

Der Hals als Bioinspiration für technische Innovationen

Christine Böhmer^{1,*}

Biologie und Technik - Bionik

Die Evolution des Lebens auf der Erde hat eine enorme Diversität an Tieren hervorgebracht. Dies beinhaltet nicht nur die Entstehung einer Vielzahl von verschiedenen Arten (Biodiversität), sondern auch die Entwicklung einer großen morphologischen Vielfalt (Biodisparität). Physikalisch unterschiedliche Habitate - wie zum Beispiel der Übergang von einem Leben im Wasser zu einem Leben an Land - stellten Organismen vor vielfältige Herausforderungen. Folglich fordern die dramatischen Unterschiede der jeweiligen Umweltbedingungen Anpassungen hinsichtlich der Anatomie und Physiologie der Tiere. Im Laufe der Evolution haben Lebewesen verschiedenste strukturelle Lösungen entwickelt, um unter herausfordernden Umweltbedingungen zu überleben. Eines der wohl bekanntesten Beispiele sind die Flügel der Vögel, die es den Tieren in Kombination mit anderen anatomischen Anpassungen ermöglichten, einen vollkommen neuen Lebensraum (den Luftraum) zu erobern (Abb. 1). Diese technischen „Erfindungen“ der Natur sind für Wissenschaftler und Ingenieure höchst interessant, da sie als Vorbilder für innovative Lösungen in der Architektur, Industrie, Medizin und Wirtschaft dienen können.

Der Verein Dt. Ingenieure (VDI) definiert den Begriff Bionik als Wissenschaftsbereich, der in interdisziplinärer Zusammenarbeit Biologie und Technik mit dem Ziel verbindet, durch Abstraktion, Übertragung und Anwendung von Erkenntnissen, die an biologischen Vorbildern gewonnen werden, technische Fragestellungen zu lösen (VDI-Richtlinie 6220). Bionisches Vorgehen umfaßt dabei drei wesentliche Schritte: (1) das Erkennen einer biologischen Besonderheit, (2) die Abstraktion des biologischen Befundes sowie die entsprechende Ausarbeitung eines allgemeinen Prinzips und (3) dessen technische Umsetzung (Nachtigall 2010; 2020).

1 - UMR7179 Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)/Muséum National d'Histoire Naturelle (MNHN) Paris, 55 rue Buffon, F-75005 Paris, Frankreich; *boehmer@vertevo.de



Abbildung 1. Die Natur dient oft als Inspirationsquelle für Innovationen. Der Vogelflügel als Beispiel von Bioinspiration für Flugzeugtragflächen.

Funktionelle Anatomie der Wirbelsäule

Ein charakteristisches Konstruktionsmerkmal der Wirbeltiere ist die Wirbelsäule. Zu ihren wichtigsten Funktionen zählt der Schutz des empfindlichen und lebenswichtigen Rückenmarks, das im Wirbelkanal verläuft. Sie dient ebenfalls als Gerüst, das Stabilität gewährleistet und gleichzeitig Bewegung ermöglicht. Die Wirbelsäule ist daher eigentlich keine „Säule“, sondern eine stabile und mobile Gliederkette (Slijper 1946). Sie ist aus mehreren, einzelnen Elementen - den Wirbeln - zusammengesetzt, die zwar einen gemeinsamen Grundaufbau haben, sich aber in ihrer speziellen Form je nach Position und Funktion unterscheiden (Abb. 2) (Hildebrand und Goslow 2004). Der relativ einheitlichen Wirbelsäule der Fische, die sich generell in zwei morphologische Regionen (präcaudal und caudal) einteilen läßt, steht das hochspezialisierte Axialskelett der Säugetiere mit fünf Wirbelregionen gegenüber (Jones et al. 2018): Hals-, Brust- und Lendenwirbelsäule sowie Kreuz- und Steißbein bzw. Schwanzwirbelsäule. Jeder dieser fünf Regionen kann eine bestimmte Wirbelform und Funktion zugeordnet werden (Kummer 1960). Grundsätzlich unterschei-

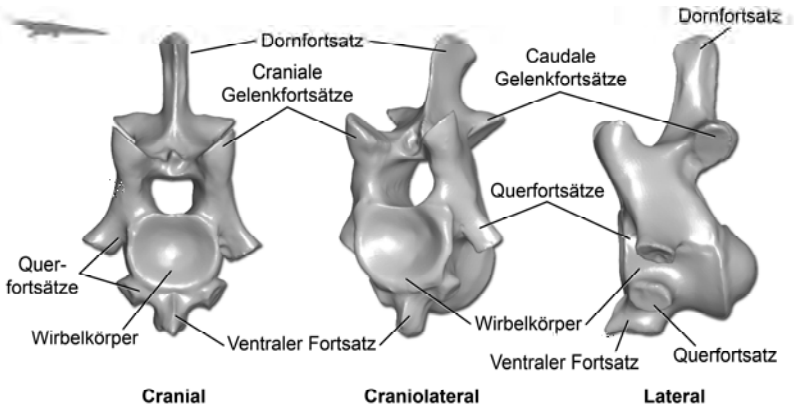


Abbildung 2. Grundaufbau eines Wirbels am Beispiel des Alligators (3D-rekonstruiertes Modell aus einem Laserscan). Grundsätzlich besteht er immer aus dem Wirbelkörper, dem Wirbelbogen (durch den das Rückenmark führt), zwei Querfortsätzen, einem Dornfortsatz und vier Gelenkfortsätzen.

den sich die Regionen in Bezug auf den Grad der Beweglichkeit. Der Hals (cervikale Wirbelregion) bildet die Verbindung zwischen dem Kopf und dem Rumpf und ist einer der beweglichsten Teile der Wirbelsäule. Im Gegensatz dazu stabilisiert die eher steife Brustwirbelsäule (thorakale Wirbelregion) den Thorax und trägt mit den Rippen zum Schutz der inneren Organe bei. Die Lendenwirbelsäule (lumbale Wirbelregion) erlaubt eine hohe dorsoventrale Beweglichkeit und spielt insbesondere bei Säugetieren eine entscheidende Rolle bei der Fortbewegung. Das Kreuzbein (sakrale Wirbelregion) besteht aus mehreren verwachsenen Wirbeln und stellt die Verbindung der Wirbelsäule mit dem Becken dar. Das Ilio-Sakral-Gelenk ist nur gering beweglich und ist bei der Übertragung der Kräfte, die bei der Fortbewegung durch die hinteren Extremitäten entstehen, beteiligt. Die Schwanzwirbelsäule (caudale Wirbelregion; z.T. nur mehr rudimentär als Steißbein) hat im Allgemeinen eine sehr große Beweglichkeit und kann zum Beispiel beim Greifen oder Schwimmen von Bedeutung sein.

Evolution und Entwicklung der Wirbelsäule

Bevor es zur evolutionären Entwicklung der knöchernen Wirbelsäule kam, hat sich die sogenannte Chorda dorsalis als Stützelement und Muskelansatzstelle entwickelt. Sie ist ein stabiler und elastischer Stab, der vom Kopf bis zur Schwanzspitze verläuft. Als Beispiel unter den heute lebenden Tieren ist das Lanzettfischchen (Gattung: *Branchiostoma*) zu nennen. Im Laufe der Evolution wurde die Chorda dorsalis von knorpeligen und später knöchernen Wirbelelementen unterbrochen und umschlossen. Einhergehend mit der evolutionären Landbesiedelung entstand eine tragende, knöcherne Wirbelsäule, die der zusätzlichen Einwirkung der Schwerkraft entgegenwirkt. Die Wirbelsäule ist kein einheitliches Gebilde, sondern zeigt eine große Variation sowohl zwischen den verschiedenen Tierarten als auch innerhalb der Wirbelsäule. Dies beinhaltet zum einen Unterschiede in der Form als auch in der Anzahl der Wirbel (Böhmer et al. 2019b; Böhmer et al. 2015a; Müller et al. 2010). Letzteres hängt insbesondere mit der sogenannten Somitogenese zusammen (Dequéant und Pourquie 2008). Die Somitogenese ist ein Prozeß in der Embryonalentwicklung von Wirbeltieren, bei dem sich durch Segmentierung kleine Zellpopulationen (Somiten) entlang der Körperlängsachse bilden (Abb. 3). Aus diesen Segmenten entwickeln sich nachfolgend unter anderem die Wirbel. Die Anzahl der Wirbel hängt davon ab, wie viele Somiten im Embryo angelegt werden. Dies kann je nach Tierart unterschiedlich sein. Meerschweinchen beispielsweise haben 35 Wirbel vom Kopf bis zum Schwanz (davon sind 7 Halswirbel und 13 Brustwirbel), während Kraniche insgesamt 47 Wirbel haben (davon sind 17 Halswirbel und 10 Brustwirbel) (Hiraga et al. 2014; Narita und Kuratani 2005). Die Unterteilung in verschiedene anatomische Regionen, wie zum Beispiel Hals- und Brustwirbelsäule, und damit die Form der Wirbel wird durch die Aktivität der *Hox* Gene während der Embryonalentwicklung bestimmt (Böhmer 2017; Böhmer et al. 2015b; Kessel und Gruss 1990; Mansfield und Abzhanov 2010). Durch Verschiebungen im Expressionsmuster der *Hox* Gene kann die Halswirbelsäule länger oder kürzer sein (Böhmer et al. 2015b; Burke et al. 1995).

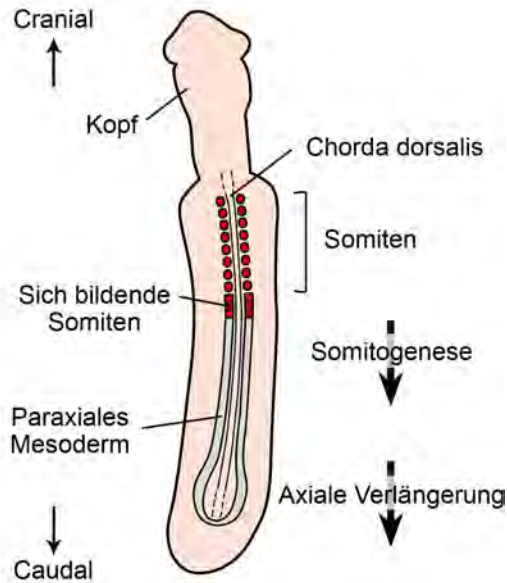


Abbildung 3. Somitogenese. Während der Embryonalentwicklung bilden sich vom mittleren Keimblatt (Mesoderm) in craniocaudaler Richtung die Somiten. Diese Zellpopulationen entwickeln sich nachfolgend zu Wirbeln (aus Böhmer 2013).

Der Hals als biomechanische Innovation

Die ältesten bekannten, fossilen Nachweise für den Hals stammen aus dem Devon. Das 375 Millionen Jahre alte Skelett von *Tiktaalik* (Downs et al. 2008) oder auch die fast komplett erhaltene Wirbelsäule von *Ichthyostega*, die in etwa 365 Millionen Jahre alten Sedimenten gefunden worden ist (Ahlberg et al. 2005), zeigen eine deutliche Halsregion. Diesen Fossilien ist gemeinsam, daß sie eines der bedeutsamsten Ereignisse in der Evolution des Lebens markieren: den Übergang vom Leben im Wasser zum Leben an Land. Dieser evolutionäre Übergang war nur durch eine Vielzahl an strukturellen und funktionellen Innovationen möglich. Der Bauplan der Wirbeltiere hat sich radikal geändert, da durch die terrestrische Lebensweise Elemente und Kräfte auf den Körper der Organismen wirkten, die im Wasser nicht oder nur in geringem Maße vorhanden sind. Beispielsweise hat sich die Lungenatmung entwickelt. Im Gegensatz zu den Kiemen ermöglicht die Lunge, daß der Körper Sauerstoff (O₂) in

Form von Gas aus der Atmosphäre aufnehmen kann. Als weiteres Beispiel ist die Entwicklung der Beine zu nennen. Die Extremitäten von aquatischen Tieren müssen das Gewicht des Körpers nicht tragen, da die im Wasser herrschende Auftriebskraft der Schwerkraft entgegenwirkt. An Land hingegen beeinflusst die Gravitation den Körper stärker und die Gliedmaßen von terrestrischen Lebewesen müssen die Last des Körpers aufnehmen. Die Wirkung der Schwerkraft führte aber nicht nur zur Evolution stabiler Beine, sondern auch zur Entwicklung des Halses. Der Hals der Wirbeltiere ist ein relativ eigenständiger, beweglicher Abschnitt der Wirbelsäule, der den Kopf mit dem Rest des Körpers verbindet. Zum einen ermöglicht er es, den Kopf gegen die Schwerkraft zu heben, was wichtig für die Fortbewegung an Land ist. Zum anderen erlaubt der Hals die unabhängige Bewegung des Kopfes vom restlichen Körper.

Beispiele für bioinspiriertes Design

Auf der Jagd nach Fischen tauchen Baßköpfe mit bis zu 24 m/s (umgerechnet rund 86 km/h) kopfüber in die Wasseroberfläche ein (Chang et al. 2016). Doch wie ist es den relativ langhalsigen Wasservögeln möglich, diese Kräfte unbeschadet zu überstehen, und wie können diese Erkenntnisse zur funktionellen Morphologie des Halses zu einer technischen Innovation beitragen? Eine aktuelle Studie zeigt, daß mehrere anatomische Anpassungen hierbei eine Rolle spielen. Zum einen verringert die spezielle, pfeilähnliche Kopfform den Reibungswiderstand beim Eindringen ins Wasser sehr stark. Zum anderen reduzieren die Vögel insbesondere durch die Abstimmung zwischen Anspannung der Halsmuskulatur und angepaßter Eintauchgeschwindigkeit das Risiko einer Halsverletzung. Basierend auf diesen Ergebnissen können nun Objekte konstruiert werden, die aus großer Höhe abgeworfen möglichst unbeschadet ins Wasser eintauchen können. Als Beispiel wären autonome Unterwassersensoren denkbar, die über dem Meer abgeworfen werden und nach erfolgreichem Abtauchen unter Wasser Messungen vornehmen.

Der Hals der Vögel ist nicht nur bei extremem Verhalten - wie dem oben erwähnten vertikalen Stoßtauchen - von entscheidender Bedeutung, sondern sorgt auch während der horizontalen Fortbewegung für eine Stabilisierung des Kopfes. Andernfalls würden die sensorischen Systeme zum Sehen und Hören durch die Bewegung im Raum durcheinandergebracht. Neben kompensatorischen Bewegungen der Augen, die das Bild



Abbildung 4. Während die Schwäne mit kräftigen Flügelschlägen durch die Lüfte fliegen, gleichen sie die Bewegungen mit ihrem Hals aus. So bleiben der Kopf und damit die sensorischen Organe in stabiler Position.

auf der Retina für eine klare Sicht stabilisieren, trägt der Hals entscheidend zur Stabilisierung des Kopfes bei. Dies wurde bei Säugetieren wie zum Beispiel bei Primaten oder Pferden untersucht (Dunbar et al. 2008; Pozzo et al. 1990) und ist noch eindrucksvoller bei langhalsigen, fliegenden Vögeln zu erkennen (Pete et al. 2015). Schwäne fliegen durch teilweise heftige Schläge ihrer ausgebreiteten Flügel, was zu Bewegungen im ganzen Körper führt (Abb. 4). Der Kopf jedoch verharrt während des Fluges nahezu regungslos in der gleichen Position. Dafür sorgen komplexe Ausgleichsbewegungen der Halswirbelsäule - ähnlich einer Federung (Pete et al. 2015). Diese komplexen Bewegungen wurden erstmals mittels Hochgeschwindigkeitsvideos von fliegenden Vögeln in Kombination mit speziellen Computersimulationen untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für ein mechanisches Federungssystem für Kamera-Drohnen, das für eine effektivere Stabilisierung von Videoaufnahmen sorgt.

Im Verhältnis zu ihrer Körpergröße sind Vögel extrem leicht. Dies wird durch hohle bzw. pneumatisierte Knochen erreicht und ist eine effiziente Anpassung an das Fliegen. Mit der Evolution des aktiven Fluges haben sich die Vordergliedmaßen der Vögel zu extrem spezialisierten Strukturen - den Flügeln - entwickelt. Diese strukturelle Umwandlung

limitiert erheblich die funktionale Vielseitigkeit der vorderen Extremitäten. Dies steht im direkten Kontrast zu den Flügeln der Fledermäuse, die die Tiere nicht nur zum Fliegen, sondern auch zum Greifen und Manipulieren von Nahrung nutzen (Vaughan und Bateman 1970). Als Konsequenz der eingeschränkten Funktionalität der Vordergliedmaßen wurde der Hals der Vögel zum funktionalen Äquivalent der Arme (Böhmer et al. 2019b). In Kombination mit dem Schnabel kann das Kopf-Hals-System sogar als werkzeugtragendes Element angesehen werden. Somit ist der Vogelhals nicht nur eine simple Verbindung zwischen Kopf und Körper, sondern eine hoch komplexe Struktur, die vielseitige Aufgaben übernimmt; wie zum Beispiel bei der Nahrungsaufnahme, Manipulation, Gefiederpflege, Balzverhalten, Nestbau und Kampfverhalten. Einige Vogelarten benutzen ihren Hals sogar für sehr spezielle Aktivitäten wie z.B. Klettern unter Zuhilfenahme ihres Schnabels. Diese „dreibeinige“ Fortbewegungsweise kann bei vielen Papageienarten beobachtet werden (Dilger 1960). Spechte sind für ihre außergewöhnliche Fähigkeit bekannt, tiefe Löcher in Baumstämmen zu meißeln (Puverel et al. 2019; Spring 1965). Die Leichtbauweise (pneumatisierte Wirbel), die funktionelle Vielseitigkeit sowie die Kombination aus präzisen und kraftvollen Bewegungen machen den Vogelhals zu einem höchstinteressanten Vorbild für bioinspiriertes Design (Abourachid et al. 2018). Insbesondere die Idee, den Hals der Vögel als Modell für einen Weichkörper-Roboter-Arm zu verwenden, wird zur Zeit intensiv untersucht (Abb. 5) (Böhmer et al. 2019a; Fasquelle et al. 2019; Furet et al. 2018a; Furet et al. 2018b; Furet und Wenger 2018; Van Riesen et al. 2018). Das besondere Augenmerk liegt hierbei sowohl auf einer Verbesserung der Funktion, aber auch der Sicherheit in Bezug auf die Mensch-Maschine-Interaktion. Die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK; auf englisch: Human-Robot Collaboration, HRC) bedeutet, daß sich Menschen und automatisierte Maschinen den gleichen Arbeitsraum teilen und ohne trennende Schutzeinrichtung gleichzeitig arbeiten (Villani et al. 2018). Sowohl Präzision in den Bewegungen als auch das Konzept eines hybriden Weichkörper-Roboters sind in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse, da sie die Risiken von Unfällen drastisch reduzieren können. Dem eigentlichen Design eines technischen Modells geht ein grundlegendes Verständnis der Form-Funktions-Beziehungen im muskuloskeletalen System der Halswirbelsäule voraus (Böhmer et al. 2018; Böhmer et al. 2019a). Die strukturelle Basis für die vielseitigen Bewegungen des Halses liegt in der Muskulatur und

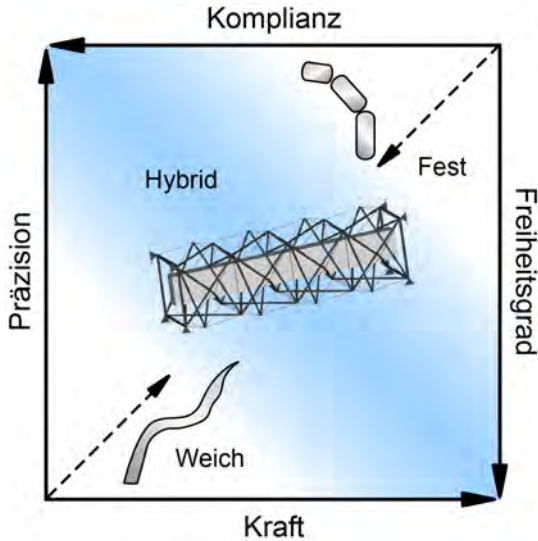


Abbildung 5. Schematischer Vergleich der Eigenschaften von weichen, hybriden und festen Roboterarmen. Hybride Roboter liegen in einem wenig erforschtem Design-Raum (blau unterlegt) (verändert nach Culha et al. 2016).

den Knochen. Als Erstes müssen daher die anatomischen Parameter extrahiert werden, die beispielsweise für die präzisen und kraftvollen Bewegungen des Spechtes beim Hämmern essentiell sind (Böhmer et al. 2019a). Die Konzeptualisierung der extrem komplexen Muskulatur des Vogelhalses zeigt die Spezialisierung in der Anatomie auf. Schließlich können die aus der funktionell-morphologischen Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse dazu genutzt werden, einen Prototypen des Specht-halses zu entwickeln, der als Ausgangspunkt für weitere Erfindungen dient.

Schlußbemerkungen

Effektive Konstruktionen in der Natur zu finden und darauf basierend Strukturen zu entwerfen, wird als Bioinspiration bezeichnet und ist eindeutig von Biomimetik (direktes Nachahmen) zu unterscheiden. Im Gegensatz zur Naturkopie, bedeutet die Naturabstraktion, daß die morphologische Prinzipfunktion einer biologischen Struktur verstanden werden

muß, um anschließend eine technische Realisation für das Prinzip zu finden. Der Hals ist eine biomechanische Innovation, die entscheidend zur Diversifizierung der Wirbeltiere beigetragen hat. Erkenntnisse aus der funktionellen Morphologie des Halses können dazu beitragen, Designprinzipien für technische Anwendungen zu entwickeln. Der Einsatzbereich der Bionik ist dabei sehr vielfältig und kann neben Konstruktionsprinzipien auch Materialeigenschaften und Verhaltensweisen betreffen (Nachtigall und Wissler 2013). Die Bionik ist eine etablierte Innovationsmethode, die eine Vielzahl an Technologien, Produktoptimierungen und Neuentwicklungen hervorgebracht hat.

Danksagungen

Ich möchte mich herzlich bei PD Dr. Ingmar Werneburg (Senckenberg Center for Human Evolution and Palaeoenvironment Tübingen) und Prof. Dr. Oliver Betz (Universität Tübingen) dafür bedanken, daß sie mir die Möglichkeit gegeben haben, dieses kurze Essay zu veröffentlichen. Die Wirbelsäule und insbesondere der Hals sind in meinen Augen eine besonders faszinierende Struktur der Wirbeltiere, da sie aus zahlreichen Elementen (den Wirbeln) bestehen, die durch ein komplexes System an Muskeln und Sehnen stabil und in Bewegung gehalten werden. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Anick Abourachid (Muséum National d'Histoire Naturelle Paris) für die Überlassung des Themas. Die vorliegende Arbeit wurde von der Agence Nationale de la Recherche (ANR) im Rahmen des Forschungsprojekts „AVINECK – The neck of birds, an arm for robots“ (#ANR-16-CE33-0025, Projektkoordinatorin: A. Abourachid.) gefördert.

Literatur

- Abourachid A, Plateau O, Cornette R, Van Wassenbergh S, Provini P, Böhmer C. (2018). Avineck, the neck of birds, an arm for robots *Society for Experimental Biology (SEB)*. Florence. 159.
- Ahlberg PE, Clack JA, Blom H. (2005). The axial skeleton of the Devonian tetrapod *Ichthyostega*. *Nature* 437: 137-140.
- Böhmer C. (2013). Correlation between vertebral *Hox* code and vertebral morphology in archosaurs: implications for vertebral evolution in sauropodomorph dinosaurs. Unpublished PhD Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität.
- Böhmer C. (2017). Correlation between *Hox* code and vertebral morphology in the mouse: towards a universal model for Synapsida. *Zoological Letters* 3: 1-11.
- Böhmer C, Aladini M, Chummun V, Plateau O, Cornette R, Duriez O, Abourachid A. (2018). Ripper vs. gulper: biomechanical adaptations in the neck of sympatric vultures *Society for Experimental Biology (SEB)* Florence. 150.
- Böhmer C, Furet M, Fasquelle B, Wenger P, Chablat D, Chevallereau C, Abourachid A. (2019a). Combining precision and power to maximize performance: a case study of the woodpecker's neck *44ème Congrès de la Société de Biomécanique*. Poitiers. 1-2.

- Böhmer C, Plateau O, Cornette R, Abourachid A. (2019b). Correlated evolution of neck length and leg length in birds. *R Soc Open Sci* 6: 181588.
- Böhmer C, Rauhut OWM, Wörheide G. (2015a). Correlation between *Hox* code and vertebral morphology in archosaurs. *Proceedings of the Royal Society London B* 282: 20150077.
- Böhmer C, Rauhut OWM, Wörheide G. (2015b). New insights into the vertebral Hox code of archosaurs. *Evolution & Development* 17: 258-269.
- Burke AC, Nelson CE, Morgan BA, Tabin C. (1995). *Hox* genes and the evolution of vertebrate axial morphology. *Development* 121: 333-346.
- Chang B, Croson M, Straker L, Gart S, Dove C, Gerwin J, Jung S. (2016). How seabirds plunge-dive without injuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 113: 12006-12011.
- Culha U, Hughes J, Rosendo A, Giardina F, Iida F. (2016). Design principles for soft-rigid hybrid manipulators. In: Laschi C, Rossiter J, Iida F, Cianchetti M and Margheri L, eds. *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges. Biosystems & Biorobotics*. Cham: Springer. 87-94.
- Dequécant ML, Pourquie O. (2008). Segmental patterning of the vertebrate embryonic axis. *Nature Review Genetics* 9: 370-382.
- Dilger WC. (1960). The comparative ethology of the African parrot genus *Agapornis*. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 17: 649-685.
- Downs JP, Daeschler EB, Jenkins FA, Jr., Shubin NH. (2008). The cranial endoskeleton of *Tiktaalik roseae*. *Nature* 455: 925-929.
- Dunbar DC, Macpherson JM, Simmons RW, Zarcades A. (2008). Stabilization and mobility of the head, neck and trunk in horses during overground locomotion: comparisons with humans and other primates. *Journal of Experimental Biology* 211: 3889-3907.
- Fasquelle B, Furet M, Abourachid A, Böhmer C, Chablat D, Chevallereau C, Wenger P. (2019). Modelliling, design and control of a bird neck using tensegrity mechanisms *IEEE International Conference on Robotics and Automation, Tensegrity Workshop*. Montreal, Canada.
- Furet M, Lettl M, Wenger P. (2018a). Kinematic analysis of planar tensegrity 2-X manipulators *16th International Symposium on Advances in Robot Kinematics*. Bologna.
- Furet M, Van Riesen A, Chevallereau C, Wenger P. (2018b). Optimal design of tensegrity mechanisms used in a bird neck model *European Conference on Mechanism Science*. 365-375.
- Furet M, Wenger P. (2018). Workspace and cuspidality analysis of a 2-X planar manipulator *4th IFToMM Symposium on Mechanism Design for Robotics*.
- Hildebrand M, Goslow GE. (2004). *Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere*. Springer Verlag: Berlin und Heidelberg.
- Hiraga T, Sakamoto H, Nishikawa S, Muneuchi I, Ueda H, Inoue M, Shimura R, Uebayashi A, Yasuda N, Momose K, Masatomi H, Teraoka H. (2014). Vertebral formula in red-crowned crane (*Grus japonensis*) and hooded crane (*Grus monacha*). *Journal of Veterinary Medical Science* 76: 503-508.
- Jones KE, Angielczyk KD, Polly PD, Head JJ, Fernandez V, Lungmus JK, Tulga S, Pierce SE. (2018). Fossils reveal the complex evolutionary history of the mammalian regionalized spine. *Science* 361: 1249-1252.
- Kessel M, Gruss P. (1990). Murine developmental control genes. *Science* 249: 374-379.

- Kummer B. (1960). Beziehungen zwischen der mechanischen Funktion und dem Bau der Wirbelsäule bei quadrupeden Säugetieren. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 74: 159-167.
- Mansfield JH, Abzhanov A. (2010). *Hox* expression in the American alligator and evolution of archosaurian axial patterning. *Journal of Experimental Zoology Part B Molecular and Developmental Evolution* 314: 1-16.
- Müller J, Scheyer TM, Head JJ, Barrett PM, Werneburg I, Ericson PGP, Pol D, Sánchez-Villagra MR. (2010). Homeotic effects, somitogenesis and the evolution of vertebral numbers in recent and fossil amniotes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 2118-2123.
- Nachtigall W. (2010). *Bionik als Wissenschaft*. Springer-Verlag: Heidelberg.
- Nachtigall W. (2020). Zur Vorgehensweise bei Natur-Technik-Vergleichen. In: Werneburg I and Betz O, eds. *Phylogenie, Funktionsmorphologie und Bionik. Texte zum 60. Phylogenetischen Symposium Tübingen*. Tübingen: Scidinge Hall Verlag. XX-XX.
- Nachtigall W, Wisser A. (2013). *Bionik in Beispielen*. Springer Spektrum: Berlin.
- Narita Y, Kuratani S. (2005). Evolution of the vertebral formulae in mammals: a perspective on developmental constraints. *Journal of Experimental Zoology Part B Molecular and Developmental Evolution* 304: 91-106.
- Pete AE, Kress D, Dimitrov MA, Lentink D. (2015). The role of passive avian head stabilization in flapping flight. *Journal of the Royal Society Interface* 12: 0508.
- Pozzo T, Berthoz A, Lefort L. (1990). Head stabilization during various locomotor tasks in humans. I. Normal subjects. *Experimental Brain Research* 82: 97-106.
- Puverel C, Abourachid A, Böhmer C, Leban J-M, Paillet Y. (2019). This is my spot: characteristics of trees bearing Black Woodpecker cavities *International Woodpecker Conference*. Białowieża, Poland.
- Slijper EJ. (1946). Comparative biologic-anatomical investigation on the vertebral column and spinal musculature of mammals. *Verhandelingen Der Koninklijke Nederlandse Akademie Van Wetenschappen, Afdeling Naturkunde, Tweede Sectie* 42: 1-128.
- Spring LW. (1965). Climbing and pecking adaptations in some North American woodpeckers. *The Condor* 67: 457-488.
- Van Riesen A, Furet M, Chevallereau C, Wenger P eds. (2018). *Dynamic analysis and control of an antagonistically actuated tensegrity mechanism*. Cham: Springer.
- Vaughan TA, Bateman GC. (1970). Functional morphology of the forelimb of mormoopid bats. *Journal of Mammalogy* 51: 217-235.
- Villani V, Pini F, Leali F, Secchi C. (2018). Survey on human-robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics* 55: 248-266.