ALEXANDER SAUER

Bionik in der Struktur-optimierung

Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau

Ein Fachbuch von konstruktions praxis

VOGEL COMMUNICATIONS GROUP

www.vogel-fachbuch.de

konstruktions praxis Fachbuch

Bionische Bauteiloptimierung in der Praxis

Die bionische Strukturoptimierung von Bauteilen verfolgt zwei Ziele: eine Performancesteigerung durch Leichtbaumaßnahmen und die Reduzierung von Kosten durch einen ressourceneffizienten Materialeinsatz. Das Buch bietet einen Einstieg in diese Thematik und vermittelt dem Leser praktische Hilfestellungen, wie auch mit einfachen Mitteln Optimierungen vorgenommen werden können, die zu kraftflussgerechten Bauteilen und damit zu Leichtbaustrukturen führen. Vorgestellt werden sowohl kommerzielle Computerprogramme, als auch robuste Vorgehensweisen, die direkt angewendet und eingesetzt werden können. Zusätzlich stehen dem Leser Excel-basierte Tools und Übungen zum kostenlosen Download zur Verfügung.

Das Buch zum Beitrag!

Alexander Sauer
Bionik in der Strukturoptimierung
Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau

1. Auflage 2018, 224 Seiten
ISBN 978-3-8343-3381-0
69,80 EUR

12635

Jetzt bestellen!

Weitere Informationen und versandkostenfreie Bestellung unter
www.vogel-fachbuch.de

Ein Fachbuch von konstruktions praxis – einer Marke der VOGEL COMMUNICATIONS GROUP

Prof. Dr. Heike Beismann
Westfälische Hochschule
Lehrgebiet: Biologie und Bionik
Studiengang Bionik
Autorin des Buchabschnittes 3.3

Bionik in Entwicklungsprozesse integrieren

In: A. Sauer (2018): Bionik in der Strukturoptimierung. Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau.

Vogel Communications Group

Bionik in Entwicklungsprozesse integrieren

In Entwicklungsprozessen sind allgemeine Arbeitsabschnitte festgelegt, die sinnvollerweise nacheinander ablaufen, um ein Projekt zu einem möglichst erfolgreichen Ergebnis zu führen. Das Ergebnis muss für das Unternehmen letztlich die Investitionen kurzfristig oder langfristig in einer Form einbringen, die dem Unternehmen zugute kommen – sei es als Serienprodukt, Marktanteile oder Know-how und damit Wissensvorsprung. Eine gute Planbarkeit einzusetzender Zeit und einzusetzender Mittel ist für einen erfolgreichen Abschluss eines Projektes oft entscheidend. Dabei gilt nicht zwangsläufig, dass es so schnell und so billig wie möglich bearbeitet werden muss. Auch ein gut planbares, mit hohen Investitionskosten verbundenes und auf lange Sicht angelegtes Projekt kann das Ziel sein. Ein solches Projekt wird eher im Bereich der Vorentwicklung oder der Forschung in einem Unternehmen durchgeführt. Von Entwicklungsprojekten, die nah an der Serienproduktion ablaufen, sind eher schnelle und kostengünstige Resultate erwünscht. In beiden Projektarten ist es möglich, Bionik zu integrieren.

In diesem Beitrag soll deutlich gemacht werden, an welchen Stellen eines Entwicklungsprozesses Bionik die Entwicklungsarbeit in einem Unternehmen stärken kann. Es werden die Arbeitsabschnitte benannt, in denen der Einsatz von Bionik als besonders erfolgversprechend erachtet wird, und was bei der Durchführung beachtet werden sollte. Darauf aufbauend werden konkrete Methoden benannt, die spezifisch für die Bionik sind, und erläutert, in welchen Arbeitsabschnitten ein Einsatz möglich ist.

In der VDI 6220 Blatt 1 [94] wird bereits ein bionischer Entwicklungsprozess beschrieben, der sich an den in der VDI 2221 [92] beschriebenen Prozess anlehnt. Weitere bionische Entwicklungsprozesse mit ähnlichen Arbeitsschritten wurden publiziert und es wurden spezifische Methoden zusammengetragen, die für einen bionischen Entwicklungsprozess sinnvoll erscheinen [105; 23]. Bei allen findet man ähnliche Arbeitsschritte, die sich häufig auf die drei wesentlichen Abschnitte: 1. Analyse, 2. Abstraktion und 3. Anwendung reduzieren lassen [94; 105; 39]. Bei einer technischen Fragestellung müssen die Anforderungen zunächst genau analysiert werden, um sie dann auf die wesentlichen Punkte zu reduzieren, also zu abstrahieren, bevor eine technische Lösung gefunden und umgesetzt werden kann. Ebenso muss bei der Suche nach einem Lösungsprinzip aus der Natur zunächst die Lösungsidee verstanden, also analysiert werden, bevor das Lösungsprinzip abstrahiert werden kann und dann auf ein technisches Problem angewendet, also umgesetzt werden kann.

MERKSATZ

Sowohl in der Technik als auch in der Bionik werden konkrete Fragestellungen in bearbeitbare Abschnitte unterteilt, die sich allgemein in 1. Analyse, 2. Abstraktion, 3. Anwendung einteilen lassen.

Die VDI 6220 Blatt 1 unterscheidet die beiden Herangehensweisen Biology Push (*bottom-up*) und Technology Pull (*top-down*) [94]. In eher designorientierten Fachdisziplinen (z.B. Industriedesign, Architektur) wird für Biology Push auch von «*solution driven*» bzw. für Technology Pull von «*problem driven*» gesprochen [94; 105].

Beim **Biology-Push-Prozess** wird aus der Grundlagenforschung (oder der Naturbetrachtung) heraus ein Struktur-Funktions-Zusammenhang aus der Natur entdeckt und analysiert. Nach erfolgtem Prinzipien-Verständnis und Abstraktion kann dieses Lösungsprinzip auf einen technischen Zusammenhang übertragen werden. Meist handelt es sich dabei um grundsätzliche Neuerungen,

die auf vielfältige Anwendungsbeispiele übertragen werden können. Bekanntestes Beispiel dafür ist der sog. Lotus-Effekt. Ursprünglich bei der Analyse von Oberflächenstrukturen zur systematischen Einordnung von Pflanzenarten entdeckt, konnten die abstrahierten Prinzipien auf verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten (Fassadenfarben, Markisen, Lacke) übertragen werden. Ein weiteres Beispiel für diese Herangehensweise ist der Klettverschluss, der unter dem Namen Velcro® 1955 patentiert wurde.

Beim **Technology-Pull-Prozess** liegt eine konkrete technische Fragestellung vor und es wird spezifisch dafür nach einer Lösung in der Natur gesucht. Sobald ein oder mehrere Lösungsprinzipien gefunden wurden, schließen sich auch hier ein Abstraktionsprozess und eine Umsetzung in die Technik an. Ein bekanntes Beispiel sind die sog. Winglets an Flugzeugflügeln. Die aerodynamischen Eigenschaften von Flugzeugflügeln sollten verbessert werden. Das Studium des Vogelflugs – und hier insbesondere die Verformung der Handschwingen – zeigten, dass die aufgespreizten und nach oben gebogenen Handschwingen die aerodynamischen Eigenschaften beim Fliegen stark verbessern. Die Übertragung in eine technische Umsetzung ist nunmehr bei den meisten Flugzeugen zu finden. Auch der neue Airbus A380 soll nun mit Winglets ausgestattet werden, um Treibstoff zu sparen [2].

MERKSATZ

In der Bionik unterscheidet man zwei Herangehensweisen:

- Biology Push (= bottom-up, = solution driven):
  von einem biologischen Vorbild ausgehend zu einer Anwendung;
- Technology Pull (= top-down, = problem driven):
  von einer technischen Fragestellung ausgehend zu einer Anwendung.

Beide Herangehensweisen sind sich grundsätzlich ähnlich, sind aber insbesondere am Anfang des Prozesses unterschiedlich gelagert und benötigen die Expertise aus den biologischen und bionischen Fachdisziplinen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. In diesem Beitrag wird davon ausgegangen, dass eine Aufgabe oder Fragestellung aus der Technik vorliegt, also nach einem Technology-Pull-Prozess vorgegangen wird. Dies kann in Form einer Kundenanfrage an eine Firma sein oder aber auch firmenintern, etwa bei der Optimierung eines bestehenden Systems oder Produktes oder bei einer Neuentwicklung.

In der Praxis haben die meisten Unternehmen für die Forschungs- und Entwicklungsarbeit eigene Prozesse festgelegt. Für die Integration von bionischen Arbeitsansätzen und Herangehensweisen können diese Prozesse ergänzt und an den passenden Stellen bionische Ansätze eingebaut werden. Dabei geht es nicht darum, Bionik als Ersatz für bestehende Entwicklungsprozesse zu nutzen, sondern als Zusatz bzw. Erweiterung bestehender Prozesse und Herangehensweisen, insbesondere zur Erweiterung des Suchraums für technische Lösungen [94]. Allerdings ist es nicht an jedem Punkt eines bestehenden Prozesses sinnvoll, Bionik oder bionische Methoden zu nutzen. Auch gibt es viele Bereiche in der Entwicklungsarbeit, bei denen es auf eine rein technische Erarbeitung ankommt.

Dass es möglich ist, auch für extrem komplexe Projekte eine allgemeine Abfolge von Arbeitsabschnitten in einem Entwicklungsprozess zu formulieren, zeigen die VDI 2221 [92] für Produktentwicklung, die VDI 2222 Blatt 1 [93] für Konstruktionsaufgaben oder die VDI 2206 [91] für die Entwicklung mechatronischer Systeme. So besagt die VDI 2206: «Ziel dieser Richtlinie ist, das domänenübergreifende Entwickeln mechatronischer Systeme methodisch zu unterstützen. Hauptaugenmerk sollen hierbei Vorgehensweisen, Methoden und Werkzeuge für die frühe Phase des Entwickelns mit Schwerpunkt Systementwurf bilden.» [91] Dabei wird das sogenannte

V-Modell entwickelt, das unabhängig von der Branche auch für andere Entwicklungsprozesse nutzbar ist. Die VDI 2221 formuliert einen sehr allgemeinen Produktentwicklungsprozess, der in nachvollziehbaren Arbeitsabschnitten eine bessere Planbarkeit von Entwicklungsprojekten unterstützen soll [92].

Insbesondere die Erfahrungen aus der Mechatronik sind für die Bionik wertvoll. Beide Disziplinen sind aus vorher bereits etablierten eigenständigen Disziplinen entstanden. Dies wird bereits in der jeweiligen Bezeichnung deutlich: Beides sind Kunstwörter (**Mecha**nik / Elek**tronik** und **Bio**logie / Tech**nik**). Die Mechatronik wurde aus der Elektrotechnik und der Mechanik zusammengefasst, als deutlich wurde, dass mit der Zeit rein mechanische Systeme kaum noch genutzt werden und die Elektrifizierung sehr viele maschinenbauliche Bereiche erfasst hatte. Mit Bionik, einer Zusammenfassung aus Biologie und Technik, müssen Fachleute aus ursprünglich noch weiter entfernten Disziplinen zusammenarbeiten. Mit der nun einsetzenden zunehmenden «Biologisierung» [13] der Wirtschaft, der Technik und weiterer Bereiche ist zu erwarten, dass sich dieser Trend weiter fortsetzen wird.

Die oben genannten Prozessanleitungen (VDI 2221, 2222, 2206) haben einen sehr allgemeingültigen Charakter, gemeinsam ist ihnen aber der lineare, eher hierarchische Aufbau, auch wenn betont wird, dass Iterationen innerhalb des Prozesses nicht nur möglich, sondern auch erwünscht sind. Damit unterscheiden sie sich grundsätzlich von anderen Entwicklungsprozessen, z.B. SCRUM [78]. Diese Vorgehensmodelle, die ursprünglich aus der Softwareentwicklung kamen, sollen in diesem Beitrag nicht berücksichtigt werden.

Dieser Beitrag richtet sich in erster Linie an Unternehmen, die bisher noch keine großen Berührungspunkte mit einer bionischen Arbeitsweise hatten, aber das mögliche Innovationspotenzial in der Forschung und (Vor-)Entwicklung nutzen und sich über Schwierigkeiten und Möglichkeiten informieren möchten. Daher soll in diesem Beitrag der Versuch gestartet werden, den Entwicklungsprozess der VDI 2221 [92], der in der Industrie im deutschsprachigen Raum bekannt und akzeptiert ist, zu verwenden und die bionischen Besonderheiten hier zu berücksichtigen.

Für Methoden, die in einem bionischen Projekt besonders hilfreich sind, wurden entsprechende Hinweise eingearbeitet und in einer Tabelle zusammengefasst (Tabelle 1). Eine ausführliche Methodensammlung für die verschiedenen Arbeitsabschnitte für konventionelle Projekte findet sich in der VDI 2221 [92]. Eine ausführliche Zusammenstellung von explizit in der Bionik nützlichen Methoden findet sich in [105; 23].

MERKSATZ

Bionik ist kein Ersatz, sondern Zusatz, und kann bestehende Entwicklungsprozesse bereichern.

Entwicklungsprozess der VDI 2221

«Die Richtlinie VDI 2221 behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens und definiert diejenigen Arbeitsabschnitte und Arbeitsergebnisse, die wegen ihrer generellen Logik und Zweckmäßigkeit Leitlinie für ein Vorgehen in der Praxis sein können.» [92] Da es sich bei der Entwicklung eines bionischen Produktes im Kern ebenfalls um einen Entwicklungsprozess handelt, kann die VDI 2221 als Basis und Ausgangspunkt für ein methodisches Vorgehen zur Entwicklung bionischer Produkte verwendet werden. Dies gilt umso mehr, als dass die VDI 2221 ausdrücklich branchenunabhängige Angaben macht. Dieses methodische Vorgehen soll im Weiteren ganz generell als Entwicklungsprozess bezeichnet werden – unabhängig davon, ob ein konkretes Produkt, ein Verfahren oder ein anderes Ergebnis erzielt werden soll.

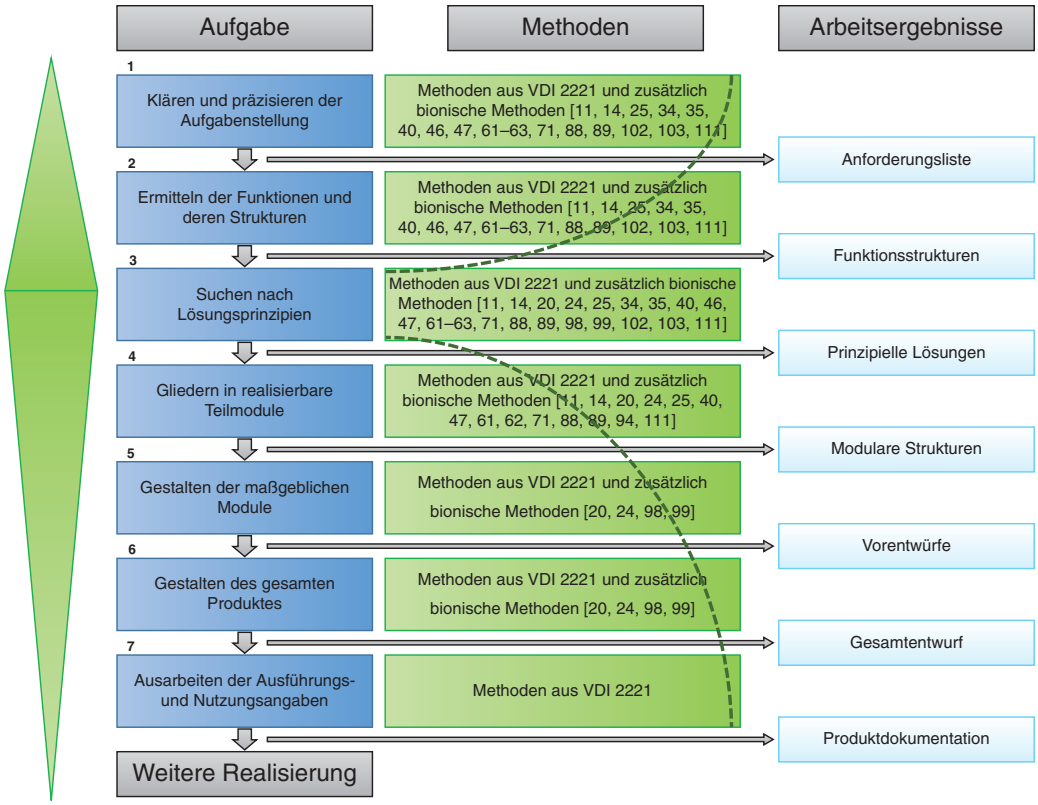

Bild 1 *Ablaufschema des Entwicklungsprozesses mit 7 Arbeitsabschnitten aus der VDI 2221 mit den abgeleiteten Arbeitsergebnissen (verändert nach [92]). Auf der linken Seite ist dargestellt, wie stark der Anteil aus der biologischen Expertise einfließt. Die grüne gestrichelte Linie verdeutlicht, wie stark bionische Methoden eine Rolle spielen. Rechts von der Linie bionische Methoden (bionische Methoden mit Literaturhinweisen), links von der Linie konventionelle Methoden.*

Der Entwicklungsprozess der VDI 2221 umfasst sieben Arbeitsschritte, in denen die notwendigen Aufgaben angegeben werden, und nennt die aus den Aufgaben resultierenden Arbeitsergebnisse (Bild 1).

Um zu den entsprechenden Arbeitsergebnissen zu gelangen, nennt die VDI 2221 in tabellarischer Form viele Methoden, die entweder spezifisch für bestimmte Arbeitsabschnitte sind oder in mehreren Arbeitsabschnitten eingesetzt werden können. Darüber hinaus werden Methoden genannt, die über den gesamten Prozess integrierend eingesetzt werden können. Die Methoden werden folgendermaßen eingeteilt: Analyse- und Zielvorgabemethoden, Methoden zum Entwickeln von Lösungsideen, Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren (Kalkulationsverfahren), Bewertungsverfahren und Entscheidungstechniken, Integrierte Methoden.

Diese Methoden-Kategorien werden in der VDI 2221 den verschiedenen Arbeitsabschnitten zugeordnet – je nachdem, wo sie bevorzugt eingesetzt werden können und gut geeignet sind. Selbstverständlich bestehen große Überlappungsbereiche, und der Einsatz bestimmter Methoden hängt von vielen Faktoren, auch der Verfügbarkeit und der Expertise der Nutzer und Nutzerinnen ab. Alle Methoden sind auch in bionischen Projekten einsetzbar. Darüber hinaus gibt es Methoden, die für die Bionik spezifisch sind. Eine Zuordnung zu den Arbeitsabschnitten des Entwicklungsprozesses zeigt Tabelle 1. Auch hier gilt, dass kein Anspruch auf Exklusivität oder Vollständigkeit erhoben wird, die Zuordnung soll lediglich einen ersten Einblick verschaffen und spezifisch bionische Methoden nennen.

Tabelle 1 gruppiert gut zugängliche Literatur und Webseiten bionischer Methoden nach Lösungskatalogen, Datenbanken, Normen, Thesaurie und allgemeinen Handlungsmodellen und ordnet sie den sieben Arbeitsabschnitten des Entwicklungsprozesses als geeignet und gut geeignet zu.

Um den allgemeingültigen Entwicklungsprozess der VDI 2221 um das Innovationspotenzial der Bionik zu bereichern, gilt es innerhalb dieses Prozesses die Stellen herauszuarbeiten, an denen weitere Expertise aus der Biologie und der Bionik einfließen sollte. Weiterhin sollen diejenigen Methoden, die für die Bionik spezifisch oder besonders nützlich erscheinen, den entsprechenden Arbeitsschritten zugeordnet werden. Es soll also nicht ein Ersatz für einen bestehenden Entwicklungsprozess vorgestellt, sondern vielmehr ein sehr bewährtes Verfahren auf eine relativ neue Disziplin angewendet werden. Die Bionik ist also nicht Ersatz, sondern Zusatz – wie in [94] formuliert.

Bei der Beschreibung der einzelnen Arbeitsabschnitte soll daher zunächst von einem Entwicklungsprozess ausgegangen werden, der von Beginn an als bionischer Prozess angelegt war, z.B. in Forschungsabteilungen, in Innovationszentren oder der Vorentwicklung eines Unternehmens. Dort, wo dieses Vorgehen nicht möglich ist, wird von einem konventionellen Entwicklungsprozess ausgegangen und auf den Einsatz der Bionik in den wesentlichen Arbeitsschritten hingewiesen.

MERKSATZ

Die VDI 2221 unterscheidet die Arbeitsabschnitte:

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

Integration der Bionik in die einzelnen Arbeitsabschnitte

1. Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

Ausgehend von einem Technology-Pull-Prozess [94], kommt die gestellte Aufgabe aus der Technik. Im ersten Arbeitsabschnitt eines Entwicklungsauftrags gilt es nun die Aufgabenstellung zu klären und zu präzisieren. Arbeitsergebnis ist eine Anforderungsliste, die je nach Aufgabenlagerung auch als Pflichtenheft formuliert sein kann. Um diese Aufgabe zu erfüllen, können verschiedene Analyse- und Zielvorgabe-Methoden eingesetzt werden, aber auch Kosten und Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren fließen hier ein [92].

In dieser Phase des Entwicklungsprozesses geht es zunächst um die Festlegung rein technischer Anforderungen. Dennoch können Bionik und Biologie bereits in diesem Arbeitsabschnitt eine wesentliche Rolle spielen. Insbesondere in größeren bionischen Projekten ist es bereits zu Beginn sinnvoll, das Projektteam interdisziplinär zusammenzusetzen. Denn bereits bei der Formulierung der Anforderungsliste ist es notwendig, sich auf ein gemeinsames Vokabular für die kommende Entwicklungsarbeit zu einigen (Tabelle 1). Über das gemeinsame Vokabular hinaus kann so ein gemeinsames Verständnis für die anzugehenden Aufgaben geschaffen werden. Die Herausforderung liegt hier methodisch zunächst darin, in einem interdisziplinären Team die Gedankenwelt «der Anderen» zu erfassen. Workshops mit verschiedenen Kreativitätstechniken können hier helfen, ein gemeinsames Verständnis zu entwickeln. Auch die VDI 2221 nennt bereits in dieser frühen Phase

Kreativitätstechniken (Brainstorming, Methode 6-3-5, Ideen-Delphi u.a.) als Methoden zur Analyse der Aufgabenstellung [92], die auch erfolgreich in der Bionik eingesetzt werden.

2. Ermitteln von Funktionen und Strukturen

In diesem Arbeitsabschnitt geht es um die Ermittlung der Gesamtfunktion und um die zu erfüllenden Teilfunktionen. Als Arbeitsergebnis werden Funktionsstrukturen festgelegt, zu denen die VDI-Richtlinie einige Methoden aus dem Bereich der Analyse und Zielevorgabenmethoden, insbesondere der Funktionsstrukturierung, nennt [92].

Die interdisziplinäre Einbindung der Fachleute aus der Bionik bzw. Biologie in das Projektteam ist auch hier sinnvoll, um die Kommunikation zwischen verschiedenen Fachdisziplinen zu erleichtern. Insbesondere bei der Ermittlung von Funktionsstrukturen ist es wichtig, frühzeitig mögliche Struktur-Funktions-Zusammenhänge, wie sie insbesondere in der Biologie eine große Rolle spielen, zu erkennen und zuordnen zu können (Tabelle 1). Auch wenn es zunächst darauf ankommt, eine rein technische Beschreibung der geforderten Funktionen zu erreichen, können in einem bionischen Projekt die erarbeiteten Funktionen in einen biologischen Kontext gebracht werden. Es können die ersten Analogien in den Funktionen zwischen biologischen und technischen Systemen herausgearbeitet werden. Dieser Schritt ist in einem bionischen Projekt insofern von großer Bedeutung, da hier der Suchraum für die nachfolgende Suche nach Lösungsprinzipien festgelegt wird. Suchfelder, die in diesem Schritt nicht verbal benannt wurden, lassen sich im Folgeschritt nur schwer formulieren. Funktionen sollen dabei möglichst mit Substantiven (Objekte) und Verben (Aktionen) beschrieben werden [92; 39]. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die Aufgabenstellung besonders präzise und für alle Beteiligten nachvollziehbar zu formulieren. Dabei werden wichtige Abstraktionen vorgenommen, indem spezifische Informationen neu formuliert und damit reduziert werden, um die Funktionen und Teilfunktionen allgemein zu formulieren. Spezifische Methoden für diesen Arbeitsabschnitt für bionische Projekte sind hier nicht bekannt und werden auch in der Literatur nicht empfohlen [39]. Dennoch können die weiter unten genannten Methoden auch in diesem Arbeitsabschnitt genutzt werden, um Struktur-Funktions-Zusammenhänge in biologischen Kontexten zu ermitteln.

3. Suchen nach Lösungsprinzipien

Im Arbeitsabschnitt 3 der VDI 2221 [92] werden für alle Funktionen Lösungsprinzipien gesucht. Als Arbeitsergebnis werden eine oder mehrere prinzipielle Lösungen erwartet. Dabei beschreibt eine «prinzipielle Lösung» eine grundsätzliche Lösung für eine abgegrenzte Konstruktionsaufgabe, während «Lösungsprinzipien» keine unmittelbare Bindung an eine bestimmte Konstruktionsaufgabe haben müssen [93]. Eine Reihe von Methoden zur Entwicklung von Lösungsideen steht für die Suche nach Lösungsprinzipien zur Verfügung. Diese reichen von Kreativitätstechniken über morphologische Kästen bis zur Nutzung von bereits bestehenden Lösungen in Konstruktionskatalogen. Ziel ist es, weitere Lösungsvarianten zu entwickeln. Anschließend müssen Bewertungsverfahren und Entscheidungstechniken eingesetzt werden, um aus den gefundenen Lösungsprinzipien, die erfolgversprechendsten herauszuarbeiten [92].

Für die festgelegten Funktionen der Funktionsstruktur können auch Lösungsprinzipien in der Natur gefunden werden (Tabelle 1). Die Grundlage für eine Übertragbarkeit biologischer in technische Systeme ist darin begründet, dass für beide Systeme die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Konstanten gelten [94]. In diesem Arbeitsabschnitt spielt die Biologie für ein bionisches Projekt eine entscheidende Rolle. Für ein konventionelles Projekt, in dem lediglich der Suchraum erweitert werden soll, muss die Suche nach biologischen Vorbildern und Funktionen explizit eingebracht werden. Ein herkömmlicher Entwicklungsprozess kann zumindest in diesem Arbeitsabschnitt um einen bionischen Ansatz erweitert werden. Insbesondere bionische Optimie-

rungsverfahren können hier auf ihre Anwendbarkeit für die vorliegende Aufgabe hin überprüft werden. Bereits etablierte bionische Optimierungsverfahren, wie Strukturoptimierungen [99; 20], Evolutionäre Algorithmen [98] oder der geometrische Algorithmus FracTherm© [24] haben das Potenzial, in überschaubaren Zeitfenstern Lösungsvorschläge zu generieren. An dieser Stelle im Entwicklungsprozess muss geprüft werden, ob die Methoden die gewünschten Lösungsprinzipien liefern können und welche Expertise dafür eingeholt werden muss.

Die Suche nach neuen biologischen Lösungsprinzipien braucht Zeit und Expertise. Es besteht die Gefahr, dass die Suche zu wenig passenden oder gar irreführenden Ergebnissen führt, wenn sie von Personen ohne biologischen Hintergrund durchgeführt wird [39]. Dieser Umstand wird auch als «gap» oder Hindernis bezeichnet, das die Anwendung der Bionik erschwert [94; 105; 39]. Im Grunde genommen beschreibt dieser Umstand, dass eine kreative und erfolgreiche Suche nach Lösungsprinzipien immer entsprechender Fachleute bedarf, die sich in ihren jeweiligen Fachdisziplinen hervorragend auskennen. Ein umfassendes Verständnis der Aufgabenstellung und der zu entwickelnden Funktionsstrukturen ist erforderlich, um mögliche Lösungen korrekt einordnen zu können. Dies gilt selbstverständlich für einen rein technischen Entwicklungsprozess genauso wie für einen Entwicklungsprozess, in den biologische Vorbilder einfließen sollen. Die zum Teil immer noch vorgebrachte Meinung, man müsse nur in die Natur schauen, dort würden die Lösungen bereits alle existieren, ist irreführend. Organismen sind verschiedensten Restriktionen ausgesetzt und Anpassungen, also Lösungen, in aller Regel nicht optimal, sondern für die entsprechenden Umweltbedingungen gerade gut genug. Die in der Natur gefundenen Lösungsideen müssen daher zunächst auf ihre Lösungsprinzipien hin analysiert werden. Dies kann nur von den entsprechenden Fachleuten geschehen. Die Suche und die anschließende Auswahl biologischer Vorbilder («Screening») sind daher der wichtigste Schritt, da hiermit die Basis für alle weiteren Entwicklungsschritte gelegt wird [39].

INTERNET

Für die Suche nach biologischen Vorbildern und Lösungsprinzipien stehen bereits einige Datenbanken und Webseiten zur Verfügung. Um diese möglichst effizient nutzen zu können, müssen die im vorhergehenden Arbeitsabschnitt formulierten Funktionen (Substantive und Verben) mit möglichst vielen semantischen Variationen als Suchwörter genutzt werden. Unterstützt wird die Suche verschiedener Wortvarianten durch Webseiten wie Synonym.com oder Thesaurus.com. Die Kombination mit dem Wort «Biologie» oder «biology» ist dann der nächste Schritt, um in verschiedenen webbasierten Datenbanken Informationen über Vorbilder in der Biologie zu generieren und weitere Analogien von biologischen und technischen Systemen zu finden. Spezifische bionische Datenbanken sind z.B. AskNature (www.asknature.org) oder BIOPS (nature4innovation.com). Diese Datenbanken dürfen aber nicht mit Datenbanken zu Lösungsprinzipien verwechselt werden. Sie können aber als erster Einstieg nützlich sein, um sich schnell einen Überblick zu verschaffen. Eine anschließende ausführliche Literaturrecherche ist notwendig, um bei den gefundenen Ideen Lösungsprinzipien abzuleiten. Als erster Einstieg kann hier GoogleScholar (www.scholar.google.com) dienen. Dann aber gilt es, in der wissenschaftlichen Fachliteratur weiterzusuchen – entweder über die Bibliotheken der Hochschulen oder über öffentlich zugängliche Portale wie z.B. ScienceDirect (www.sciencedirect.com). Dieses methodische Vorgehen wurde systematisch und ausführlich von Hollermann beschrieben [39].

Nicht immer sind nach einer ersten Lösungsidee mögliche Lösungsprinzipien in der Literatur zu finden oder für eine Umsetzung ausführlich genug beschrieben. Es kann notwendig werden, weitergehende Forschung zu betreiben, um ein biologisches System zu verstehen und dann die

entsprechenden Lösungsprinzipien abzuleiten. Eine Kurzbeschreibung der wissenschaftlichen Methoden für unterschiedliche Forschungsschwerpunkte findet sich in der VDI 6220 Blatt 1 [94]. Eine sich daraus ergebende Forschungsleistung kann in der Regel in kleineren Projekten nicht geleistet werden. Eine große Durchdringungstiefe in Bezug auf das Verständnis eines Lösungsprinzips ist dann nur erreichbar, wenn weitere Investitionen erfolgen. Ist das nicht möglich, kann eine entsprechende Innovationshöhe nicht erreicht werden.

Am Ende dieses Arbeitsabschnittes muss aus den vorliegenden Lösungsprinzipien eine Auswahl getroffen werden. Zwar muss nach jedem Arbeitsabschnitt aus den entwickelten Varianten eine Auswahl getroffen werden, hier wird aber explizit darauf hingewiesen, da besondere Entscheidungskriterien für die Auswahl biologischer Lösungsprinzipien angewendet werden sollten. Es muss nun geprüft werden, inwieweit die Lösungsprinzipien mit den in der Aufgabenstellung und der Funktionsanalyse formulierten Zielen übereinstimmen. Dabei müssen die «Ähnlichkeiten der Aspekte» (Funktion, Material, Struktur, Verhalten usw.) [94] gegenübergestellt und bewertet werden. In [111] werden in Anlehnung an [67] drei wesentliche Gruppen von Analogien herausgearbeitet: Funktion, Randbedingungen und Gütekriterien, dabei werden jeweils für das technische und das biologische System die Funktionen, Randbedingungen und Gütekriterien gegenübergestellt und beurteilt. Erst wenn diese Kriterien annähernd als analog beurteilt werden können, ist eine Umsetzung in Form eines bionischen Produktes sinnvoll.

4. Gliedern in realisierbare Module

Im Arbeitsabschnitt 4 wird die prinzipielle Lösung, die weiterverfolgt werden soll, in realisierbare Module gegliedert, bevor die arbeitsaufwendige Konkretisierung erfolgt. Arbeitsergebnis ist eine modulare Struktur, die bereits die realisierbare Lösung einschließlich der Verknüpfung (Schnittstellen) der verschiedenen Module erkennen lässt [92]. Auch hier können wieder Methoden zur Funktionenstrukturierung, aber auch Kreativitätstechniken und Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren eingesetzt werden.

Wurden im vorangehenden Abschnitt prinzipielle Lösungen aus den biologischen Struktur-Funktions-Zusammenhängen abgeleitet, müssen bei der Teilung in realisierbare Module nun Fachleute aus der Biologie und den Ingenieurwissenschaften eng zusammenarbeiten, um die entsprechenden Module passgenau zu entwickeln. Dabei ist es erforderlich, ein sinnvolles Maß an Abstraktion zu erreichen. Das bedeutet, es wird das biologische Lösungsprinzip vereinfacht, ohne es beliebig zu machen oder im anderen Extrem lediglich eine Kopie eines biologischen Vorbilds zu erstellen. Dieser Abstraktionsprozess kann daher nur in enger Abstimmung zwischen den jeweiligen Fachleuten geschehen. Insbesondere sollte hier auch auf die Schnittstellen zwischen verschiedenen Modulen – solchen, die nach biologischen Lösungsprinzipien konstruiert werden, und konventionellen Baugruppen – geachtet werden.

In diesem Abschnitt müssen nun die bionischen Optimierungsverfahren den jeweiligen Modulen zugeordnet und möglicherweise benötigte Expertise zur Gestaltung eingeholt werden (Tabelle 1).

5. Gestalten der maßgebenden Module

Im Arbeitsabschnitt 5 werden die maßgebenden Module konkretisiert. Es entstehen Vorentwürfe für die einzelnen Module [92]. In diesem Arbeitsabschnitt ist insbesondere ingenieurwissenschaftliches Know-how notwendig. In einem bionischen Projekt sollte dennoch die enge Abstimmung mit Fachleuten aus der Biologie sichergestellt werden, um die Vorentwürfe nicht losgelöst von den biologischen Lösungsprinzipien zu entwickeln und dadurch Innovationshöhe zu verlieren. In diesem Arbeitsabschnitt treten nun Simulationsberechnungen in den Vordergrund, während Lösungsfindungsmethoden in den Hintergrund treten. Dafür werden Wirtschaftlichkeitsberechnungen in diesem Abschnitt wichtiger.

Wurden im Arbeitsabschnitt 3 bionische Optimierungsverfahren («Evolutionäre Algorithmen» [98], «Strukturoptimierung» [99; 20] oder FracTherm© [24]) als mögliche Lösungen für einzelne Strukturen der unterschiedlichen Teilmodule ins Auge gefasst, werden sie nun in diesem Arbeitsabschnitt zur Gestaltung der Module eingesetzt. Eine entsprechende Expertise zur Nutzung dieser Methoden muss gegebenenfalls eingeholt werden.

6. Gestalten des gesamten Produktes

Im Arbeitsabschnitt 6 werden die vorher einzeln vorliegenden Module ergänzt und miteinander verknüpft. Arbeitsergebnis ist ein Gesamtentwurf, der alle wesentlichen Festlegungen enthält. Hier zeigt sich insbesondere ingenieurwissenschaftliches Können. Es werden in diesem Abschnitt ebenfalls die Methoden aus dem vorhergehenden Abschnitt genutzt (Tabelle 1). Die notwendige Expertise aus der Biologie ist in diesem Arbeitsabschnitt geringer als in den vorhergehenden.

7. Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

Im Arbeitsabschnitt 7 wird der Gesamtentwurf ausgearbeitet. Arbeitsergebnis ist die Produktdokumentation mit Nutzungsangaben. Auch hier können die Methoden aus den vorangegangenen Arbeitsabschnitten eingesetzt werden [92]. Die Expertise aus der Biologie kann weiter vermindert werden.

Tabelle 1 *Zuordnung von bionischen Methoden mit Literaturangaben zu den in der VDI 2221 genannten Arbeitsabschnitten 1 bis 7 und zusätzlich Angabe, ob es sich bei der Methode um die Beschreibung eines gesamten Entwicklungsprozesses (X) handelt.*
● *gut geeignet,* ○ *geeignet für den jeweiligen Arbeitsabschnitt*

	Arbeitsabschnitte	1	2	3	4	5	6	7	
Literaturquelle	Beschreibung	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Ermitteln der Funktionen und deren Strukturen	Suchen nach Lösungsprinzipien	Gliedern in realisierbare Teilmodule	Gestalten der maßgeblichen Module	Gestalten des gesamten Produktes	Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben	Handlungsmodell, gesamter Entwicklungsprozess
	Bücher, biologische Lösungskataloge								
[111]	Zerbst 1987 Biologischer Katalog, Anwendung von Ähnlichkeitsprinzipien	●	○	●	○				X
[61]	Nachtigall 2002 Katalog, konzeptionelle Überlegungen	●	○	●	○				
[47]	Küppers und Tributsch 2002 Bionik der Verpackung, Katalog	●	○	●	○				X
[62]	Nachtigall 2005 Systematischer Katalog biologischer Systeme	●	○	●	○				

Tabelle 1 *Zuordnung von bionischen Methoden mit Literaturangaben zu den in der VDI 2221 genannten Arbeitsabschnitten 1 bis 7 und zusätzlich Angabe, ob es sich bei der Methode um die Beschreibung eines gesamten Entwicklungsprozesses (X) handelt.*
● *gut geeignet,* ○ *geeignet für den jeweiligen Arbeitsabschnitt – Fortsetzung*

	Arbeitsabschnitte	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	
Literaturquelle	**Beschreibung**	**Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung**	**Ermitteln der Funktionen und deren Strukturen**	**Suchen nach Lösungsprinzipien**	**Gliedern in realisierbare Teilmodule**	**Gestalten der maßgeblichen Module**	**Gestalten des gesamten Produktes**	**Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben**	**Handlungsmodell, gesamter Entwicklungsprozess**
	Datenbanken/Programme im WWW								
[11]	Biomimicry Institute AskNature – Innovation Inspired by Nature https://asknature.org/	●	○	●	○				
[25]	Fraunhofer IAO BIOPS/nature4innovation http://www.nature4innovation.com/	●	○	●	○				
[71]	Michael Sattler bionicinspiration http://bionicinspiration.org/	●	○	●	○				
[40]	IBID Interactive Biologically Inspired Design http://dilab-0.cc.gatech.edu/NLPForBID/index.php	○	○	○	○				
[88]	BIOLOGUE Foraging for Inspiration http://home.cc.gatech.edu/dil/336	○	○	○	○				
[89]	DANE Design by Analogy to Nature Engine http://dilab.cc.gatech.edu/dane/	○	○	○	○				
	Normen, Richtlinien und Patente								
[19]	DIN ISO 18 458 Bionik – Terminologie, Konzepte und Methodik								X
[94]	VDI 6220 Blatt 1 Bionik – Konzeption und Strategie								X
[95]	VDI 6221 Blatt 1 Bionik – Funktionale bionische Oberflächen								X

Tabelle 1 *Zuordnung von bionischen Methoden mit Literaturangaben zu den in der VDI 2221 genannten Arbeitsabschnitten 1 bis 7 und zusätzlich Angabe, ob es sich bei der Methode um die Beschreibung eines gesamten Entwicklungsprozesses (X) handelt.*
● *gut geeignet,* ○ *geeignet für den jeweiligen Arbeitsabschnitt – Fortsetzung*

	Arbeitsabschnitte	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	
Literaturquelle	**Beschreibung**	**Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung**	**Ermitteln der Funktionen und deren Strukturen**	**Suchen nach Lösungsprinzipien**	**Gliedern in realisierbare Teilmodule**	**Gestalten der maßgeblichen Module**	**Gestalten des gesamten Produktes**	**Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben**	**Handlungsmodell, gesamter Entwicklungsprozess**
[96]	VDI 6222 Blatt 1 Bionik – Bionische Roboter								X
[97]	VDI 6223 Blatt 1 Bionik – Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile								X
[99]	VDI 6224 Blatt 3 Bionik – Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses			○	●	●	●		
[20]	DIN ISO 18 459 Bionik – Bionische Strukturoptimierung (CAO, SKO, CAIO, Zugdreiecke)			○	●	●	●		
[98]	VDI 6224 Blatt 1 Bionische Optimierung – Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung			○	●	●	●		
[24]	FracTherm © Geometrischer Algorithmus			○	●	●	●		
[100]	VDI 6225 Blatt 1 Bionik – Bionische Informationsverarbeitung								X
[101]	VDI 6226 Blatt 1 Bionik – Architektur, Bauingenieurwesen, Industriedesign.								X
	Thesaurie, Ontologien, «Keyword-Finder», Analogiebildung								
[14]	Cheong et al. 2008 Translating Terms of the Functional Basis into Biologically meaningful Keywords https://wordnet.princeton.edu/wordnet/	●	○	○					

Tabelle 1 *Zuordnung von bionischen Methoden mit Literaturangaben zu den in der VDI 2221 genannten Arbeitsabschnitten 1 bis 7 und zusätzlich Angabe, ob es sich bei der Methode um die Beschreibung eines gesamten Entwicklungsprozesses (X) handelt.*
● gut geeignet, ○ geeignet für den jeweiligen Arbeitsabschnitt – Fortsetzung

	Arbeitsabschnitte	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	
Literaturquelle	**Beschreibung**	**Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung**	**Ermitteln der Funktionen und deren Strukturen**	**Suchen nach Lösungsprinzipien**	**Gliedern in realisierbare Teilmodule**	**Gestalten der maßgeblichen Module**	**Gestalten des gesamten Produktes**	**Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben**	**Handlungsmodell, gesamter Entwicklungsprozess**
[63]	Nagel et al. 2010 An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design.	●	○	○					
[102; 103]	Vincent et al. 2006, Vincent 2014 An Ontology of Biomimetics, BioTRIZ http://www.biotriz.com/products	●	○	●					X
[46]	Kozaki & Mizoguchi 2014 An ontology explorer for biomimetics database http://biomimetics.hozo.jp/ontology_db.html (Demo)	●	○	○					
[35]	Helms und Goel 2014 The Four-Box Method	●	●	●	○				
[34]	Helfman Cohen et al. 2014 Biomimetics. Structure-Function Patterns Approach	●	●	●	○				
	weitere Handlungsmodelle								
[38]	Hill 1998 Erfinden mit der Natur								X
[29]	Gramann 2004 Problemmodelle und Bionik als Methode								X
[108]	Wilson & Rosen 2007 Systematic Reverse Engineering of Biological Systems								X
[23]	Fayemi et al. 2017 Biomimetics: process, tools and practice								X

Anwendungsbeispiel

Anhand eines vereinfachten Beispiels (Bild 2) werden im Folgenden die Vorgehensweise im Entwicklungsprozess und die Einbindung der Bionik illustriert. In einem Industrieprojekt soll das Kühlverhalten von Formwerkzeugen optimiert werden. Dabei soll die gleichmäßige Durchströmung mit dem Kühlmittel verbessert werden, um die Bildung von Wärmenestern zu vermeiden. Die allgemein formulierte Aufgabe stellt sich folgendermaßen dar.

Aufgabe: Optimierung der Kühlung eines Formwerkzeugs
In dem von Beginn an bionischen Projekt arbeiten Fachleute aus den Ingenieurwissenschaften und der Biologie zusammen. Die oben erläuterten Arbeitsabschnitte werden in Tabelle 2 mit den Inhalten des Projektes und den dazugehörigen Arbeitsschritten und Arbeitsergebnissen angegeben. Resultat des Projektes ist ein erster Prototyp, der für weitere Tests und Optimierungsschritte genutzt wird.

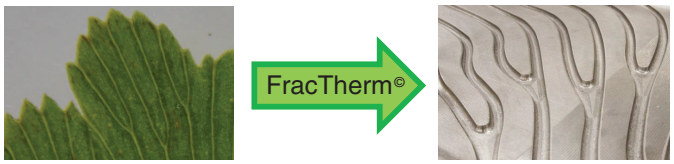

Bild 2 *Optimierung der Kühlkanalstruktur durch Anwendung des FracTherm©-Algorithmus. Links: biologisches Vorbild → Aderstruktur des Frauenhaarfarns [Bild: Beismann], Mitte: Prinzipielle Lösung → FracTherm©-Algorithmus, rechts: technische Umsetzung →* Kühlwasserkanäle in Formwerkzeug [Bild: Grunewald GmbH & Co. KG]

Tabelle 2 *Arbeitsabschnitte, Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse für das Anwendungsbeispiel «Optimierung der Kühlung eines Formwerkzeugs»*

Arbeitsabschnitt	Arbeitsschritte	Arbeitsergebnisse
1 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	Überprüfen und Ergänzen interner und externer Anforderungen Klärung der Aufgabenstellung	**Aufgabenstellung** – Optimierung der Wärmeabgabe durch geänderte Kanalstrukturen **Anforderungsliste** – schnellere Kühlung als bisher – gleichmäßigere Kühlung als bisher – Vermeidung von Wärmenestern bei der Kühlung
2 Ermitteln der Funktionen und deren Strukturen	Festlegen der Gesamtfunktion und der Teilfunktionen sowie Nebenfunktionen in Substantiven und Verben	**Funktionsstrukturen** *Gesamtfunktion:* Wärme abgeben *Teilfunktionen:* Kühlwasser zuführen, Kühlwasser abführen *Nebenfunktionen:* Kühlkanäle abdichten
3 Suchen nach Lösungsprinzipien	Suchen nach bekannten oder käuflichen Lösungen Recherche in biologischen und bionischen Katalogen und Datenbanken Erarbeiten von Lösungsvarianten (z.B. Morphologische Matrix) Bewertung und Festlegung der Lösungsvarianten	**Prinzipielle Lösung** *biologische Vorbilder:* Z.B. Elefantenohren geben Wärme gleichmäßig über Blutadersystem ab, Blattadern verteilen Wasser und Assimilate gleichmäßig über die Blattoberfläche. *Bereits bekannte Anwendung dazu: FracTherm©-Algorithmus*

Tabelle 2 *Arbeitsabschnitte, Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse für das Anwendungsbeispiel «Optimierung der Kühlung eines Formwerkzeugs» – Fortsetzung*

Arbeitsabschnitt	Arbeitsschritte	Arbeitsergebnisse
4 Gliedern in realisierbare Teilmodule	Strukturierung des Konzepts in gestaltbestimmende und -abhängige Funktionsträger	**Modulare Strukturen** *Gestaltbestimmend:* Kanalstruktur und -geometrie, Festlegung der Teilflächen, Festlegung in Unterteil mit Kanälen und Oberteil ohne Kanäle, Festlegung auf Fräsen der Kanäle in Unterteil *Gestaltabhängig:* Zu- und Ausflussventile, Abdichtungskonzept zwischen Ober- und Unterteil
5 Gestalten der maßgeblichen Module	Räumliche, geometrische Anordnung der Kanäle festlegen durch Anwendung von FracTherm©, Hauptabmessungen festlegen, Verbindungsverfahren festlegen, Vorentwurf erarbeiten, erste Simulationen und Berechnungen für Teilflächen, Durchflussmenge- und Wärmeabgabeberechnungen	**Vorentwürfe** Geometrie der Kanalstruktur für die einzelnen Teilflächen entsprechend des FracTherm©-Algorithmus', Verbindung der Teilflächen, Zu- und Abflüsse
6 Gestalten des gesamten Produktes	Gesamtentwurf mit Verbindungsverfahren erstellen, Simulationen und Berechnungen erstellen, Kostenkontrolle, Schwachstellenkontrolle	**Gesamtentwurf** Verbindung der Teilflächen, Oberflächenstruktur für Kanäle, Verbindung Ober- und Unterteil, Abdichtung
7 Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzunsangaben	Teilzeichnungen erstellen, Prüfung der Konstruktion, Erstellen von Anleitungen	**Produktdokumentation** Angaben zu Kanalgeometrie, Fertigungsschritten, Abdichtungsmethode, Angaben zu Durchflussmengen und Drücken
Realisierung / Fertigung	Herstellung eines ersten Prototypen, erste Tests mit dem Prototypen	**Prototyp** Weitere Entwicklung durch Wiederholung einzelner Arbeitsabschnitte

Gesamtbetrachtung

Grundsätzlich lässt sich dieser Entwicklungsprozess entweder von Beginn an als kompletter bionischer Entwicklungsprozess nutzen (z.B. in der Forschung oder Vorentwicklung) oder es ist mit einem konventionellen Ansatz gestartet worden und es sollen bei der Lösungsfindung auch biologische Vorbilder berücksichtigt werden. Die Innovationshöhe, die während des Entwicklungsprozesses erreicht werden kann, steigt in aller Regel, sobald das Projekt von Anfang an als bionisches Projekt gestartet wird. Damit steigt aber auch das entsprechende Risiko, das eingegangen wird, einen möglicherweise nicht umsetzbaren Weg einzuschlagen. Ein Projekt, in dem die Fragestellung mit Fachleuten aus der Biologie bereits zu Beginn der Analyse der ursprünglichen Aufgabe analysiert wird, hat in der Lösungsfindungsphase ein größeres Suchfeld und mehr Raum für völlig neue Lösungen zur Verfügung als ein konventionelles Projekt, das sich erst bei der Lösungssuche mit neuen Ansätzen, Problemen und Vokabular beschäftigt.

Diese Arbeitsabschnitte laufen laut VDI 2221 nicht starr nacheinander ab, sondern es können Arbeitsabschnitte auch häufiger iterativ durchlaufen werden, um die Produkte schrittweise zu optimieren. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass mit zunehmendem Fortschritt und damit Konkretisierungszustand eines Projektes die Iterationszyklen kleiner und weniger werden. Dennoch sollten solche Iterationszyklen, insbesondere in bionischen Projekten, mit gemischten Teams aus verschiedenen Fachdisziplinen eingeplant werden. Die Kommunikation in gemischten Teams stellt

immer eine besondere Herausforderung dar, auch wenn bereits verschiedene VDI-Richtlinien und DIN-ISO-Normen die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Fachdisziplinen für die Zusammenarbeit in bionischen Projekten verbessert haben [94; 19].

Allen Arbeitsabschnitten ist gemeinsam, dass jeweils entschieden werden muss, welche der gefundenen Lösungsvarianten weiterverfolgt werden soll. Dies gilt in konventionellen Produktentwicklungsprozessen genauso wie in Projekten, bei denen auf biologische Vorbilder zur Ideenfindung zurückgegriffen wird. Da solche Auswahl, Optimierungs- und Entscheidungsschritte in allen Arbeitsabschnitten laut VDI 2221 durchgeführt werden müssen, kann bei einem bionischen Projekt in keinem der Arbeitsabschnitte auf die Expertise von Fachleuten aus dem bionischen oder biologischen Bereich verzichtet werden, auch wenn gleichwohl der Anteil an notwendiger Expertise aus Biologie und Technik wie oben dargestellt sehr unterschiedlich ausfallen kann.

Bionik kann die Entwicklungsarbeit in Unternehmen stärken; zielführend eingesetzt, kann die Bionik das Innovationspotenzial in Entwicklungsprozessen deutlich erhöhen.

Quellenverzeichnis

[1] Aage, Niels; Nobel-Jørgensen, Morten; Andreasen, Casper Schousboe; Sigmund, Ole: Interactive topology optimization on hand-held devices. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization, Volume 47*, 2013.

[2] Airbus: *Airbus presents the A380plus*. http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/06/airbus-presents-the-a380plus.html (abgerufen am 20.07.2017).

[3] Andreassen, Erik; Anders, Clausen; Schevenels, Mattias; Lazarov, Boyan S.; Sigmund, Ole*: Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code*. 2010.

[4] Ashby, Michael: *Materials Selection in Mechanical Design: Das Original mit Übersetzungshilfen*. Easy-Reading-Ausgabe. Elsevier, 2007.

[5] Baier, H.; Seeßelberg, C.; Specht, B.: *Optimierung in der Strukturmechanik. Wiesbaden*: Vieweg Verlag, 2012.

[6] Baud, R. V.: *Beiträge zur Kenntnis der Spannungsverteilung in prismatischen und keilförmigen Konstruktionselementen mit Querschnittsübergängen*. Bericht Nr. 83 der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Zürich, 1934.

[7] Baumgartner, A.; Mattheck, C.: SKO: Soft kill option – an effective method to determine optimum structural topology. In: *Proc. II. Int. Symp. SFB 230 «Natural Structures, Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature», Vol. I, S. 111–113*. Stuttgart October 1–4, 1991.

[8] Baumgartner, A.: Ein Verfahren zur Strukturoptimierung mechanisch belasteter Bauteile auf der Basis des Axioms konstanter Spannung. *Fortschrittberichte VDI 145*: VDI-Verlag, 1994.

[9] Beitz, W.; Küttner, K. H.: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2001.

[10] Bendsoe, M. P.; Sigmund, O.: *Topology Optimization*. Berlin: Springer Verlag, 2004.

[11] Biomimicry Institute: *AskNature – Innovation Inspired by Nature,* 2016. https://asknature.org/ (abgerufen am 06.07.2017).

[12] Bruder, Gernot: Finite-Elemente-Simulation und Festigkeitsanalysen von Wurzelverankerungen. *Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6206*, 1998.

[13] Bundesministerium für Bildung und Forschung und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: *Bioökonomie in Deutschland*. http://www.bmbf.de:8001/pub/Biooekonomie_in_Deutschland.pdf (abgerufen am 29.05.2017)

[14] Cheong, H., et al.: *Translating Terms of the Functional Basis into Biologically Meaningful Keywords*. ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Brooklyn, New York, USA, 3-6 August 2008.

[15] Christensen, P.: *An Introduction to Structural Optimization* (Solid Mechanics and Its Applications). Springer Netherlands, 2010.

[16] Culmann, Carl: *Graphische Statik*. Zürich: Meyer & Zeller, 1866.

[17] Degischer, Hans P.; Lüftl, Sigrid: *Leichtbau – Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

[18] Statistisches Bundesamt: *Produzierendes Gewerbe – Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden*. Fachserie 4 Reihe 4.2.1-2013.

[19] DIN ISO 18 458 ICS 07.080: *Bionik – Terminologie, Konzepte und Methodik (ISO 18 458:2015)*. Berlin: Beuth-Verlag, August 2016.

[20] DIN ISO 18 459: *Bionik – Bionische Strukturoptimierung* (ISO 18459:2015). Berlin: Beuth-Verlag, August 2016.

[21] Ehrlenspiel, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Auflage. München: Hanser Verlag, 2007.

[22] Eschenauer, H.; Schnell, W.: *Elastizitätstheorie: Grundlagen, Flächentragwerke, Strukturoptimierung*. Mannheim : BI-Wissenschaftlicher Verlag, 1993.

[23] Fayemi, P.-E., et al.: Biomimetics. Process, tools and practice. *Bioinspiration & Biomimetics*, *Band 12 (2017)* Heft 1, S. 1–20.

[24] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE, 2009. *Fluidverteilungselement für eine fluidführende Vorrichtung.* Erfinder: B. Sicre; T. Oltersdorf; M. Hermann. 28.05.2009. Anmeldung: 27.11.2007. Deutschland, DE 10 2007 056 995 A1.

[25] Fraunhofer IAO: *BIOPS/nature4innovation*. http://www.nature4innovation.com/ (abgerufen am 06.07.2017).

[26] Friedrich, Horst: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Berlin: Springer Vieweg Verlag, 2017.

[27] Gordon, J. E.: *Structures – or why things don't fall down*. DaCapo Press, 2003.

[28] Götz, K.; Kappel, R; Tesari, I.; Weber, K; Mattheck, C.: Technisches Holz nach dem Vorbild der Natur. *Wissenschaftlicher Bericht FZKA 6717*.

[29] Gramann, J.: *Problemmodelle und Bionik als Methode*. Dissertation Technische Universität München, München, 2004.

[30] Haller, Sascha: Gestaltfindung: *Untersuchungen zur Kraftkegelmethode*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.

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

[32] Harzheim, L.: *Strukturoptimierung: Grundlagen und Anwendungen*. Haan: Europa-Lehrmittel Verlag, 2. Auflage, 2014.

[33] Haversath, M.; Catelas, I.; Li, X.; Tassemeier T.; Jäger, M.: PGE_2 and BMP-2 in bone and cartilage metabolism: 2 intertwining pathways. *Can J Physiol Pharmacol, 90(11)*: 1434–1445, 2012.

[34] Helfmann Cohen, Y.; Reich, Y.; Greenberg, S.: Biomimetics: Structure-Function Patterns Approach. *Journal of Mechanical Design (2014) Heft 136*, S. 1–11.

[35] Helms, M.; Goel, A.K.: The Four-Box Method. Problem Formulation and Analogy Evaluation in Biologically Inspired Design. *Journal of Mechanical Design*, *Band 136 (2014), Heft 11*, S. 111106.

[36] Henning, F.; Moeller, E.: *Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München: Hanser-Verlag, 2011 .

[37] Herdy, Michael: *Beiträge zur Theorie und Anwendung der Evolutionsstrategie*. Berlin: Mensch und Buch Verlag, 1999.

[38] Hill, B.: *Erfinden mit der Natur*. Funktionen und Strukturen biologsicher Konstruktionen als Innovationspotentiale für die Technik. Aachen: Shaker Verlag, 1998.

[39] Hollermann, M.: *Enabling Biomimetics*. Development and Evaluation of a Biomimetic Methodology for Supporting Creativity in Product Innovation. Masterarbeit Universität, Bremen, 2012.

[40] *IBID – Interactive Biologically Inspired Design*. http://dilab-0.cc.gatech.edu/NLPForBID/index.php (abgerufen am 04.08.2017).

[41] Ikeda, K.; Takeshita, S.: The role of osteoclast differentiation and function in skeletal homeostasis. *J Biochem., 159(1):* 1–8. 2016.

[42] Klahn, Ch.; Meboldt, M. (Hrsg.): *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung*. Würzburg: Vogel Communications Group, 2018.

[43] Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 3. Auflage, Vieweg Verlag, 1997.

[44] Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. 10. Auflage. Berlin: Springer Vieweg Verlag, 2013.

[45] Knothe, K.; Wessels, H.: *Finite Elemente*. Berlin: Springer-Verlag, 2017.

[46] Kozaki, K.; Mizoguchi, R.: *An Ontology Explorer for Biomimetics Database*. *CEUR-WS.org (Hg.)* Proceedings of the 2014 International Conference on Posters & Demonstrations Track. Riva del Garda. Italy. 2014

[47] Küppers, U.; Tributsch, H.: *Verpacktes Leben – Verpackte Technik.* Bionik der Verpackung. Weinheim: Wiley-VCH, 2002.

[48] Mattheck, C.; Huber-Betzer, H.: Die Baudkurve – ein allgemeines Designprinzip für biologische Kraftträger. In: *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, *9/10*, S. 194–200, 1989.

[49] Mattheck, C.: *Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister*. 4. Auflage. Freiburg: Rombach Verlag, 2006.

[50] Mattheck, C.: *Stupsi erklärt den Baum*. 3. Auflage. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 1999.

[51] Mattheck, C.: *Mechanik am Baum – erläutert mit einfühlsamen Worten von Pauli dem Bären*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2002.

[52] Mattheck, C.: *Warum alles kaputt geht – Form und Versagen in Natur und Technik*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2003.

[53] Mattheck, C.: *Verborgene Gestaltgesetze der Natur – Optimalformen ohne Computer*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, 2006.

[54] Mattheck, C.; Bethge, K.; Sauer, A.; Sörensen, J.; Wissner, C.; Kraft, O.; About cracks, dunce caps and new way to stop cracks. *Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures, 32 (2009),* S. 484–92; 2009.

[55] Mattheck, C.: *Denkwerkzeuge nach der Natur*. Karlsruhe, 2010.

[56] Mattheck, C.; Tesari, I.: Wir haben verglichen – Die Methode der Zugdreiecke im Vergleich mit anderen Kerbformen. *Konstruktionspraxis, 4, 2008*.

[57] Mattheck, C.: *Die Körpersprache der Bauteile – Enzyklopädie der Formfindung nach der Natur*. 2017.

[58] Maute, K.: *Topologie- und Formoptimierung von dünnwandigen Tragwerken.* Bericht 25, 1998.

[59] Moldenhauer, H.: *Die Visualisierung des Kraftflusses*. In Stahlbaukonstruktionen, Volume 81, Issue 1, Pages 32–40, 2012.

[60] Müller, G.; Groth, C.: *FEM für Praktiker – Band 1: Grundlagen*. 8. Auflage. Renningen: expert verlag, 2007.

[61] Nachtigall, W.: *Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2002.

[62] Nachtigall, W.: *Biologisches Design. Systematischer Katalog für bionisches Gestalten*. Berlin: Springer, 2005.

[63] Nagel, J. K.; Stone, R. B.; McAdams, D. A.: *An Engineering-to-Biology Thesaurus for Engineering Design*. ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Montreal, Quebec, Canada, 15–18 August 2010.

[64] Nultsch, W.*: Allgemeine Botanik*. 12. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2012.

[65] Pilkey, W.; Pilkey D.: *Peterson's Stress Concentration Factors*. 3. Auflage. New-York: John Wiley & Sons, 2008.

[66] Rothwell, A.: *Optimization Methods in Structural Design* (Solid Mechanics and Its Applications). Springer 2017.

[67] Rechenberg, I.: *Evolutionsstrategie*. Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1994.

[68] Reuschel, D.; Mattheck, C.; Tesari, I.: Prediction of Cancellous Bone Arrangement in a Human Femur with CAIO (Computer Aided Internal Optimization). In: *Journal of Biomechanics, 34*, S. 33–34, 2001.

[69] Reuter, M.: *Methodik der Werkstoffauswahl*. München: Hanser Verlag, 2. Auflage, 2014.

[70] Round, F. E.; Crawford, R. M.; Mann, D. G. (1990): *The Diatoms: Biology & Morphology of the Genera*. Cambridge University Press, 1990.

[71] Sattler, M.: *bionicinspiration*. http://bionicinspiration.org/ (abgerufen am 24.07.2017).

[72] Sauer, A.: *Untersuchungen zur Vereinfachung biomechanisch inspirierter Strukturoptimierung*. FZKA 7406, 2008.

[73] Sauer, S.; Herdy, M.; Speck, T.; Speck, O.: Evolutionsstrategie: Optimieren nach dem Vorbild der Natur – Interdisziplinäre Arbeitsweise der Biomechanik und Bionik. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Biologie, 6/59*: 34–41. 2010.

[74] Scherrer, M.: *Kerbspannung und Kerbformoptimierung*. FZKA-7021, Karlsruhe: FZK-Verlag, 2004, Dissertation Universität Karlsruhe (TH), 2004.

[75] Scharnowski, E.: *Gestalt & Deformation: Elementare Tragwerke und Rechengrößen aus Natur, Technik und Design*. 2. Auflage, Frauenhofer-Inst. für Werkstoffmechanik IWM, 2011.

[76] Schmit, L. A.: Structural Optimization – Some Key Ideas and Insights. In: *New Directions in optimum structural design*, ed. by E. Atrek. Tucson: John Wiley, 1984.

[77] Schumacher, A.: *Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg, 2. Auflage, 2013.

[78] Schwaber, K.: *Scrum im Unternehmen*. Unterschleißheim: Microsoft Press, 2008.

[79] Schwefel, H.-P.: *Evolution and Optimum Seeking*. New York: Wiley & Sons 1995.

[80] Sedlmeier G; Sleeman J.: Extracellular regulation of BMP signaling: welcome to the matrix. *Biochem Soc Trans. 2017;45(1)*: 173–181. 2017.

[81] Sigmund, O.: A 99 line topology optimization code written in Matlab. *Struct Multidisc Optim 21*, 120–127. Berlin: Springer-Verlag, 2001 .

[82] Sörensen, J.: *Untersuchungen zur Vereinfachung der Kerbformoptimierung*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH), Forschungszentrum Karlsruhe FZKA-7397, 2008 .

[83] Sullivan, L. H.: The tall office building artistically considered. *Lippincott's monthly magazine 339,* 403–409, 1896.

[84] D'Arcy Wentworth Thompson: *On Growth and Form*. Cambridge University Press, 1917.

[85] D'Arcy Wentworth Thompson: *Über Wachstum und Form*. Frankfurt: Eichborn Verlag, 1. Auflage, 2006.

[86] https://tiedemann-betz.de/fileadmin/Downloads/deutsche_medien/Prospekt_Tiedemann_Spannungsoptik_2013.pdf.

[87] Troll, W.: *Allgemeine Botanik*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1973.

[88] Vattam, S.; Goel, A. K.*: Foraging for Inspiration: Understanding and Supporting the Online Information Seeking Practices of Biologically Inspired Design*. IDETC/CIE 2011 Washington, DC, USA, 28–31 August 2011.

[89] Vattam, S., et al.: *DANE: Fostering creativity in and through biologically inspired design*. First International Conference on Design Creativity Kobe, Japan, November 2010.

[90] Vaughan T. J.; Mullen, C. A.; Verbruggen, S. W; McNamara, L. M.: Bone cell mechanosensation of fluid flow stimulation: a fluid-structure interaction model characterising the role integrin attachments and primary cilia. *Biomech Model Mechanobiol. 2015;14(4)*: 703–18. 2015.

[91] VDI 2206: *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2004.

[92] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Berlin: Beuth-Verlag, Mai 1993.

[93] VDI 2222 Blatt 1: *Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin: Beuth-Verlag, Juni 1997.

[94] VDI 6220 Blatt 1: *Bionik. Konzeption und Strategie – Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren / Produkten*. Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2012.

[95] VDI 6221 Blatt 1: *Bionik Bionische Oberflächen*. Berlin: Beuth-Verlag, September 2013.

[96] VDI 6222: *Bionik Bionische Roboter*. Berlin: Beuth-Verlag, November 2013.

[97] VDI 6223: *Bionik Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile*. Berlin: Beuth-Verlag, August 2011.

[98] VDI 6224 Blatt 1: *Bionische Optimierung Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung*. Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2012.

[99] VDI 6224 Blatt 3: *Bionik – Bionische Strukturoptimierung im Rahmen eines ganzheitlichen Produktentstehungsprozesses*. Berlin: Beuth-Verlag, September 2017.

[100] VDI 6225 Blatt 1: *Bionik – Bionische Informationsverarbeitung*. Berlin: Beuth-Verlag, September 2012.

[101] VDI 6226 Blatt 1: *Bionik Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign Grundlagen*. Berlin: Beuth-Verlag, Februar 2015.

[102] Vincent, J. F., et al.: Biomimetics. Its practice and theory. *Journal of the Royal Society, Interface*, *Band 3 (2006) Heft 9*, S. 471–482.

[103] Vincent, J. F.: An Ontology of Biomimetics. In: Goel, A. K.; McAdams, D. A.; Stone, R. B. (Hrsg.): *Biologically inspired design. Computational methods and tools*. London: Imprint Springer Verlag, 2014, S. 269–285.

[104] Vogel, S.: *Von Grashalmen und Hochhäusern – Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000 .

[105] Wanieck, K., et al.: Biomimetics and its tools. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* (*2017),* S. 1–14.

[106] Wehner, R.; Gehring, W.: *Zoologie*. 24. Auflage (2007). Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2007.

[107] Wiedemann, J.: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*. Berlin: Springer, 3. Auflage, 2006.

[108] Wilson, J.; Rosen, D.: *Systematic Reverse Engineering of Biological Systems*. Las Vegas, Nevada, USA, September 4–7.

[109] Wingender, B.; Bradley, P.; Saxena, N.; Ruberti, J. W; Gower, L.: Biomimetic organization of collagen matrices to template bone-like microstructures. *Matrix Biol. 2016;52–54:* 384–96. 2016.

[110] Wissner, C.: *Beiträge zum Fail Safe Design*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010.

[111] Zerbst, E. W.: *Bionik. Biologische Funktionsprinzipien und ihre technischen Anwendungen*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1987.

Informieren Sie sich jetzt!

Bionik ist ein Schwerpunkt des Anwendertreff Leichtbau. Hier treffen sich jährlich Konstrukteure und Entwickler, die sich umfassend über Leichtbau im Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau informieren möchten. Aktuelles zur Veranstaltung finden Sie unter:

www.anwendertreff-leichtbau.de

Eine Veranstaltung von konstruktions praxis – einer Marke der VOGEL COMMUNICATIONS GROUP

Der Beitrag „Bionik in Entwicklungsprozesse integrieren“ ist dem Praxishandbuch „Bionik in der Strukturoptimierung“ von Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer entnommen. In dem Artikel beschreibt Prof. Dr. Heike Beismann, Professorin an der Westfälischen Hochschule, an welchen Stellen eines Entwicklungsprozesses Bionik die Entwicklungsarbeit in einem Unternehmen stärken kann. Dabei werden nicht nur die Arbeitsschritte benannt, in denen der Einsatz von Bionik als besonders erfolgsversprechend gilt, sondern auch konkrete Tipps und Methoden für die Integration aufgezeigt.

Aus dem Inhalt:

- Entwicklungsprozess der VDI 2221
- Integration der Bionik in die einzelnen Arbeitsabschnitte
- Anwendungsbeispiel
- Gesamtbetrachtung

www.vogel-fachbuch.de