

Von der Natur lernen: Bionik als Schlüssel zu umweltverträglicheren Praktiken des Wirtschaftens

Ille C. Gebeshuber

Institut für Angewandte Physik, TU Wien

gebeshuber@iap.tuwien.ac.at

1. Einleitung und Kontextualisierung

In den letzten Jahrzehnten ist die Notwendigkeit, unsere Wirtschaft nachhaltiger zu gestalten, immer dringlicher geworden [UN SDGs, 2024] [Agenda 2030, 2024]. Klimawandel [IPCC, 2023], Ressourcenknappheit [UNEP, 2024] und der Verlust an Biodiversität [UNEP, 2020] zwingen uns, neue Wege zu finden, wie wir Produkte und Prozesse gestalten, die den ökologischen und sozialen Herausforderungen unserer Zeit gerecht werden. Hier setzt das Konzept des bionischen Wirtschaftens an, das sich von den Prinzipien der Natur inspirieren lässt, um innovative und umweltverträgliche Lösungen zu entwickeln [Gebeshuber, 2023].

Bionik, ein interdisziplinäres Forschungsgebiet, das sich aus der Biologie und Technik speist, bietet eine Fülle an Vorbildern aus der Natur, die uns helfen können, effizientere und ressourcenschonendere Technologien zu entwickeln [Gebeshuber et al, 2009; Gebeshuber, 2016] [VDI, 2023]. Die Natur, mit Milliarden von Jahren an evolutionärer Optimierung, hat Mechanismen und Systeme hervorgebracht, die in ihrer Effizienz und Anpassungsfähigkeit beispiellos sind. Diese Mechanismen und Systeme können, wenn sie richtig verstanden und angewendet werden, die Grundlage für umweltverträglichere Praktiken des Wirtschaftens bilden, die im Einklang mit den ökologischen Grenzen unseres Planeten [Steffen et al, 2015] stehen.

Der vorliegende Beitrag untersucht, wie bionische Prinzipien auf wirtschaftlich relevante Prozesse übertragen werden können, um eine nachhaltigere Zukunft zu gestalten. Dabei wird aufgezeigt, wie die Integration von biologischen Erkenntnissen in technische Anwendungen nicht nur die Effizienz steigern, sondern auch neue Möglichkeiten für eine ressourcenschonende Produktion eröffnen kann.

Zentrale Fragen, die in diesem Beitrag adressiert werden, umfassen:

- Wie kann bionisches Wirtschaften konkret aussehen und welche Pilotprojekte zeigen bereits Erfolg?
- Welche Rolle spielen rechtliche und politische Rahmenbedingungen bei der Implementierung bionischer Prinzipien in der Wirtschaft?
- Wie können wir ein Umdenken in der Gesellschaft fördern, das die Natur nicht als Ressource, sondern als Partner betrachtet?

Durch die Untersuchung dieser Fragen wird deutlich, dass bionisches Wirtschaften nicht nur eine technische Herausforderung darstellt, sondern auch tiefgreifende soziale und politische Veränderungen erfordert. Es wird gezeigt, dass die Bionik ein mächtiges Werkzeug sein kann, um die dringend benötigte Transformation hin zu einer nachhaltigeren und gerechteren Wirtschaft [Fraunhofer, 2018] zu unterstützen.

Dieser Beitrag möchte dazu anregen, die Potenziale bionischen Wirtschaftens im eigenen Bereich zu erkunden und über die Möglichkeiten nachzudenken, wie wir gemeinsam eine zukunftsfähige Wirtschaft gestalten können. Denn die Natur bietet uns eine Fülle von Lösungen – es liegt an uns, diese zu erkennen und in die Praxis umzusetzen.

2. Pilotprojekte und Beispiele bionischen Wirtschaftens

Die Anwendung bionischer Prinzipien in Praktiken des Wirtschaftens bietet enorme Potenziale, um nachhaltige und umweltverträgliche Lösungen zu entwickeln. Besonders hervorzuheben ist der Einsatz chemisch einfacher, biobasierter und biologisch abbaubarer Materialien, die nicht nur die Ressourceneffizienz steigern, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des globalen Müllproblems leisten können. Im Folgenden werden einige wegweisende Pilotprojekte und Beispiele vorgestellt, die verdeutlichen, wie bionisches Wirtschaften bereits heute in verschiedenen Bereichen erfolgreich umgesetzt wird.

2.1. Mechanische Bakterizide inspiriert von Zikadenflügeln

Ein herausragendes Beispiel für bionische Innovation ist die Entwicklung mechanischer bakterizider Oberflächen, die von den Nanostrukturen der Zikadenflügel inspiriert sind [Ivanova, 2012]. Zikadenflügel besitzen winzige Säulenstrukturen auf ihrer Oberfläche, die Bakterienzellen mechanisch zerstören, sobald sie in Kontakt kommen (**Abb. 1**). Diese antibakterielle Wirkung ist besonders bemerkenswert, da sie nicht auf chemischen Substanzen beruht, die Resistenzen verursachen könnten, sondern rein physikalisch wirkt.

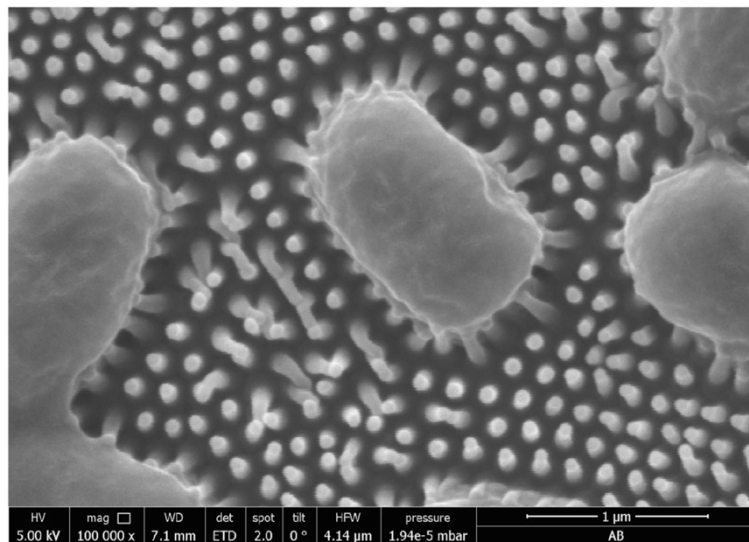


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Flügels der kleinen bronzefarbenen Singzikade *Kikihia scutellaris*, mit toten *E. coli* Bakterien. Skalierungsbalken: 1 µm (also etwa 1/100 des Durchmessers eines Haares). © 2023 Alexander Bürger & Karin Whitmore, TU Wien.

Forscher*innen haben gezeigt, dass diese Nanostrukturen nicht nur auf den natürlichen Flügeln funktionieren, sondern auch in synthetischen Abdrücken von Zikadenflügeln, die in technisch interessante Materialien integriert werden können [van Nieuwenhoven et al, 2024]. Der Vorteil dieser Technologie ist, dass sie auch gegen multiresistente Bakterienstämme wirksam ist, während sie für Säugetierzellen, die deutlich weicher sind, ungefährlich bleibt. Diese mechanisch wirkenden Oberflächen bieten somit großes Potenzial für Anwendungen in der Medizin, wie zum Beispiel in chirurgischen Instrumenten oder Implantaten, um das Risiko von Infektionen zu verringern, ohne die Entwicklung von Resistenzen zu fördern, aber auch für funktionale Beschichtungen an Türklinken und Handläufen im öffentlichen Raum.

2.2. Phytomining: Bergbau mit Pflanzen

Ein weiteres innovatives Beispiel ist das sogenannte „Phytomining“, eine Methode, bei der bestimmte Pflanzenarten genutzt werden, um wertvolle Metalle aus dem Boden aufzunehmen und in ihren Geweben zu speichern [Brooks et al, 1998]. Diese Pflanzen, die als „Hyperakkumulatoren“ bekannt sind, können auf kontaminierten Böden angebaut werden, um Metalle wie Nickel, Zink oder Gold zu extrahieren [Karman et al, 2015]. Diese Methode des

Bergbaus ist nicht nur umweltfreundlicher als traditionelle Methoden, sondern hilft auch, kontaminierte Böden zu sanieren.

Photomining könnte in Zukunft eine Schlüsseltechnologie für den nachhaltigen Rohstoffabbau werden, da es den Einsatz chemischer Extraktionsmittel überflüssig macht und gleichzeitig die natürliche Regeneration von Böden unterstützt. Forscher*innen in diesem Bereich arbeiten daran, geeignete Anbaumethoden zu entwickeln, um Photomining zu einer wirtschaftlich tragfähigen Alternative zum konventionellen Bergbau zu machen [Anderson, 2013]. Alternativ kann man auch von den Pflanzen lernen und entsprechende biomimetische Technologien entwickeln, die zur Reinigung von Erdreich, Flüssen oder Industrieabfällen verwendet werden können.

2.3. Strukturfarben inspiriert von Schmetterlingen

Strukturfarben [Kinoshita, 2008] sind ein weiteres faszinierendes Beispiel für bionische Innovationen. Diese Farben entstehen nicht durch Pigmente, sondern durch winzige, regelmäßig angeordnete Strukturen, die derart optisch mit dem Licht wechselwirken, dass spezifische Farben sichtbar werden. Diese Funktionalität findet sich in der Natur beispielsweise bei Schmetterlingsflügeln oder den Federn von Pfauen, aber auch bei Pflanzen und Mikroorganismen, und sogar bei Viren [Gebeshuber und Lee, 2016].

Durch die Nachahmung dieser natürlichen Strukturen können Farben erzeugt werden, die intensiver und langlebiger sind als herkömmliche Farbstoffe [Zobl, 2016]. Zudem bieten strukturbasierte Farben den Vorteil, dass sie aus biobasierten und biologisch abbaubaren Materialien hergestellt werden können, was einen wesentlichen Beitrag zur Müllreduktion leistet. Anwendungen für diese Technologie reichen von nachhaltiger Kleidung über Verpackungen bis hin zu dekorativen Oberflächen in Architektur und Design.

2.4 Passive Strahlungskühlung inspiriert von der Sahara-Wüstenameise

Eine weitere bemerkenswerte bionische Innovation für die Wirtschaft ist die Entwicklung von passiven Kühltechnologien, die von der Sahara-Wüstenameise inspiriert sind [Shi et al, 2015]. Diese Ameise kann selbst bei extrem hohen Temperaturen überleben, indem sie spezielle Strukturen auf ihrem Körper nutzt, die Wärme in den Weltraum abstrahlen [Ma, 2020].

Forscher*innen haben diese Prinzipien genutzt, um passive Kühlsysteme zu entwickeln, die ohne Energiezufuhr funktionieren [Wang et al, 2021]. Durch die Integration der Strukturen von Wüstenameisen in Materialien wie Chitin, das aus Abfällen der Shrimpsindustrie [Nirmal et al, 2020] gewonnen wird, soll es möglich werden, Gebäude und andere Infrastrukturen effizient zu kühlen, ohne auf konventionelle Klimaanlage angewiesen zu sein. Dies könnte besonders in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung von großem Nutzen sein und gleichzeitig zur Reduzierung des Energieverbrauchs beitragen.

Chitin ist erstaunlich widerstandsfähig, wie die rasterelektronische Aufnahme von Flügelschuppen von Schmetterlingen zeigt, die vor mehr als 60 Jahren gesammelt wurden (**Abb. 2**) (https://www.technischesmuseum.at/tmw-zine/bioinspiration-zine/lernen_vom_schmetterling).

2.5. Pflanzengallen als Inspiration für selbstwachsende Technologien

Pflanzengallen, die von Gallwespen erzeugt werden, stellen komplexe funktionale Einheiten dar, die Pflanzen als Reaktion auf die Injektion von Chemikalien durch die Wespen entwickeln. Diese Gallen dienen als Schutz und Nährstoffquelle für die Larven der Wespen und sind in ihrer Form und Funktion hochspezialisiert [Küster, 1911].

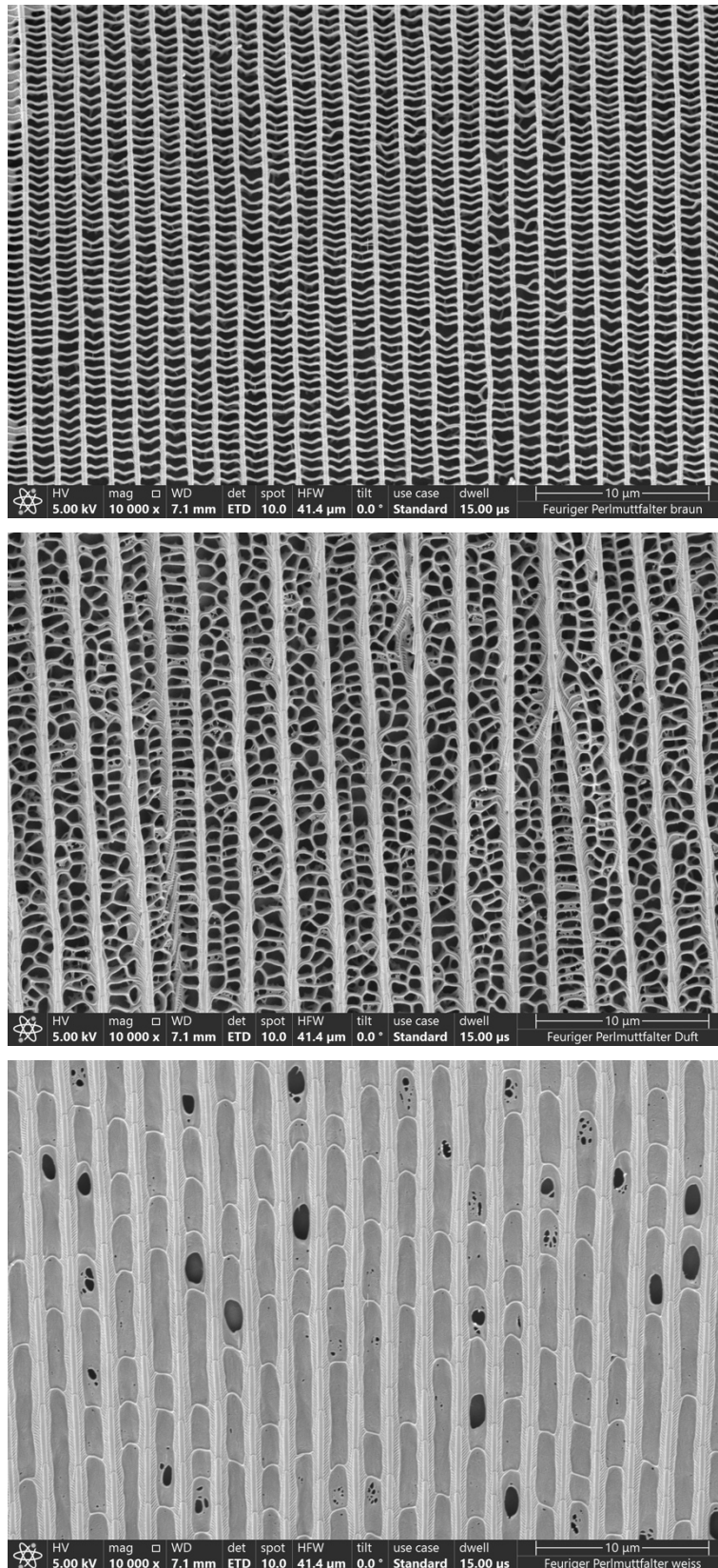


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Details auf drei verschiedenen Flügelschuppen des Feurigen Perlmutterfalters. Oben: braune Schuppe. Mitte: Duftschuppe. Unten: weiße Schuppe. Skalierungsbalken: 10 μm (also etwa 1/10 des Durchmessers eines Haares).

© 2023 Florian Zischka & Karin Whitmore, TU Wien.

Derartige selbstwachsenden Strukturen sollen als Vorbild für neue Technologien dienen, die sich an veränderte Umweltbedingungen anpassen und selbstständig wachsen oder reparieren können. Die Forschung in diesem Bereich steht noch am Anfang [Gebeshuber und van Nieuvenhoven, 2024a & 2024b], aber das Potenzial für Anwendungen in der Bauindustrie oder in der Entwicklung von Biomaterialien ist enorm.

2.6 Engineered Living Materials (ELMs)

Ein faszinierendes und innovatives Beispiel für bionisches Wirtschaftens sind die sogenannten Engineered Living Materials (ELMs, <https://www.livingmaterials2024.de>). Diese Materialien kombinieren traditionelle Bau- und Werkstoffe mit lebenden Organismen, die in der Lage sind, auf Umweltveränderungen zu reagieren und sich selbst zu reparieren. Ein bemerkenswertes Beispiel sind Betonsorten, in die spezielle Bakterien eingearbeitet werden. Diese Bakterien bleiben inaktiv, bis ein Riss im Beton entsteht. Sobald Wasser in den Riss eindringt, werden die Bakterien aktiv und produzieren Kalziumkarbonat, das den Riss füllt und den Beton heilt (<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/selbstheilender-beton-wie-bakterien-risse-wieder-schliessen-koennen/>). Dies verbessert nicht nur die Langlebigkeit des Materials, sondern reduziert auch die Notwendigkeit für teure und energieintensive Reparaturen. Darüber hinaus wird in anderen Projekten untersucht, wie lebende Pflanzenstrukturen für technische Zwecke genutzt werden können. In Indien und Indonesien zum Beispiel werden Brücken aus lebendigen Pflanzenmaterialien gebaut, die sich durch natürliche Wachstumsprozesse selbst verstärken und anpassen (<https://www.nationalgeographic.de/reise-und-abenteuer/2018/03/die-lebenden-wurzelbruecken-indiens>). Solche Ansätze zeigen, dass ELMs das Potenzial haben, die Art und Weise, wie wir Materialien in der Technik einsetzen, grundlegend zu verändern, indem sie biologische Prinzipien wie Reparaturfähigkeit und Ressourceneffizienz nutzen.

3. Rahmenbedingungen für bionische Praktiken des Wirtschaftens

Die erfolgreiche Implementierung bionischer Prinzipien in der Wirtschaft hängt nicht nur von technologischen Innovationen ab, sondern erfordert auch passende rechtliche, politische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Diese Bedingungen spielen eine entscheidende Rolle dabei, ob und wie neue Technologien und Methoden in der Praxis Anwendung finden können.

3.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Ein zentraler Aspekt für die Etablierung bionischen Wirtschaftens ist die Anpassung und Entwicklung von rechtlichen Rahmenbedingungen, die Innovationen fördern und gleichzeitig ökologische und soziale Nachhaltigkeit sicherstellen. Beispielsweise könnten regulatorische Anreize geschaffen werden, um Unternehmen zu ermutigen, auf biobasierte und biologisch abbaubare Materialien umzusteigen (<https://www.ffg.at/produktion-der-zukunft-das-foerderprogramm>). Hierzu könnten Steuererleichterungen oder Subventionen für Unternehmen gehören, die in Forschung und Entwicklung im Bereich der Bionik investieren.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Schutz geistigen Eigentums. Während Patente Innovationen schützen sollen, dürfen sie nicht zu einem Hindernis für die Weiterentwicklung und Verbreitung bionischer Technologien werden. Es ist daher notwendig, rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die einerseits den Schutz innovativer Ideen gewährleisten, andererseits aber auch die Zusammenarbeit und den Wissenstransfer zwischen Forschungseinrichtungen und der Industrie fördern.

Auch die Standardisierung spielt eine wichtige Rolle. Die Entwicklung von Normen und Richtlinien, wie sie beispielsweise durch den Verein Deutscher Ingenieure (VDI) im Bereich der Bionik erarbeitet wurden (<https://www.vdi.de/tg-fachgesellschaften/vdi-gesellschaft-technologies-of-life-sciences/bionik>), schafft Vertrauen und Planungssicherheit für Unternehmen, die bionische Prinzipien in ihre Produkte und Prozesse integrieren wollen

[VDI, 2023]. Diese Standards können als Leitfaden dienen, um bionische Praktiken des Wirtschaftens auf eine breite Basis zu stellen und die Qualität der entwickelten Produkte und Verfahren sicherzustellen .

3.2 Politische Rahmenbedingungen

Auf politischer Ebene ist die Schaffung eines Umfelds notwendig, das Innovationen im Bereich des bionischen Wirtschaftens fördert und unterstützt. Dies könnte durch nationale und internationale Strategien zur Förderung nachhaltiger Technologien geschehen, wie z.B. durch das Einrichten spezieller Förderprogramme für bionische Forschung und Entwicklung.

Ein Beispiel für eine solche Initiative könnte ein „Bionik-Innovationsfonds“ sein, der Start-ups und Forschungsprojekten finanzielle Unterstützung bietet, die sich mit der Entwicklung bionischer Lösungen befassen. Darüber hinaus sollten Regierungen den Dialog zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft fördern, sich auf breiter Basis mit neuen Technologien auseinandersetzen und sicherstellen, dass diese im Sinne der Nachhaltigkeit eingesetzt werden.

Eine weitere politische Maßnahme könnte die Förderung von Bildungsprogrammen im Bereich der Bionik und der nachhaltigen Wirtschaft sein. Durch die Integration von Bionik in schulische und universitäre Lehrpläne könnten zukünftige Generationen besser auf die Herausforderungen einer nachhaltigen Wirtschaft vorbereitet werden.

3.3 Gesellschaftliche Rahmenbedingungen

Neben den rechtlichen und politischen Voraussetzungen spielt auch die gesellschaftliche Akzeptanz eine entscheidende Rolle für die Implementierung bionischer Prinzipien in neue Praktiken in der Wirtschaft. Es bedarf eines Bewusstseinswandels in der Gesellschaft, der die Natur nicht mehr als bloße Ressource, sondern als wertvollen Partner begreift [Gebeshuber und Macqueen, 2014]. Hierbei sind Aufklärungs- und Bildungsmaßnahmen von großer Bedeutung. Durch gezielte Informationskampagnen kann das Verständnis für bionische Technologien gefördert werden [Gebeshuber et al, 2024]. Auch die Einbindung der Gesellschaft in den Innovationsprozess, etwa durch partizipative Formate oder Bürgerbeteiligungen, kann dazu beitragen, bionische Lösungen besser in den Alltag der Menschen zu integrieren. Ein weiterer Aspekt ist die Förderung einer Kreislaufwirtschaft, in der Produkte am Ende ihres Lebenszyklus vollständig recycelt oder biologisch abgebaut werden können. Dies erfordert nicht nur technische Lösungen, sondern auch eine Veränderung der Konsum-gewohnheiten und ein Umdenken in der Art und Weise, wie wir mit Ressourcen umgehen.

4. Relevanz für den Track „Wissen zwischen Medien und Wissenschaft“

Der vorliegende Beitrag zum Thema bionisches Wirtschaften fügt sich nahtlos in den Kontext des Tracks „Wissen zwischen Medien und Wissenschaft“ ein. Die Vermittlung komplexer wissenschaftlicher Konzepte wie der Bionik an eine breite Öffentlichkeit stellt eine wesentliche Herausforderung dar, insbesondere wenn es darum geht, das Verständnis und die Akzeptanz für neue Technologien zu fördern, die auf diesen Prinzipien basieren.

Dieser Track beschäftigt sich mit der Frage, wie wissenschaftliche Erkenntnisse effektiv kommuniziert werden können, um sowohl in den Medien als auch in der Gesellschaft ein fundiertes Bewusstsein für die Möglichkeiten und Grenzen moderner Technologien zu schaffen. Das Etablieren bionischer Praktiken des Wirtschaftens, die sich an den Prinzipien der Natur orientieren, bietet dabei ein hervorragendes Beispiel dafür, wie Wissenschaft und Technik gemeinsam Lösungen für drängende globale Herausforderungen entwickeln können.

Der Beitrag zeigt auf, wie durch gezielte Kommunikation und die Schaffung passender Rahmenbedingungen die Innovationskraft der Bionik genutzt werden kann, um nachhaltige

Wirtschaftspraktiken zu etablieren. Dabei ist es entscheidend, dass wissenschaftliche Erkenntnisse in einer Weise vermittelt werden, die für ein breites Publikum verständlich ist und gleichzeitig die wissenschaftliche Integrität wahrt. Indem der Beitrag die Verbindung zwischen Bionik, Wirtschaft und Gesellschaft beleuchtet, leistet er einen wichtigen Beitrag zur Diskussion über die Rolle der Wissenschaft in der Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft. Er zeigt auf, wie die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Medien und Öffentlichkeit dazu beitragen kann, bionische Innovationen nicht nur technologisch voranzutreiben, sondern auch gesellschaftlich zu verankern.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Bionisches Wirtschaften bietet eine vielversprechende Perspektive für die Entwicklung nachhaltiger und umweltverträglicher Wirtschaftspraktiken. Die Natur zeigt uns, dass Effizienz, Anpassungsfähigkeit und Ressourcenschonung keine Gegensätze sind, sondern sich gegenseitig bedingen können. Indem wir die Prinzipien der Bionik auf ökonomische Prozesse übertragen, können wir neue Wege finden, die Herausforderungen unserer Zeit zu bewältigen.

Die erfolgreichen Pilotprojekte, die in diesem Beitrag vorgestellt wurden, zeigen das Potenzial bionischer Innovationen in verschiedenen Bereichen, von der Medizintechnik über den Bergbau bis hin zur Materialwissenschaft. Diese Beispiele verdeutlichen, dass bionisches Wirtschaften nicht nur eine technische Vision, sondern bereits heute in vielen Bereichen Realität ist. Um jedoch das volle Potenzial bionischen Wirtschaftens auszuschöpfen, bedarf es einer engen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und Politik. Es ist notwendig, geeignete rechtliche und politische Rahmenbedingungen zu schaffen, die Innovationen fördern und gleichzeitig sicherstellen, dass diese im Sinne der Nachhaltigkeit eingesetzt werden. Darüber hinaus ist ein Bewusstseinswandel in der Gesellschaft erforderlich, der die Natur als Vorbild und Partner für die Entwicklung neuer Technologien anerkennt.

Der Ausblick für bionisches Wirtschaften ist vielversprechend. Durch die Integration bionischer Prinzipien in unsere Wirtschaft können wir nicht nur den ökologischen Fußabdruck unserer Produktions- und Konsummuster reduzieren, sondern auch neue wirtschaftliche Chancen erschließen. Die Entwicklung hin zu einer biologischen Transformation der Technologie (<https://biologisierung-der-technik.de/de/biologisierung/biologisierung-der-technik>) könnte unsere Verwendung von Materialien in technischen Geräten und Prozessen grundlegend verändern und so den Bedarf an knappen Ressourcen verringern.

Die Zukunft des Wirtschaftens liegt in einer engen Verzahnung von biologischen und digitalen Systemen, die sich gegenseitig ergänzen und erweitern. Diese Entwicklung erfordert Mut, Kreativität (van Nieuwenhoven et al, under review) und den Willen, neue Wege zu gehen. Wenn wir es schaffen, die Potenziale der Natur mit den Möglichkeiten der modernen Technik zu verbinden, können wir eine lebenswerte Zukunft für kommende Generationen schaffen.

6. Danksagung

Die Aufnahme der Abbildungen wurde durchgeführt an der Universitären Serviceeinrichtung für Transmissionselektronenmikroskopie der Technischen Universität Wien, Österreich.

7. Referenzen

- Agenda 2030 (2024). <https://www.bundestkanzleramt.gv.at/themen/nachhaltige-entwicklung-agenda-2030.html>
- Anderson, C. W. (2013). Phytoextraction to Promote Sustainable Development. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 1(1), 51-56.
- Brooks, R. R., Chambers, M. F., Nicks, L. J., & Robinson, B. H. (1998). Phytomining. *Trends in Plant Science*, 3(9), 359-362.
- Fraunhofer (2018) <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/positionen-diskurs/umsicht-diskurs-biologisierung.html>
- Gebeshuber, I. C. (2016). *Wo die Maschinen wachsen: Wie Lösungen aus dem Dschungel unser Leben verändern werden*. ecoWing.

- Gebeshuber, I. C. (2023). Bionisch wirtschaften. In *Nachhaltigkeit und Digitalisierung – (k) ein unternehmerisches Dilemma: Zukunftsbilder und Impulsberichte* (pp. 31-40). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-66815-3_4
- Gebeshuber, I. C., & Lee D. W. (2016). Nanostructures for Coloration (Organisms Other Than Animals). In *Encyclopedia of Nanotechnology* (pp. 2797-2813). Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9780-1_216
- Gebeshuber, I. C., & Macqueen, M. O. (2014). What is a Physicist Doing in the Jungle? Biomimetics of the Rainforest. *Applied Mechanics and Materials*, 461, 152-162. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.461.152>
- Gebeshuber, I. C., & van Nieuwenhoven R. W. (2024). Plant Galls on Alpine Plants - Fascinating Connection between Nature and Physics. *Cecidology*, 39(1), 10-15.
- Gebeshuber, I. C., & van Nieuwenhoven, R. W. (2024b). Pflanzengallen an Alpenpflanzen - Faszinierende Verbindung von Natur und Physik. *Blatt & Blüte*, März 2024, 8-9.
- Gebeshuber, I. C., Graves, P. M., Wardzinska, I., Mateus-Berr, R., & Shanahan, B. W. (2024). Interdisciplinary Approaches in Engineering Education: Preparing Young Minds for Complex Challenges. *IFAC-PapersOnLine*, 58(3), 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.135>
- Gebeshuber, I. C., Gruber, P., & Drack, M. (2009). A Gaze into the Crystal Ball: Biomimetics in the Year 2059. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(12), 2899-2918. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1563>
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Sixth Assessment Report. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- Ivanova, E. P., Hasan, J., Webb, H. K., Truong, V. K., Watson, G. S., Watson, J. A., ... & Crawford, R. J. (2012). Natural Bactericidal Surfaces: Mechanical Rupture of *Pseudomonas aeruginosa* Cells by Cicada Wings. *Small*, 8(16), 2489. <https://doi.org/10.1002/sml.201200528>
- Karman, S. B., Diah, S. Z. M., & Gebeshuber, I. C. (2015). Raw Materials Synthesis from Heavy Metal Industry Effluents with Bioremediation and Phytomining: A Biomimetic Resource Management Approach. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015(1), 185071. <https://doi.org/10.1155/2015/185071>
- Kinoshita, S. (2008). *Structural Colors in the Realm of Nature*. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/9789812709752>
- Küster, E. (1911). *Die Gallen der Pflanzen*. S. Hirzel.
- Ma, Y. (2020). The Super-Cool Materials that Send Heat to Space. *Nature*, 577, 18-20.
- Nirmal, N. P., Santivarangkna, C., Rajput, M. S., & Benjakul, S. (2020). Trends in Shrimp Processing Waste Utilization: An Industrial Prospective. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 20-35.
- Shi, N. N., Tsai, C. C., Camino, F., Bernard, G. D., Yu, N., & Wehner, R. (2015). Keeping Cool: Enhanced Optical Reflection and Radiative Heat Dissipation in Saharan Silver Ants. *Science*, 349(6245), 298-301. <https://doi.org/10.1126/science.aab3564>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- UN SDGs United Nations Sustainable Development Goals (2024). <https://sdgs.un.org>
- UNEP United Nations Environment Programme (2020). The Global Biodiversity Outlook 5 (GBO-5) <https://www.unep.org/resources/report/global-biodiversity-outlook-5-gbo-5>
- UNEP United Nations Environment Programme (2024). Global Resource Outlook. <https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024>
- van Nieuwenhoven, R. W., Bürger, A. M., Mears, L. L., Kienzl, P., Reithofer, M., Elbe-Bürger, A., & Gebeshuber, I. C. (2024). Verifying Antibacterial Properties of Nanopillars on Cicada Wings. *Applied Nanoscience*, 14(3), 531-541. <https://doi.org/10.1007/s13204-024-03030-5>
- van Nieuwenhoven, R. W., Drack, M., & Gebeshuber, I. C. (2023). Engineered Materials: Bioinspired “Good Enough” versus Maximized Performance. *Advanced Functional Materials*, 2307127. <https://doi.org/10.1002/adfm.202307127>
- van Nieuwenhoven, R. W., Gabl, M., Mateus-Berr, R., & Gebeshuber, I. C. (under review). Harmonizing Nature, Engineering and Creativity: An Interdisciplinary Educational Exploration of Engineered Living Materials, Artistry and Sustainability in Collaborative Mycelium Brick Construction.
- VDI (2023) Bartz, M., Beismann, H., Drack, M., Elbracht, D., Gebeshuber, I. C., Hamann, L., ... & Witte, H. (2023). Bionik - Bionische Entwicklungsmethodik - Produkte und Verfahren. *VDI 6220 Blatt 2*.
- Wang, T., Wu, Y., Shi, L., Hu, X., Chen, M., & Wu, L. (2021). A Structural Polymer for Highly Efficient All-Day Passive Radiative Cooling. *Nature Communications*, 12(1), 365. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20646-7>
- Zobl, S., Salvenmoser, W., Schwerte, T., Gebeshuber, I. C., & Schreiner, M. (2016). *Morpho peleides* Butterfly Wing Imprints as Structural Colour Stamp. *Bioinspiration & biomimetics*, 11(1), 016006. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/11/1/016006>