahl.

Neben den mechanischen und funktionalen Aspekten sind bei der Materialauswahl auch weitere, z. B. wirtschaftliche Aspekte (Materialkosten, Fertigungskosten) und ökologische Aspekte (Recycling bzw. umweltfreundliche Entsorgung) zu berücksichtigen.

7 Gründe und Gelegenheiten für die Nutzung von bionischen Materialien, Strukturen und Bauteilen in Unternehmen

Aus industrieller Perspektive gibt es drei vorherrschende Argumente, die die Bionik zu einer attraktiven Variante eines Innovationsprozesses machen.

— Interdisziplinarität der Bionik:

Die steigende Komplexität von Produkten und Lösungen erfordert neue Herangehensweisen im Innovationsprozess. Qualitative und quantitative Optimierungen unter Anwendung der klassischen Verfahren (Wertanalyse usw.) stoßen gegenwärtig meist an ihre Grenzen. Der interdisziplinäre Charakter der Bionik kann hier neue Impulse geben. Gleichzeitig basieren innovative Produkte häufig auf dem Wissen aus verschiedenen Fachdisziplinen und erfordern eine Konvergenz dieser Fachdisziplinen; eine Tatsache, die bereits heute vielfach in den Curricula (Bildungsinhalten) zahlreicher moderner Ausbildungsprogramme sichtbar wird. Biologie, Nanotechnologie und Informationstechnik spielen dabei eine Schlüsselrolle und die Bionik kann für diese Konvergenz ein wichtiger Treiber sein.

— Bionik und Nachhaltigkeit:

Bionik kann einen wichtigen Beitrag zu effizienten und konsistenten (einpassfähigen) Lösungen in der Produktentwicklung leisten. Konstruktionen von Pflanzen und Tieren sind über unvorstellbar lange Zeiträume in zahllosen „Prüfreiheiten“ erprobt worden und haben zu Lösungen geführt, die ein Minimum an Energie und Material erfordern [19]. Gleichzeitig ist die Einbettung der biologischen Systeme in die sie umgebenden Systeme optimal. Das Studium der Wechselbeziehung zwischen biologischen Komponenten und Organismus bzw. Organismus und Ökosystem bietet daher eine wichtige Grundlage für die Kontrolle der Umweltauswirkung eines technischen Produktes oder Prozesses.

— Höherer Marketingwert bionischer Entwicklungen:

Die Bionik bietet, basierend auf dem biologischen System, außergewöhnliche Ausgangspunkte nicht nur für die Erläuterung der reinen Funktionalität, sondern auch für die Darlegung des gesamten Prozesses bis hin zur produktseitigen Realisierung und das Nutzbarmachen unseres angeborenen Interesses an der Natur (Erzählkunst).

Anhang A (informativ)

Beispiele für bionische Materialien, Strukturen und Bauteile

A.1 Allgemeines

Die bionischen Merkmale, die von einem biologischen System auf ein technisches Material oder Bauteil übertragen werden, können von der Molekülstruktur bis zur makroskopischen Form reichen.

A.2 Biologisch inspirierte Polymere

Materialdesign auf molekularer Ebene wird von einigen biologischen Polymeren in ganz hervorragender Weise demonstriert. Beispiele sind der Naturkautschuk aus dem Saft der *Hevea brasiliensis* und ihrer Zuchtformen oder auch das Resilin in den Ligamenten des Flohs und der Heuschrecke. Die hochelastischen Eigenschaften bei gleichzeitig hoher mechanischer Belastbarkeit übertreffen die Leistungsfähigkeit der meisten synthetischen Polymerwerkstoffe bei Weitem. Nachdem es in Einzelfällen gelungen ist, den Zusammenhang zwischen den gewünschten Eigenschaften und der zugrunde liegenden molekularen Architektur aufzuklären und mit synthetischen Verfahren nachzubilden, ist es möglich, Kunststoffe mit neuartigen Eigenschaften aus petrochemisch hergestellten Rohstoffen herzustellen. Der Erfolg wurde einerseits durch den Einsatz neuartiger Katalysatoren, andererseits durch die Verwendung geeigneter Ausgangsmoleküle (Monomere) erreicht. Hierdurch ist es möglich, die Stereoregularität zu steuern, Molekülblöcke und/oder Verzweigungen zu erzeugen und die Molekulargewichtsverteilung zu kontrollieren. Diese Verfahren stehen trotz aller anfänglicher Erfolge erst am Anfang der vollen Ausschöpfung ihres Potentials und einige Aspekte erinnern bereits jetzt stark an die Präzision und Variabilität biologischer Wachstumsvorgänge. Inwieweit eine besonders leistungsfähige Polymerstruktur von einem konkreten biologischen System inspiriert ist oder ob nicht eher die funktionelle Bandbreite, die in der Natur durch Derivatisierung einiger weniger Basismoleküle erreicht wird, insgesamt Inspiration für die makromolekulare Chemie ist, wird erst die Zukunft zeigen.

A.3 Biomimetische Nano- und Mikrostrukturen, Perlmutteranaloge

Besonders leistungsfähige biologische Materialien bestehen in vielen Fällen aus „harten“ und „weichen“ Bausteinen (Knochen, Zähne, Muschelschalen, Kieselsäureskelette, kettenförmig angeordnete magnetische Nanopartikel, zum Beispiel in magnetotaktischen Bakterien). Dabei spielt weniger die stoffliche Zusammensetzung als vielmehr der nano- und mikrostrukturelle Aufbau und die damit verbundenen Hierarchien und Anisotropien des Hybridwerkstoffs eine bedeutende Rolle. Durch derartige Konstruktionen erreichen die biologischen Materialien eine gute Bruchzähigkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit und Steifigkeit.

Ein viel diskutiertes Vorbild für biomimetische Materialien ist Perlmutter, das Material von Muschelschalen, bestehend aus Calciumcarbonat (Aragonit) und Proteinen. Trotz eines sehr geringen Organikanteils besitzt Perlmutter im Vergleich zu technischen keramischen Materialien eine deutlich erhöhte Bruchdehnung. Dabei übertrifft die Natur mit dem eher „schlechten“ Baumaterial, Calciumcarbonat, die Zugfestigkeit von Siliciumdioxidkeramik und Polymer-Schichtsilikat-Nanokompositen und erreicht gleichzeitig eine hohe (der von Keramik vergleichbare) Steifigkeit (siehe Tabelle A.1). Erreicht wird dies durch einen ziegelmauerwerksartigen Aufbau des Perlmutts, siehe Bild A.1 b).