

Abschließende Arbeit im Rahmen der Reifeprüfung

# **Übertragung tierischer Körperstrukturen in die Technik**

**Alice Gottesmann**

8b 2024/25

Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Wien 4  
Wiedner Gymnasium/Sir Karl Popper Schule  
A-1040 Wien, Wiedner Gürtel 68

Betreuungslehrperson: MMag. Matthias Köck

Vorgelegt am 13.02.2025

# Abstract

Bionik beschäftigt sich mit der Übertragung von Strukturen der belebten Natur in die Technik. Zahlreiche Körperstrukturen von Tieren wurden schon erforscht und in die Technik übertragen, um Verbesserungen oder Lösungen technischer Probleme zu erzielen, begonnen mit der idealen Form von Autokarosserien bis zu medizinischen Geräten für die Schlüsselloch-Chirurgie. Im Bereich der Kühlungssysteme kann das PDRC-basierte Kühlungssystem der Silberameise Inspiration für eine energieeffiziente Kühlanlage ohne zusätzliche Stromzufuhr bieten. Das größte Potenzial dieses Kühlungssystems wird in der Kühlung von Gebäudefassaden gesehen. Weiters könnte solch ein PDRC-System auch mit häufig vorkommenden, billigen und umweltfreundlichen Materialien, wie Chitin und Chitosan, hergestellt werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Natur und Technik</b> .....	<b>5</b>
2.1. Was ist Bionik? .....	5
2.2. Vorgehensweisen in der Bionik.....	5
2.2.1. Problembasierte Bionik .....	5
2.2.2. Lösungsbasierte Bionik .....	6
2.3. Grundsätze und Regeln der Bionik.....	7
2.4. Bionik und Umwelt.....	8
<b>3. Tiere als Inspiration für Technik</b> .....	<b>8</b>
3.1. Der Mantarochen und das Filtern von Mikroplastik .....	9
3.2. Die parasitoide Wespe und die Schlüssellochoperation .....	10
3.3. Die Automobilbranche, der Pinguin und der Kofferrfisch.....	12
<b>4. Kühlungssysteme</b> .....	<b>14</b>
4.1. Passive Radiative Cooling (PRC) .....	15
4.2. Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) .....	16
4.3. Farben .....	17
4.3.1. Pigmentbasierte Farben .....	17
4.3.2. Strukturfarben.....	18
4.4. Regenbogenschokolade-Experiment.....	19
4.5. Die Silberameise.....	20
4.5.1. Chitin .....	22
4.5.2. Chitosan.....	22
4.5.3. Experimente mit Chitin und Chitosan.....	23
<b>5. Diskussion</b> .....	<b>25</b>
<b>6. Conclusio</b> .....	<b>27</b>
<b>Bibliografie</b> .....	<b>29</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>31</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>32</b>

# 1. Einleitung

Bionik erforscht die Natur darauf, ob in dieser mögliche Lösungen und Verbesserungen für technische Probleme gefunden werden können. Forscher\*innen untersuchen unter anderem tierische Körperstrukturen und wie man diese abstrahieren, verändern und in die Technik übertragen kann. Dabei gibt es neue technische Entwicklungen, die von Pinguinen, Mantarochen oder Wespen inspiriert sind. Auch bei Kühlungsmethoden kann aus den Körperstrukturen der Ameise Inspiration gezogen werden.

Diese abschließende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, in welchen Bereichen Körperstrukturen von Tieren bereits erforscht werden, um technische Verbesserungen zu erzielen. Insbesondere wird darauf eingegangen, wie weit Kühlungssysteme inspiriert von Körperstrukturen der Silberameise für den praktischen Einsatz geeignet sein könnten.

Ein Leitfaden für diese Arbeit ist ein Interview mit Prof. Gebeshuber von der TU Wien, eine renommierte österreichische Wissenschaftlerin auf dem Gebiet der Bionik, die sich derzeit intensiv mit dem Kühlungssystem der Silberameise beschäftigt.

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der Bionik beschrieben. Nach einer Vorstellung der Bionik werden die Möglichkeiten einer lösungs- und einer problembasierten Bionik dargestellt und aufgezeigt, dass in der Natur entwickelte Lösungsmodelle möglichst energieeffizient sind. Nachfolgend werden im dritten Kapitel anhand von drei Tierbeispielen verschiedene Übertragungsmöglichkeiten tierischer Körperstrukturen in die Technik dargestellt. Im vierten Kapitel wird die Bedeutung von Strukturfarben und PDRC-Systemen als Kühlungssystem von Tieren anhand der Silberameise erläutert. Anhand der vorgestellten Ergebnisse wird sodann in der Diskussion im fünften Kapitel erörtert, welche Probleme bei Anwendung der ameiseninspirierten Kühlungstechnik auftreten können und die Anwendungsmöglichkeiten von Bionik heute und zukünftig diskutiert. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse wird abschließend in der Conclusio dargestellt. Im Anhang findet sich das Interview mit Prof. Gebeshuber.

## 2. Natur und Technik

Früher wurden Natur und Technik als Gegensatz zueinander angesehen. Sie galten als unvereinbar und als Antipoden. In der Forschung wurden eher ihre Gegensätze betont als Gemeinsamkeiten oder Überschneidungen gesucht. Neue technische Entwicklungen stellten einen Emanzipationsprozess von der Natur dar. Daraus entwickelte sich eine gängige Definition von Fortschritt in der Technik, wonach dieser durch technische Entwicklungen den Menschen unabhängiger von den natürlichen Gegebenheiten machen sollte. Durch einen derartigen Fortschrittsbegriff ergab sich eine „Rangordnung“, in der die Technik über die Natur gestellt wurde. Das führte dazu, dass vernachlässigt wurde, die Natur als Vorlage für mögliche technische Lösungen von Fragestellungen und Problemen anzusehen. Demgegenüber ist es nach heutiger Überzeugung aber durchaus sinnvoll, Natur und Technik nicht zu trennen, sondern die Natur zu betrachten, die während der letzten 3,8 Milliarden Jahre durch Evolution, Selektion und Mutation, also Auswerten und Verbessern, die (nach heutigem Wissensstand) bestmöglichen Prozesse und Designs konzipierte. Dieses „in-die-Natur-schauen“ stellt einen interdisziplinären Wissenschaftszweig dar, genannt Bionik oder auch Biomimetik (vgl. Benett und Tanaka 2016, 15-16).

### 2.1. Was ist Bionik?

Der Begriff „Bionik“ ist ein Kunstwort der beiden Begriffe Biologie und Technik, das die Verbindung der beiden Disziplinen zeigen soll. Es setzt sich immer mehr die Überzeugung durch, dass viele biologische Konstruktionsprinzipien und Verfahrensweisen eine vernünftige und sichere Strategie für das Überleben, auch des Menschen, darstellen. Die Konstruktionsprinzipien und Prozesse der Natur wurden evolutionär entwickelt und angepasst. Dadurch entwickelten sich in der Natur Idealformen, lange bevor versucht wurde, solche in der Technik zu erreichen (vgl. Benett und Tanaka 2016, 17; vgl. Gebeshuber 2016, 39).

### 2.2. Vorgehensweisen in der Bionik

#### 2.2.1. Problembasierte Bionik

Die problembasierte Bionik arbeitet nach dem Top-Down-Prinzip. Das bedeutet, die Natur wird spezifisch daraufhin erforscht, ob sie Lösungen für ein bestimmtes technisches Problem bietet. Dazu wird zunächst das technische Problem von Ingenieur\*innen, Künstler\*innen oder

Wissenschaftler\*innen definiert, nach Analogien dazu in der Natur gesucht, diese erforscht und durch die gewonnenen Ergebnisse eine Lösung des Problems erarbeitet. Dabei sollte die Fragestellung möglichst breit gefasst sein, um möglichst viele Lösungsansätze zu erhalten (vgl. Benett und Tanaka 2016, 17; vgl. Gebeshuber 2016, 39-41).

Ein Beispiel für problembasierte Bionik ist die Entwicklung von Flugzeugflügeln. Flugzeuge haben einen hohen Treibstoffverbrauch auf Grund von Luftwirbeln an den Flügelspitzen. Um eine Lösung zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs zu finden, untersuchte man Flügel von segelnden oder gleitenden Vögeln. Dabei wurde herausgefunden, dass die Flügel der Vögel statt eines großen Wirbels zahlreiche kleine Wirbel verursachen, wodurch sie insgesamt weniger Energie verbrauchen. In der Forschung wurden diese Erkenntnisse zur Herstellung künstlicher Flugzeugflügel mit mehreren Wirbelablösestrukturen, auch Winglets genannt, genutzt (vgl. Gebeshuber 2013).

### 2.2.2. Lösungsbasierte Bionik

In der lösungsbasierten Bionik geht man hingegen in Bottom-up-Prozessen vor. Dabei wird Grundlagenforschung an biologischen „Lösungen“, also der Biomechanik und Funktionsmorphologie von biologischen Systemen, betrieben und die zugrunde liegenden Prinzipien untersucht und beschrieben. Diese werden abstrahiert und mögliche technische Anwendungen gesucht oder entwickelt. Ein Beispiel der lösungsbasierten Bionik ist die Entdeckung des Lotuseffekts: Wilhelm Barthlott, ein Professor und Botaniker aus Deutschland, beschäftigte sich als Grundlagenwissenschaftler mit Pflanzen und insbesondere mit dem Lotusblatt, da ihn faszinierte, dass dieses nie schmutzig wird, sondern immer sauber bleibt. Er führte mikroskopische Untersuchungen durch, in denen er die Oberfläche des Blattes begutachtete. Dabei erwartete er eine glatte Oberfläche, fand stattdessen aber Wachsstrukturen. Die Schmutzteilchen befinden sich nur auf den Spitzen dieser Strukturen und haben dadurch eine möglichst geringe Kontaktfläche mit dem Blatt, dies sorgt für geringe Adhäsionskräfte. Bei einem Wassertropfen ist es ebenso, der Tropfen ist also mehr in Kontakt mit der Luft als mit der Blattoberfläche. Durch die hydrophobe Luft und die dadurch erzeugten hohen Kohäsionskräfte und niedrigen Adhäsionskräfte entsteht ein kugelförmiger Tropfen, der durch die geringe Anhaftungskraft zum Blatt abrollt und die Schmutzpartikel mitnimmt (vgl. LEIFIphysik 2025; vgl. studyflix 2025; vgl. Gebeshuber 2016, 38-39).

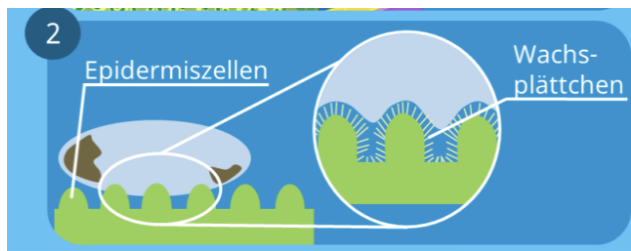


Abb. 1: Wachsstrukturen an der Pflanze



Abb. 2: geringe Kontaktfläche am Blatt bei geringer Adhäsion, hohe Kontaktfläche bei hoher Adhäsion

Barthlott veröffentlichte seine Forschungsergebnisse und die Firma STO übernahm und adaptierte diese neuen Erkenntnisse und entwickelte mit diesen eine selbstreinigende Fassadenfarbe (vgl. Gebeshuber 2016, 38-39).

### 2.3. Grundsätze und Regeln der Bionik

In der Bionik geht es nicht darum, Kopien der Natur mit den Mitteln der Technik herzustellen. Stattdessen müssen die biologischen Informationen abstrahiert und modifiziert werden. „Erst dann und nur so ist die technische Umsetzung erfolgversprechend“ (Benett und Tanaka 2016, 18). Technik, die nur durch eine Kopie der Form entsteht und die Struktur- und Gestaltungsprinzipien nicht beachtet, zählt nicht zur Bionik (vgl. Benett und Tanaka 2016, 18).

Ein Grundsatz der Bionik ist, dass die Natur nichts verschwendet, daher wendet kein Tier mehr Kraft oder Energie auf, als für die angestrebte Aktion nötig ist. Es herrscht also das Prinzip „so wenig wie möglich, so viel wie nötig“. Außerdem geht in der Natur nichts verloren, da sie ein System aus geschlossenen Kreisläufen ist, in dem Wiederverwertung und Wiedereingliederung in Kreisläufe erfolgt (vgl. Benett und Tanaka 2016, 18-19).

Weiters gibt es zehn generelle biomimetische Prinzipien, die auch von Ingenieur\*innen beachtet werden können, die nicht mit der Biologie vertraut sind (vgl. Gebeshuber 2013):

1. Integrierte statt additiver Konstruktionen
2. Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelements
3. Multifunktionalität statt Monofunktionalität
4. Feinabstimmung gegenüber der Umwelt
5. Energieeinsparung statt Energieverschleuderung
6. Direkte und indirekte Nutzung der Sonnenenergie
7. Zeitliche Limitierung statt unnötiger Haltbarkeit

8. Totale Recyclierung statt Abfallanhäufung
9. Vernetzung statt Linearität
10. Entwicklung im Versuchs-Irrtums-Prozess

## 2.4. Bionik und Umwelt

Wie bereits in Abschnitt 2.3. erwähnt, wendet die Natur nicht mehr Energie als nötig auf und verschwendet keine Materialien. Material-, Energie- und Emissionsbilanzen müssen in der technischen Welt beachtet und Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung besser integriert werden, um Auswirkungen auf den Klimawandel und Materialverbrauch zu minimieren. Dadurch wird die Bionik heutzutage immer wichtiger, denn diese soll nicht nur als Möglichkeit die Technik voranzutreiben gesehen werden, sondern als Möglichkeit Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung mit neuen und alten Technologien zu verknüpfen, da die Natur nach diesen Grundsätzen vorgeht (vgl. Benett und Tanaka 2016, 19).

Produktentwicklung nicht nur mit, sondern für die Natur – wenn diese Idee ausreichend Berücksichtigung findet, ist die Bionik in der Lage, eine bedeutende Trendwende im Bereich der Technik einzuläuten, von der alle profitieren. (Benett und Tanaka 2016, 19)

Als Designmethode ist Bionik nicht notwendig nachhaltig, aber bei Implementierung in der Technik sollte darauf geachtet werden, dass die im Natursystem vorhandene Nachhaltigkeit mitintegriert wird (vgl. Gebeshuber 2016, 61).

In der Bionik werden Technologien angestrebt, die nachhaltig dem Menschen und der Umwelt zugutekommen. Dabei ist kein „Zurück zur Natur“ das Ziel, sondern eine Veränderung und Verbesserung der Technologie zur Nachhaltigkeit (vgl. Blüchel und Nachtigall 2001, 193).

## 3. Tiere als Inspiration für Technik

Oft werden in der Bionik Strukturen von Pflanzen, Tieren oder Organismen in die Technik integriert. Es gibt zum Beispiel das Netzwerk des Insektenflügels, das vermutlich eines der

effizientesten Tragekonstruktionen gebildet hat, das bei dem Stand der Technik im Jahr 2001 vorstellbar war (vgl. Blüchel und Nachtigall 2001, 40).

Auf den folgenden Seiten werden Tiere, die der Technik als Inspiration dienen und die dadurch entstandenen neuen oder verbesserten Technologien vorgestellt.

### 3.1. Der Mantarochen und das Filtern von Mikroplastik

Es gibt drei verschiedene Arten von Mantarochen: den Riesenmanta, den Riffmanta und den Karibischen Manta. Der Mantarochen ernährt sich durch einen Vorgang, der „Filterfressen“ genannt wird. Dieser Vorgang dient Wissenschaftler\*innen als Inspiration bei der Entwicklung eines Filters für von Mikroplastik verschmutztem Wasser (vgl. Ayree 2021, 230-232).

Mantarochen bewegen sich durch kräuselnde Auf- und Abwärtsbewegungen ihrer Brustflossen fort, dabei wird das Wasser nach hinten und der Rochen nach vorne gedrückt. Um Nahrung zu erlangen, nehmen sie Meerwasser in ihrem nach vorne gerichtetem Maul auf, das Plankton wird eingefangen und das restliche Wasser entweicht durch die Kiemenöffnungen. Ein Team von Wissenschaftler\*innen der California State University in Fullerton und dem Whitney Laboratory for Marine Bioscience an der University of Florida interessierte sich für die Art, wie das Plankton gefiltert wird. Die erste Frage, die gestellt wurde, war, warum Mantarochen ihre Rachen nicht reinigen müssen, denn entspräche ihre Filtermethode der eines Siebes, müsste man wie bei einem Sieb, nachdem man Nudeln abgeseiht hat, leichte Verstopfungen sehen. Da der Mantarochen jedoch keine Verstopfungen im Maul aufwies, musste es sich um eine andere Filtrationsmethode handeln (vgl. Ayree 2021, 232-235).

Durch die Vorwärtsbewegung des Mantarochens wird Meerwasser in sein Maul gedrückt. In diesem befinden sich winzige abgewinkelte Lamellen, auch Kiemenreusen genannt. Wenn Wasser über sie fließt, entstehen Wirbel zwischen den einzelnen Lamellenpaaren. Diese Wirbel sind dafür verantwortlich, dass Partikel wie Plastik oder Plankton nicht nach unten, sondern nach oben gedrückt werden. Dadurch wird die Verstopfung der Kiemen durch diese Partikel verhindert. Die Partikel, vor allem Plankton, prallen an den Lamellen ab und sammeln sich in der Kehle, bevor sie geschluckt werden. Dabei durchlaufen diese nie einen richtigen Filter. Patrick Aryee, der Autor des Buches „30 TIERE, DIE UNS KLÜGER MACHEN“, kommt daher zu dem Schluss, dass der Name „Abprallfresser“ passender wäre als der Name „Filterfresser“. Ein Filtersystemsystem, das nicht verstopft wie das des Mantarochens, könnte ein Modell für das

Auffangen von Mikroplastik bilden, mit dessen Hilfe die Verschmutzung der Ozeane reduziert werden könnte (vgl. Ayree 2021, 232-235).

Es gibt drei verschiedene Arten von Mikroplastik und nur zwei davon können in einer Kläranlage gefiltert werden. Die erste Art sind die negativ schwimmfähigen Partikel. Diese sinken an den Boden der Kläranlage und können dort passiv behandelt werden, da sie das Klärbecken nicht verlassen können. Die zweite Art sind die positiv schwimmfähigen Partikel, die von der Oberfläche des Wassers geschöpft werden können. Die dritte Art sind Mikroplastikpartikel mit neutralem Auftrieb, die in einer Kläranlage nicht beseitigt werden können, da es zu kostenaufwendig wäre, Filter zu installieren, die mit der Zeit verstopfen. Durch „Abprallfilter“ könnte dieses Problem gelöst werden. Weitere Anwendungen eines Filtrationssystems inspiriert vom Mantarochen werden derzeit erforscht. Studierende an der Haag University of Applied Sciences in den Niederlanden versuchen, ein Filtersystem zum Auffangen von Mikroplastik in Flüssen zu entwickeln. Das Team fand heraus, dass es weltweit zehn Flüsse gibt, die 90% des Plastiks in die Ozeane transportieren. Ihr entwickeltes Filtersystem nennen sie „Floating Coconet“. Dabei handelt es sich um korbartige Trichter, die fast zwei Meter lang sind und aus einem größeren und einem kleineren Behälter bestehen. Durch eine Öffnung an der Vorderseite soll Flusswasser mitsamt der Plastikpartikel in den Korb gelangen. Die Innenwände haben eine kiemenartige Struktur, die mit Flossen bedeckt ist, und winzige Strömungen (Wirbel) erzeugt. Das ist eine Analogie zu den Lamellen des Mantarochens. Freischwimmendes Mikroplastik soll durch diese Wirbel an ein an den Trichtern befestigtes Netz geleitet und dort aufgefangen werden. Sobald das Netz voll ist, kann es herausgenommen und das Mikroplastik entsorgt werden. Das ist jedoch nur eine von vielen Ideen, die durch die Lamellen im Maul des Mantarochens inspiriert wurde (vgl. Ayree 2021, 235-239).

### 3.2. Die parasitoide Wespe und die Schlüsselochoperation

Um zu zeigen, dass bionische Gedanken auch in der Medizin zu Verbesserungen, Problemlösungen und Fortschritten führen können, wird nun das Beispiel der parasitoiden Wespe herangezogen, die ein neues Werkzeug für die Schlüsseloch-Chirurgie inspirierte. Die Wespe hat den Namen *Glyptapanteles* und ist in Neuseeland und Nord- und Mittelamerika beheimatet. Die weibliche parasitoide Wespe trägt einen scharfen Stechapparat an ihrem Körperende, der als Eilegeröhre dient, mit dem sie Eier im Körper anderer Insekten ablegt (vgl. Ayree 2021, 77-78).

Wenn die Zeit für das Wespenweibchen gekommen ist, Eier zu legen, macht es sich auf die Suche nach einem Wirt. Bei dieser Wespengattung ist der gewählte Wirt die Raupe der Geometrid-Motte (*Thyrinteina leucocerae*). Die Wespe bohrt mit dem Ovipositor, einem nadelartigen Organ zum Stechen und zur Eiablage, in das Fleisch der Raupe. Die Eier werden nun im Körper der Raupe abgelegt und wenig später schlüpfen bis zu 80 Larven. Diese ernähren sich von den Körpersäften der Raupe, meiden aber lebenswichtige Organe (vgl. Ayree 2021, 78).

Während die Raupe weiterlebt und wächst, häuten sich die Wespenlarven mehrmals. Die Larven stimmen ihre letzte Häutung auf den Zeitpunkt ab, an dem sie fast alle gemeinsam bereit sind, ins Freie zu gelangen. Die Wespenlarven stopfen die Löcher, die in der Haut der Raupe durch ihren Ausbruch entstehen, durch ihre eigene gehäutete Haut. Das ermöglicht der Raupe weiterzuleben. Einige Larven bleiben in der Raupe zurück und verändern ihr Verhalten in der Weise, dass sie die im Freien verpuppten Larven vor Fressfeinden schützt. Der Autor Patrick Ayree gibt der Raupe daher den passenden Namen „Zombie-Raupe“. Wenn die entwickelten Wespen abschließend aus den Puppen schlüpfen und wegfliegen, stirbt die Raupe (vgl. Ayree 2021, 78-79).

Der Mechanismus, der nun für die Medizin interessant ist, ist der Ovipositor. Dieser dient als Inspiration für ein neues Werkzeug in der Schlüsselloch-Chirurgie, bei der es darum geht, tumoröses, absterbendes oder abnormales Gewebe aus dem Inneren des menschlichen Körpers zu entfernen. Die beste, existierende Variante dafür sind aspirationsbasierte Geräte. Mit diesen wird Gewebe durch Saugen aus dem Körper entnommen. Diese Saugtechnik birgt jedoch Probleme. Einerseits können die Geräte durch das Entfernen von Blutgerinnseln verstopfen, andererseits kann das entnommene Gewebe bei der Entfernung beschädigt werden, was ein Problem bei späteren Untersuchungen des Gewebes darstellt. Auch kann bei dem Saugprozess unbeabsichtigt gesundes Gewebe entfernt werden. Um diese Probleme zu verhindern, hat ein Team der technischen Universität Delft ein neues Gerät nach dem Vorbild des Ovipositors entworfen (vgl. Ayree 2021, 79-80).

Das Stechorgan der Wespe ist wie folgt aufgebaut: Der Ovipositor ist so dünn, dass er keinen Platz für Muskeln beinhaltet. Er hat die Form einer flexiblen und hohlen Nadel. Im Inneren befinden sich drei Ventile, die jeweils durch eine Nut-und-Feder-Fuge verbunden sind. Daher halten die Ventile im Stechrohr zusammen. Es gibt ein großes und zwei kleine Ventile, die im Inneren des Rohres unabhängig vor und zurück gleiten können. Durch deren Bewegung treten Reibungskräfte auf, die den Ovipositor tiefer in das Fleisch der Raupe gleiten lassen. Für die Eiablage dringt eines der kleinen Ventile tiefer nach unten in den Körper der Raupe ein,

während das zweite Ventil nach oben gleitet. Die Ventile gleiten somit jeweils in die Gegenrichtung. Diese Bewegungsabfolge wird mehrmals durchgeführt und die dabei entstehende Reibung sorgt dafür, dass das Rohr tiefer in den Körper eindringen kann. Anhand dieses Prinzips wurde an der Bio-Inspired Technology Group der Universität Delft ein Prototyp mehrerer Nadeln zur Gewebeentnahme entwickelt, die etwa die Breite eines Streichholzes haben. Diese Nadeln bestehen aus vier bis sechs gleichgroßen Stäben, die individuell gesteuert werden können. Die Nadeln nutzen das gleiche Prinzip der Reibungskräfte. Auf diese Weise wurde es in einem Experiment geschafft, die Nadel durch eine Gelatinesubstanz zu schieben. Das Forschungsteam nutzte sodann das Prinzip der Reibungskräfte in umgekehrter Richtung, um Teile der Substanz durch die Nadel zu extrahieren (vgl. Ayree 2021, 80-82).

Anschließend wurde das Rohr mit Klingen ausgestattet, um Gewebe zu schneiden. Sollten nun zum Beispiel Krebszellen entfernt werden, wurden die Klingen nacheinander in Richtung der Krebszellen bewegt. Eine der Klingen bewegte sich nach vorne, um das Gewebe zu schneiden. Die restlichen Klingen bewegten sich in die andere Richtung. Die durch die Bewegungen entstandene Reibung, ermöglichte, dass das abgeschnittene Gewebe nach oben durch die Röhre gezogen wurde. Abhängig von der Bewegung der Klingen ist ein Transport des Gewebes in beide Richtungen möglich. Vor klinischen Versuchen soll der Prototyp der Nadel noch verbessert werden, Forscher\*innen sprechen ihm jedoch gute Zukunftsaussichten zu, da eine genauere Präzision als bei Verwendung der Absaugröhre erwartet wird (vgl. Aryee 2022, 82-83). Aryee fasst diese Ergebnisse so zusammen:

Man weiß ja nie: Wenn Sie sich irgendwann in Zukunft einer Schlüssellochoperation unterziehen müssen, haben Sie das Gelingen dieses minimalinvasiven Eingriffs der Eiablagetechnik von Zombieraupen produzierenden parasitoiden Wespen zu verdanken. (Aryee 2022, 83)

### 3.3. Die Automobilbranche, der Pinguin und der Kofferfisch

Auch in der Automobilbranche können bionische Ideen helfen, Probleme zu lösen. Eine der größten Herausforderungen ist der Luftwiderstand eines Autos, denn je höher dieser ist, desto höher sind Treibstoffverbrauch und Emissionswerte des Autos. Die Form eines Autos hat eine große Auswirkung auf den Druck-/Formwiderstand der circa zwei Drittel des gesamten Luftwiderstands darstellt. Die Form muss also dahin optimiert werden, dass der Luftwiderstand möglichst klein ist, denn allein ein Dachgepäckträger vermehrt den Luftwiderstand um 30%, was zu einem 10% höheren Kraftstoffverbrauch führt (vgl. Benett und Tanaka 2016, 135).

Um Lösungsversuche oder Verbesserungen für dieses Problem zu finden, suchten Ingenieur\*innen nach Tieren, die eine besonders stromlinienförmige Körperform haben, um diese Struktur auf Autos zu übertragen. Schon im 19. Jahrhundert beschäftigte sich Sir George Calley mit Stromlinienformen von tierischen Körpern und formulierte die Idee, dass man die Körperformen von Wassertieren beachten muss, wenn man die bestentwickelten Formen finden will, da die Dichte von Wasser größer ist als die von Luft. Diese Idee wurde und wird auch im 21. Jahrhundert von Forscher\*innen beachtet. Die Körperform des Pinguins wurde als vielversprechendes Modell für eine Autoform ausgewählt, denn der Pinguin bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 1,2 bis zu 2,7 m/s im Wasser, während er beim Schwimmen nur wenig Energie verbraucht. Für eine Strecke von 100 Kilometern, braucht er lediglich die Energie, die er aus der Nahrung von einem Kilogramm Kleinkrebsen erhält (vgl. Benett und Tanaka 2016, 135; vgl. Hodges 2013).

Das liegt unter anderem daran, dass der Pinguin einen sehr kleinen Strömungswiderstand (Widerstandsbeiwert) mit einem Wert von 0,03 cw aufweist. Demgegenüber weist das Auto mit dem geringsten cw-Wert einen cw-Wert von 0,22 auf. Der Pinguinkörper besteht aus einem verdickenden Schnabel, einem großen Kopf, einem dünnen Hals und einem sich am Ende verjüngenden, aber sonst eher dickeren Körper. Es wird nun versucht, nach diesem Schema verbesserte Formen für Autos zu entwickeln. Entsprechende Tests werden bereits durchgeführt (vgl. Benett und Tanaka 2016, 136-137).

Ein weiteres Tier, das für das Auto als Form-Vorbild genutzt wurde, ist der Kofferrisch. Dieser wurde vom Autohersteller Daimler AG ausgewählt. Bereits im Jahr 2005 stellte das Unternehmen Prototypen eines solchen „am Kofferrisch inspirierten“ Autos unter dem Namen „Mercedes-Benz bionic car“ auf dem Innovationssymposium in Washington vor (vgl. Benett und Tanaka 2016, 137-139).

Der Kugelfisch hat einen cw-Wert von 0,06. Grund für die Auswahl des Kofferrisches war, dass als Basismodell des „bionischen Autos“ ein Mercedes der A-Klasse diente, der durch seine rechteckige Form einem Kofferrisch deutlich mehr ähnelte als einem Pinguin. Der entstandene Prototyp hatte einen cw-Wert von 0,19, also einen deutlich niedrigeren cw-Wert als übliche Autos. Er zeigte auch eine 30%-ige Gewichtsreduktion im Vergleich mit kommerziellen Autos, da Werkstoffanteile entnommen wurden, die keine Auswirkungen auf die Stabilität oder Crash-Sicherheit hatten. Dieses Vorgehen wurde auch durch den Kofferrisch inspiriert, da dieser Knochenplatten besitzt, die sich ohne Fugen unter seiner Haut befinden und ihn trotzdem vor Angriffen von Fressfeinden schützen (vgl. Benett und Tanaka 2016, 138-139).

Letztlich konnte dieser Prototyp kommerziell nicht genutzt werden, da wichtige Komponenten, wie Außenspiegel, fehlten. Er bildete jedoch die Basis für weitere Entwicklungen und Verbesserungen (vgl. Benett und Tanaka 2016, 138-139).

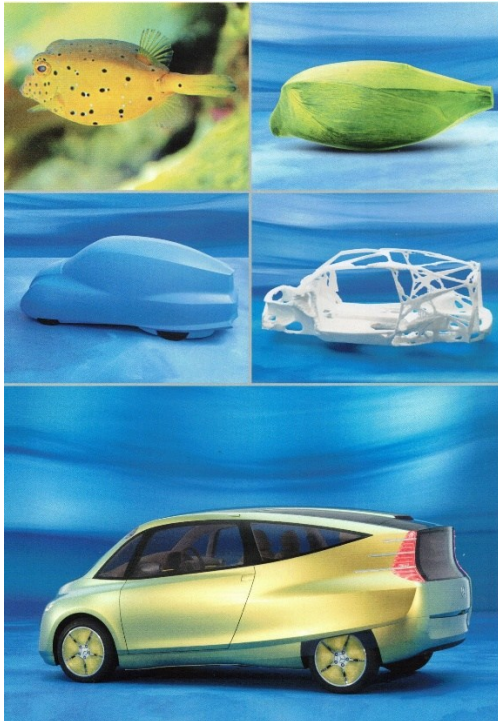


Abb. 3: Prototyp des „Mercedes-benz bionic car“, inspiriert vom Kofferfisch

## 4. Kühlungssysteme

Heutzutage ist die Kühlung von Gebäuden ein wichtiges Thema. Einerseits gehört ein angenehm temperierter Wohn- und Arbeitsraum zu einem bestimmten Lebensstandard, andererseits wird für Klimaanlage und Kühlungssysteme viel Energie gebraucht und bei der Energieerzeugung viele Treibhausgase freigesetzt. Vor kurzem veröffentlichte die International Energy Agency (IEA) Berichte, die angaben, dass 9% der weltweiten Elektrizitätsnutzung der Kühlung von Innenräumen dient. Weiters wurde angenommen, dass diese 9% sich bis zum Jahr 2050 verdoppeln, wenn niemand eingreifen würde. Das Kühlen von Innenräumen wird auch IEC, indoor environment cooling, genannt. Von 3.5 Milliarden Menschen, die in heißen Gegenden leben, hatten 2021 nur 15% die Möglichkeit IEC zu verwenden, in Sub-Sahara-Afrika und Süd-asien hatten die wenigsten Zugang zu IEC. Das Fehlen von IEC hat jedoch negative Auswirkungen auf den Menschen, wie höhere Gefahr an Hitzestress zu leiden, verringerten Komfort,

Senkung der Arbeitsproduktivität oder Gefährdung der Gesundheit. Zugang zu IEC wäre daher auch für diese Menschen wichtig. Dies könnte durch noch mehr Energienutzung jedoch problematische Auswirkungen auf die Umwelt mit sich bringen. Traditionelle IEC-Lösungen, wie Klimaanlage, auch air conditioning (AC) genannt, tragen zum Klimawandel bei, da für die benötigte Energieerzeugung häufig fossile Brennstoffe verbrannt werden. Ein weiterer negativer Effekt von AC ist, dass bei Einsatz von AC die unmittelbare Umgebung erwärmt wird. Die anthropogene Hitze von AC kann städtische Gebiete um 0.5 bis 1.5 Grad Celsius erwärmen, da zum Beispiel bei Wärmetauschern die Hitze von Innenräumen ins Freie geleitet wird. Eine Lösung, um den Problemen traditioneller Kühlungssysteme auszuweichen, und trotzdem die gewünschte Kühlung zu erzielen, ist Passive Radiative Cooling (PRC), noch genauer gesagt Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC) (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

#### 4.1. Passive Radiative Cooling (PRC)

Nächtliche passive Strahlungskühlung (PRC) wird schon seit den 1970er-Jahren erforscht (vgl. Jung und Ko 2024). Es handelt sich um Materialien, die sehr gut im IR-Bereich emittieren und auf diese Weise Wärmeenergie vom Objekt abführen. Auf diese Art kühlt das Objekt, ohne dass dafür zusätzliche Energie verwendet werden muss. Die abgegebene Infrarot-Strahlung wird von der umgebenden Atmosphäre absorbiert, was zu ihrer Erwärmung führt. Jedoch gibt es einen Wellenlängenbereich von 8-13  $\mu\text{m}$ , das „atmosphärische Fenster“, in welchem die Strahlung die Atmosphäre fast vollständig ins Weltall verlassen kann. Um also eine nachhaltige Kühlungsmethode nicht nur für das Objekt, sondern mit Blick auf die gesamte Umgebung zu entwickeln, sollte die Abstrahlung bei PRC möglichst in diesem Bereich stattfinden (vgl. Brandt, Freudendahl und Langner; vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

Eine potenzielle Anwendung von PRC sind PRC-Textilien, Fassadenanstriche oder die Kühlung von Solarzellen. Insbesondere bei Letzteren ist das Einsparen von Energie möglich. Bei Gebäudekühlungen zeigen Modellrechnungen, dass Einsparungen im Bereich von 45% bis 68% des Energiebedarfs klassischer Kühlmethoden möglich sind (vgl. Brandt, Freudendahl und Langner 2024).

Ein kompletter Verzicht ist allerdings noch nicht möglich, da die Auswirkungen von Sonnenstrahlung und Luftströmungen so groß sind, dass die Effizienz von PRC mit einem Kühlgerät noch nicht mithalten kann (vgl. Brandt, Freudendahl und Langner).

## 4.2. Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC)

In den letzten zehn Jahren wurde daher eine erweiterte Form von PRC erforscht, die den Herausforderungen, die Sonnenstrahlung mit sich bringt, entgegenwirkt: Passive Daytime Radiative Cooling (PDRC). PDRC nutzt zwei Hauptmechanismen: einerseits die Emission von Infrarotstrahlung im atmosphärischen Fenster (siehe Abschnitt 4.1.), und andererseits, nicht wie bei PRC die Absorption, sondern die Reflexion von Sonnenlicht, wodurch ein Objekt von PDRC im Vergleich zu PRC deutlich stärker kühl gehalten werden kann (vgl. Brandt, Freudentahl und Langner; vgl. Hammel 2023).

Das schlichteste System, das diese beiden Voraussetzungen erfüllt und somit ein PDRC-System darstellt, ist ein Zweischichtsystem mit einer durchlässigen, aber Wärme emittierenden Oberschicht und einer Unterschicht mit hohen Reflexionseigenschaften (vgl. Brandt, Freudentahl und Langner).

Damit PDRC mit höchstmöglicher Effizienz genutzt wird und auch einen wirklichen Ersatz für traditionelle Kühlungssysteme bilden kann, sollten zwei Bedingungen erfüllt sein: Der Reflexionsgrad (0% = keine Strahlung wird reflektiert, 100% = die gesamte Strahlung wird reflektiert) sollte über 90% liegen. Von den maximal 10% der absorbierten Strahlung sollten mindestens 90% wieder emittiert werden. Der Emissionsgrad (0% = nichts wird emittiert, 100% = die gesamte Strahlung wird emittiert) sollte daher auch über 90% liegen. Wichtig für die Vermeidung weiterer Erderwärmung ist, dass sich die Emission auf Wellenlängen im atmosphärischen Fenster beschränkt (siehe Abschnitt 4.1.) (vgl. Gebeshuber u. a. 2024). Die Suche bzw. Entwicklung von Strukturen mit den oben genannten Eigenschaften ist ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung.

Der Einsatz von PDRC steht allerdings noch vor Problemen. Um es großflächig umzusetzen muss garantiert sein, dass seine Effizienz jener von traditionellen Kühlungssystemen gleich ist. Weiters müsste ein PDRC-System widerstandsfähig und robust gegenüber Wetter und Verschmutzung sein. Es wird auch abzuwarten sein, ob die Kosten und der Energieeinsatz für eine PDRC-Massenproduktion wirtschaftlich tragbar sind (vgl. Brandt, Freudentahl und Langner). Es gibt schon mehrere Vorgänge oder Versuche, PDRC umzusetzen. Da es aber Organismen gibt, die von allein Selbstkühlungsmechanismen durch PDRC entwickelt haben, fokussieren sich die Forscher\*innen der TU Wien auf diese. Solche Organismen sind zum Beispiel Schmetterlinge, Ameisen oder Käfer. Sie nutzen Strukturen auf der Außenseite ihrer Körper oder

Flügel, um sich zu kühlen. Die Forschungsgruppe der TU Wien führt bereits Versuche durch die Funktion der PDRC-Strukturen auf biologische Materialien wie Chitin und Chitosan zu übertragen. In den folgenden Kapiteln wird ein Tier vorgestellt, das sich PDRC zu Nutzen gemacht hat und wie dieses Tier als Inspiration für die Technik dient (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

## 4.3. Farben

Um zu verstehen, wie diese Kühlungssysteme in der Tierwelt funktionieren, muss man einen Blick zu den Farben werfen. Farben entstehen auf zwei verschiedene Arten:

- Pigmentbasierte Farben
- Strukturfarben

### 4.3.1. Pigmentbasierte Farben

Pigmentbasierte Farben stellen die häufigere Variante in der Natur dar. Die Farbpigmente sind Moleküle mit einem Durchmesser von 0,1 bis 1  $\mu\text{m}$ , die sich in tierischen oder pflanzlichen Zellen (Haut, Haare, Federn, etc.), befinden. Sie absorbieren bzw. reflektieren Strahlung je nach Wellenlänge (vgl. SIMPLY SCIENCE 2013; vgl. Meyer 2007, 32).

Verschiedene Pigmente absorbieren unterschiedliche Wellenlängen und reflektieren andere. Die reflektierten Wellenlängen treffen das Auge und werden im Gehirn zu einem Farbeindruck zusammengesetzt (vgl. Eisenbach 1997, 94; vgl. Cencillo-Abad u. a. 2023).

Wird ein Objekt mit weißem Licht bestrahlt, dessen grüne und blaue Anteile absorbiert werden und die roten Anteile reflektiert, erscheint dieses Objekt für uns rot. (Meyer 2007, 32)

Alle derzeit kommerziell erzeugten Farbstoffe basieren auf solchen Pigmentfarben und arbeiten daher mit diesem Absorptions-/Reflexionsmechanismus. Kommerzielle Vorteile von Pigmentfarben sind, dass sie aus jedem Betrachtungswinkel gleich wahrgenommen werden und leicht in großen Mengen produziert werden können (vgl. Cencillo-Abad u. a. 2023; vgl. SIMPLY SCIENCE 2013).

Probleme stellen jedoch ihre teilweise toxischen Materialien dar, die sich oft nicht gut recyceln lassen, schlecht von der Umwelt abbaubar sind und Wasser verschmutzen können. Weiters nimmt die Farbtintensität von Pigmentfarben im Laufe der Zeit immer mehr ab, da durch

chemische Prozesse die Molekülstruktur der Pigmente zerstört oder verändert wird und sie deswegen die Fähigkeit, Photonen zu absorbieren, verlieren. Dieser Verlustprozess wird durch höhere Temperaturen und vermehrte Lichtaussetzung verstärkt (vgl. Cabansay 2023; vgl. Cencillo-Abad u. a. 2023). Dies lässt darauf schließen, dass dieses Problem der Ausbleichung, etwa bei Fassadenanstrichen, nur durch erneutes Auftragen von Farbe gelöst werden kann. Ressourcenschonend sind diese Pigmentfarben daher nicht. Aufgrund dieser Nachteile werden heute zunehmend Strukturfarben untersucht.

#### 4.3.2. Strukturfarben

In der Natur stellen Strukturfarben die Alternative zu Pigmentfarben dar. Vielen farbenfrohen Tierarten wie zum Beispiel Insekten, Fischen und Vögeln dient Strukturfarbe als der primäre farberzeugende Mechanismus. Strukturfarben entstehen durch zelluläre Strukturen im Mikro- und Nanobereich (vgl. Cabansay 2023; vgl. Cencillo-Abad u. a. 2023; vgl. SIMPLY SCIENCE 2013).

Es gibt zwei verschiedene Varianten von Strukturfarben: Die nicht schillernden und die schillernden Strukturfarben (letztere kurz auch „Schillerfarben“ genannt) (vgl. Brechner 2001). Diese Arbeit beschränkt sich auf die Schillerfarben, weil diese in der später beschriebenen Silberameise wiedergefunden werden.

Bei Strukturfarben wird das Sonnenlicht an den Strukturen reflektiert. Die Oberflächenstruktur des Tieres besteht aus unterschiedlichen Schichten, die die Strahlung verschiedener Wellenlängen unterschiedlich reflektieren. Die Wellenlänge bestimmt somit, ob die Strahlung Schichten durchdringen kann und erst an einer der unteren Schichten reflektiert wird, oder ob sie an der obersten Schicht reflektiert wird. Aus diesem Grund gibt es auch keinen gemeinsamen Zeitpunkt oder Ort der Reflexion und es kann zur Interferenz der reflektierten Strahlungen kommen. Destruktive Interferenz löscht die Strahlung und daher die Farbe, die der Mensch bei dieser Wellenlänge wahrnimmt, aus, aber konstruktive Interferenz verstärkt die Intensität der Strahlung und daher die mit ihr korrespondierende Farbwahrnehmung. Dadurch werden derartig intensive Farben erzeugt, wie dies durch Pigmentfarben nicht geschehen kann (vgl. Meyer 2007, 32; vgl. SIMPLY SCIENCE 2013).

Gleichzeitig führt dies aber dazu, dass die Wahrnehmung der Farben vom Blickwinkel des Betrachters abhängig ist (vgl. Meyer 2007, 32). Das hat eine Auswirkung auf die Möglichkeiten

der kommerziellen Anwendungen, da oft eine bestimmte Farbe gewünscht wird und nicht von der Betrachterposition abhängige Farben.

Ein Vorteil von Strukturfarben ist jedoch, dass keine chemisch erzeugten Pigmente benötigt werden, die nicht abbaubar sind. Stattdessen können die benötigten Strukturen mit biologisch abbaubaren Materialien hergestellt werden. Ein weiterer positiver Effekt ist, dass Strukturfarben ihre Farbintensität für mehrere Jahrhunderte behalten können, es sei denn, die Strukturen würden zerstört werden. Sie würden jedoch nicht wie Pigmentfarben im Laufe der Zeit ausbleichen (vgl. Cabansay 2023).

Es gibt Tiere, die diese Strukturen dual nutzen: einerseits zur Farberzeugung, andererseits als eigenes, integriertes Kühlungssystem. Die Strukturen auf der Oberfläche des Tieres reflektieren die Infrarot-Strahlung so effektiv, dass das Tier durch die Strahlung nicht oder kaum erwärmt wird. Diese Kühlungssysteme werden als PRC- oder PDRC-Systeme bezeichnet (siehe Abschnitt 3.1.) Strukturfarben oder einfacher gesagt Strukturen im Mikro- und Nanobereich könnten also bei Auftragung Objekte kühlhalten (vgl. Cabansay 2023).

Das Übertragen dieser Kühlungsstrukturen in die Technik ist das Ziel vieler Forschungsteams. Um zu zeigen, dass man derartige Strukturen übertragen kann und diese dann immer noch die Struktureigenschaften (Farbgestaltung & eventuell einen Kühlungseffekt) beibehalten, wird im folgenden Abschnitt ein Experiment präsentiert, das in einer Vorlesung der Professorin Gebeshuber an der TU Wien durchgeführt wurde, und die Übertragung von Strukturen zur Farberzeugung zeigt. Dabei wurden Strukturen einer CD, die dieser ihren regenbogenfarbenen schillernden Glanz verleihen, auf ein Stück Schokolade übertragen. Die Schokolade zeigte danach auch den CD-Regenbogenglanz, da die kopierten Strukturen das Licht dafür in gleicher Art wie die CD reflektieren (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

#### 4.4. Regenbogenschokolade-Experiment

Für das Experiment wird eine CD, eine Schere, Klebeband, eine Tasse, heißes Wasser und ein Stück Schokolade benötigt (siehe Abb. 4). Mit der Schere schneidet man ein Stück der CD ab, etwa in der Größe des Schokoladenstücks. Die Silberfolie der CD wird nun durch Abheben mit dem Klebeband entfernt. Diese Entfernung ist notwendig, da sich unter der Folie die Strukturen, die für die Lichtreflexion verantwortlich sind, befinden. Die nun von der Folie freie CD, darf nicht mehr mit Fingern oder anderem berührt werden, da sonst die Strukturen auf ihrer Oberfläche beschädigt werden. Nun wird eine Tasse mit heißem Wasser befüllt, bis sich ihre

Unterseite anwärmt. Das Wasser kann daraufhin wieder ausgegossen werden. Das Schokoladestück wird nun auf der warmen Seite der Tasse positioniert und wenige Sekunden gewartet, bis die Schokolade eine leicht angeschmolzene Seite besitzt. Daraufhin wird das CD-Stück auf der Schokolade positioniert und nicht mehr bewegt. Danach wird die Schokolade in einen Kühlschrank gebracht und dort eingefroren. Durch die vorherige Erwärmung der Schokolade und die dadurch entstehende weiche Oberfläche, konnten die Strukturen hineingedrückt werden. Durch das Einfrieren festigen sich die Strukturen. Nach circa 15 Minuten kann die Schokolade aus dem Kühlschrank entnommen und das CD-Stück abgenommen werden. Die CD-Strukturen wurden kopiert und die Schokolade leuchtet nun, wenn man sie mit Licht bestrahlt, in Regenbogenfarben, wie auf Abb. 5 zu sehen ist. Essbar ist die Schokolade immer noch und das CD-Stück kann noch viele Male zur Übertragung seiner Strukturen dienen. Dieses Experiment zeigt, dass die Übertragung von Strukturen, die Farben erzeugen, möglich ist. Das ist ein Indiz dafür, dass auch Kühlungsfunktionen durch Strukturen auf Materialien übertragen werden können.

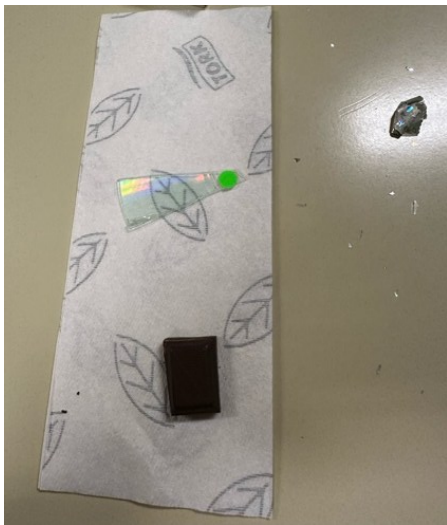


Abb. 4: Materialien für das Experiment

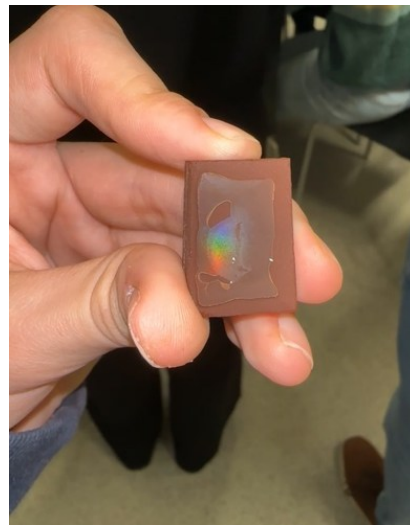


Abb. 5: Regenbogenfarbefeekt nach Übertragung am Schokoladenstück

#### 4.5. Die Silberameise

Wie in 3.1.1. beschrieben nutzen bestimmte Tiere Strukturen auf ihrer Oberfläche als Kühlungsmechanismus. Es gibt Versuche, etwa die Flügelstrukturen eines Schmetterlings in die Technik zu übertragen, doch wie Prof. Gebeshuber im Interview am 18.12.2024 erklärte, sind die Strukturen des Schmetterlings zwar äußerst effektiv in ihrer Kühlung für den Schmetterling, aber zu komplex, um sie mit dem heutigen Stand der Technik auf Materialien zu übertragen (siehe

Anhang S. 34). Daher beabsichtigt ein Forschungsteam an der TU Wien, eine einfachere Tierkühlungsstruktur auf Materialien zu übertragen: die der Silberameise.

Die Silberameise (*Cataglyphis bombycina*) lebt in der Sahara. Sie gilt im Verhältnis zu ihrer Körpergröße als eines der schnellsten Tiere der Welt. Diese Geschwindigkeit benötigt sie, um zu Mittag bei der Nahrungssuche am bis zu 60 Grad Celsius heißen Wüstenboden nicht zu verbrennen. Dass sich die Silberameise zu Mittag ins Freie begeben kann, verschafft ihr große Vorteile, da sie zu dieser Zeit Fressfeinde wie Eidechsen meiden kann. Diese halten sich am Tag auf Grund der Hitze nicht im Freien auf. Abgesehen von ihrer Geschwindigkeit helfen der Silberameise einerseits Hitze-Schock-Proteine, die kurz bevor sie ihr Nest verlässt, produziert werden, und andererseits ein PDRC-System (vgl. Geo 2024; vgl. Buehler 2019; vgl. Türk 2023). Um dies zu erkennen, muss man das Exoskelett der Ameise genauer betrachten. Dort befinden sich Haare aus Chitin, die durch ihre Mikro- und Nanostrukturen einen silbernen Glanz erzeugen, der der Silberameise ihren Namen gibt. Im Gegensatz zu menschlichen Haaren, deren Querschnitt rund ist, haben die Haare der Silberameise einen dreieckigen Querschnitt. Die zwei Oberseiten der Haare, die von der Ameise wegzeigen, weisen kleine Rillen auf. Die Haarunterseite, die zur Ameise zeigt, ist glatt. Die Rillenstruktur agiert als Reflexionsbeugungsgitter und reflektiert die Strahlung (vgl. Hammel 2023; vgl. LEIFIPhysik 2025).

Ergänzend kommt es durch die flache Unterseite der Haare und die darunterliegende Schicht mit einem niedrigem Brechungsindex zur Totalreflexion der Strahlung der Sonne. Um totalreflektieren zu können, gibt es einen kleinen Luftspalt zwischen den Haaren und der Körperoberfläche (siehe Anhang S. 39) (siehe Abb. 6 und 7).

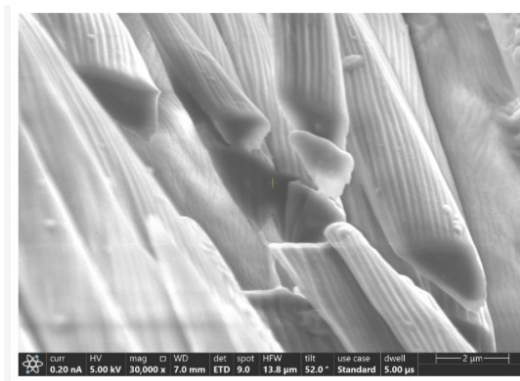


Abb. 6: Ameisenhaare

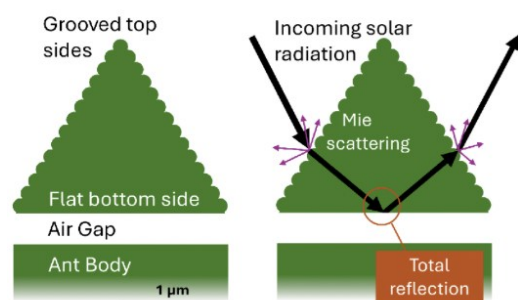


Abb. 7: Reflexion an Ameisenhaar

Diese Strukturen verstärken insbesondere das Infrarot-Emissionsvermögen und ermöglichen es der Ameise somit, das PDRC-Prinzip für sich zu nutzen. Dies geschieht im

Wellenlängenbereich des atmosphärischen Fensters, was Voraussetzung für die technische Nutzung von PDRC ist, ohne die Erdatmosphäre zu erwärmen (siehe Abschnitt 4.1.).

Damit eine technische Umsetzung dieser Strukturen als Ersatz für traditionelle Kühlungssysteme in Frage kommt, muss garantiert sein, dass PDRC über einen großen Bereich von Einfallswinkeln der Strahlung funktioniert. Dies ist notwendig, um die Kühlung von Hausfassaden unabhängig vom Stand der Sonne zu ermöglichen. Diese Bedingung wird von den PDRC-Strukturen der Silberameise erfüllt. Winkelunabhängigkeit und Emission von IR-Strahlung im atmosphärischen Fenster machen sie daher zu einer Mustervorlage, die man für Kühlungssysteme für Gebäude verwenden könnte (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

Das Forschungsteam der TU Wien hat jedoch nicht nur das Ziel, diese Strukturen auf ein anderes Material für spätere Anwendungen zu übertragen, sondern sie auf biologisch reichlich vorkommende, billige Materialien zu drucken (siehe Anhang S. 33-34). Für ihre Forschungen untersuchte das Forschungsteam Chitin und Chitosan darauf, ob eine Übertragung von Mikro- und Nanostrukturen möglich wäre und ob dabei die Kühlungsstrukturen erhalten bleiben.

#### 4.5.1. Chitin

Chitin ist ein reichlich vorhandenes Biopolymer, das in Exoskeletten von Arthropoden und Pilzen gefunden wird. Dort dient es als Strukturelement in den Zellwänden und Panzern von Insekten. Es ist biologisch abbaubar und ähnelt in seinem Aufbau Zellulose (vgl. SIMPLY SCIENCE 2013; vgl. Gebeshuber u. a. 2024). Chitin kann durch Shrimp-Abfälle oder im Bioreaktor durch Pilze, zum Beispiel *Aspergillus niger*, gewonnen werden (siehe Anhang S. 34). Ein Vorteil von Chitin ist seine mechanische Stabilität, die durch Wasserstoffbrücken erzeugt wird. Diese Stabilität ist eine Voraussetzung für Anwendungen in Außenbereichen wie Fassadenanstrichen. Jedoch besitzt diese Stabilität auch einen Nachteil, da sie die Übertragung, also den Druck von Mikro- und Nanostrukturen auf die Chitinoberfläche erschwert (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

#### 4.5.2. Chitosan

Chitosan entsteht durch eine chemische Veränderung (die Deacetylierung) von Chitin und ist wasserlöslich. Bei der Deacetylierung wird durch Säuren und Laugen eine Acetylgruppe

abgespaltet. Chitosan kann man leicht zu einer Folie verarbeiten, die die Übertragung von Strukturen auf sie ermöglicht (vgl. Gebeshuber u. a. 2024; vgl. Gruber 2023).

#### 4.5.3. Experimente mit Chitin und Chitosan

Ziel des TU-Forschungsteams ist es, Chitosan und Chitin so zu verwenden, dass die positiven Eigenschaften beider Materialien genutzt werden. Für einen ressourcensparenden Vorgang soll Chitin aus tierischen Abfällen, wie Krabbenschalen, gewonnen werden. Dieses Chitin soll zu Chitosan umgewandelt werden, um die leichtere Übertragung der Strukturen zu ermöglichen. Danach soll das bedruckte Chitosan wieder chemisch in Chitin umgewandelt werden, um die positive Widerstandsfähigkeit gegenüber Witterungsbedingungen im Freien zu erhalten (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

In Experimenten testeten die Forscher\*innen die Witterungsbeständigkeit und Wetterresilienz von Chitin, ebenso wie die Übertragung von Strukturen auf Chitosanstreifen (Chitosanfolien). Dafür wurde Krabbenschalenabfall von einem lokalen Markt gesammelt und das sich darin befindende Chitin Heiz- und Kühlzyklen ausgesetzt. Um einen heißen Sommer zu simulieren, wurden die Materialien schwankenden Temperaturen zwischen 30 und 50 Grad Celsius ausgesetzt. Das wurde dreißigmal für jeweils acht Stunden wiederholt. Für die Simulation kalter Tage wurden die Temperaturen zwischen -5 und +5 Grad Celsius angesetzt und nach der gleichen Vorgehensweise wie bei der Simulation warmer Tage gehandelt. Vor und nach den Zyklen zeigte das Chitin kaum eine Veränderung (siehe Abb. 8 und Abb. 9) (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

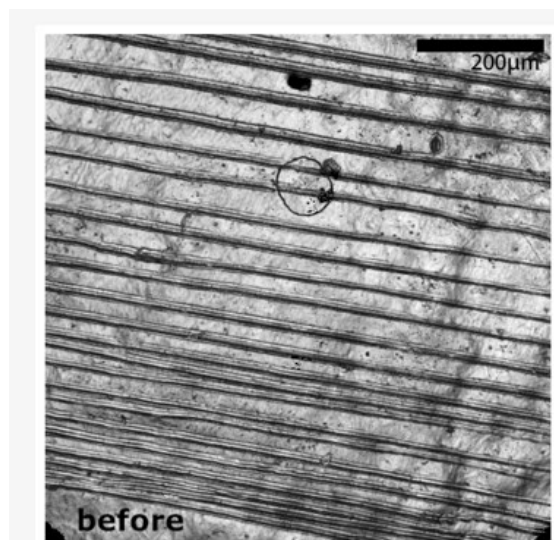


Abb. 8: Chitin vor Aussetzung in Wetterzyklen

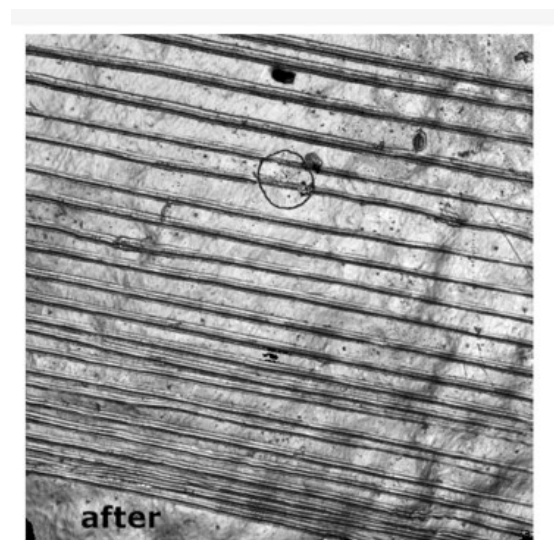


Abb. 9: Chitin nach Aussetzung in Wetterzyklen

Um die Struktur-Aufnahmefähigkeiten von Chitosan zu testen, wurden Chitosanfolien hergestellt. Vorerst wurden die Mikrostrukturen einer CD auf diese übertragen, um zu zeigen, dass Chitosan den Abdruck von Mikrostrukturen annehmen kann. Dies war erfolgreich, da die Chitosanfolie nach der vollendeten Übertragung so wie die CD regenbogenfarben glänzte (siehe Abb. 10) (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

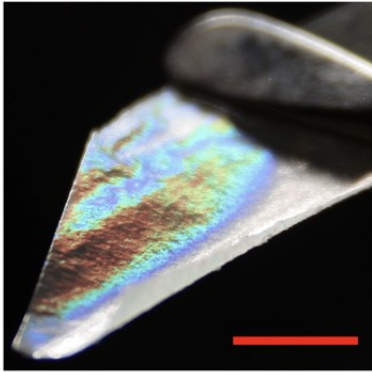


Abb. 10: Regenbogenglanz auf Chitosanfolie nach erfolgreicher Übertragung der CD-Strukturen

Die Übertragung der Ameisenhaarstruktur erfolgte indirekt (siehe Abb. 11): Über einen Polyvinylsiloxan-Stempel (kurz PVS-Stempel – dasselbe Material, welches auch häufig für das Erstellen von Zahnabdrücken verwendet wird) wurde ein Abdruck der Haaroberfläche vom Hinterteil einer Silberameise genommen. Auf das so erhaltene „Negativ“ (der gewünschten Struktur) trug man dann die Chitosanlösung auf und ließ sie trocknen (vgl. Gebeshuber u. a. 2024). Diese Übertragung funktioniert ähnlich wie beim Schokolade-Experiment (siehe Abschnitt 4.4.).

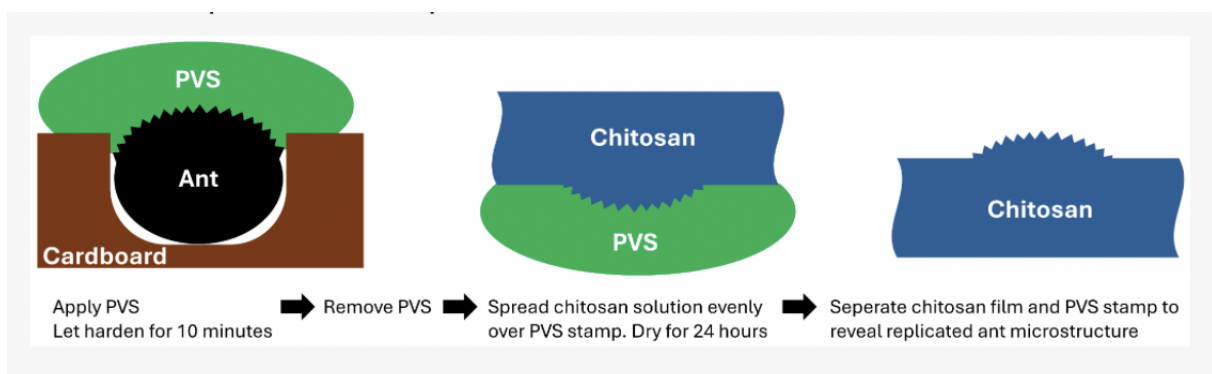


Abb. 11: Schema des Druckprozesses

Bei dieser indirekten Art der Übertragung trat das Problem auf, dass sich PVS und Chitosan gegenseitig abstießen und der direkte Kontakt nicht möglich war. Daher wurden verschiedene Maßnahmen getroffen, um dem Problem entgegenzuwirken: Chitosan mit einer höheren Viskosität wurde genutzt, und weiters ein anderes Druckverfahren angewandt. Dadurch entstanden zwei Chitosanfolien, die für weitere Tests nutzbar waren. Die Folien enthielten größtenteils die gleichen Strukturen wie der Stempel, jedoch weniger ausgeprägt (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

Bei der Übertragung konnte die als Totalreflexionsschicht fungierende Unterseite der dreieckigen Haarstrukturen nicht gedruckt werden. Um eine möglichst effiziente Kühlung, die über einen weiten Bereich von Einfallswinkeln der Infrarotstrahlung funktioniert, zu erreichen, wird aber eine Totalreflexionsschicht an der Unterseite der Strukturen benötigt. Um diese zu erhalten, muss sich unter der Chitinschicht ein Material mit einem niedrigeren Brechungsindex als Chitin befinden (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

Das nächste Ziel des Forschungsteams ist die chemische Umwandlung von bedrucktem Chitosan zu Chitin, das immer noch die gleichen Strukturen enthält. Weiters sollen noch mehr Witterungstests durchgeführt werden (vgl. Gebeshuber u. a. 2024).

Zur großflächigen Übertragung der Strukturen auf Fassaden schlägt das Forschungsteam keine Farbwalze, sondern eine spezielle, mehrere tausend Male wiederverwendbare Strukturwalze vor. Ihre Herstellung würde Zeit und Energie kosten, aber dies wäre der einzige hohe Energieaufwand, der für dieses Kühlungssystem benötigt wird. Nach Ansicht von Prof. Gebeshuber könnte es in Zukunft möglich sein, mit dieser von der Ameise inspirierten PDRC-Technik ganze Städte zu kühlen. Sie meinte weiters, dass es das Ziel sei, dass diese Strukturwalze in heißen Ländern unter den Leuten weitergegeben würde, so dass jeder sein Haus mit Strukturfarbe versehen könne. Damit könnte auf eine Klimaanlage verzichtet, da Temperaturreduktionen durch die Strukturen im prallen Sonnenlicht von 10 bis 15 Grad Celsius möglich sind (siehe Anhang S. 35). Der Farbeindruck, der durch die Strukturen an den Hausfassaden entstünde, wäre silbrig, gleichsam wie am Ameisenkörper (siehe Anhang S. 39).

## 5. Diskussion

Betrachtet man die Forschungsergebnisse der TU Wien, erkennt man, dass die durch Ameisen inspirierte PDRC-Technik große Vorteile mit sich bringen kann. Es können biologisch abbaubare, billige und häufig vorkommende Materialien verwendet und jede der Strukturwalzen kann

tausende Male benützt werden. Durch den Einsatz dieser Technik kann eine Temperaturreduktion von 10 bis 15 Grad Celsius erzielt werden, womit in vielen Fällen auf die Verwendung einer Klimaanlage verzichtet werden kann. Selbst bei hohem Energieaufwand für die Produktion von Strukturwalzen – derzeit ist dieser noch nicht abschätzbar – lässt sich vermuten, dass ein nicht unerhebliches Potential für langfristige Stromersparnis gegeben ist, da der Kühlungseffekt dauerhaft nutzbar ist.

Jedoch stellt sich die Frage, inwiefern es realistisch ist, Gebäude aus verschiedenen Materialien mit Strukturfarben zu versehen. Die Möglichkeiten, Fassaden aus Metall, Glas, Holz usw. zu bedrucken, müssten überprüft werden. Durch weitere Experimente wird sich weisen, ob diese Methode bei Gebäuden aller Materialien oder großen Bauwerken wie Hochhäusern erfolgreich eingesetzt werden kann und ob der Kühleffekt in Innenräumen den theoretischen Hoffnungen nahekommt.

Bei der Anwendung von Strukturfarben als Fassadenanstrich wird zu beachten sein, dass nicht nur Nützlichkeitsabwägungen, sondern auch Ästhetik eine Rolle spielen. Die Kühlstrukturen, die der Silberameise ihre Farbe verleihen, behalten auch bei der Übertragung auf andere Objekte ihre silberne Farbe. Das mag bei kleinen Objekten nicht weiter wichtig sein, werden aber Häuser oder gar ganze Stadtteile mit diesen Strukturen versehen, so wird das farbliche Erscheinungsbild dieser Stadtteile stark verändert. Es bleibt abzuwarten, ob es deswegen im Falle der praktischen Anwendung nicht zu Widerstand und Vorbehalt von Teilen der betroffenen Bevölkerung kommt, die den Einsatz dieser Technik erschweren könnten. In Zusammenhang damit kann aber die Frage aufgeworfen werden, ob technische Entwicklungen auch andere Farbgebungen zulassen. Weitere Forschung dazu ist zweckmäßig.

Das Übertragen von Strukturen ist, wie diese Arbeit zeigt, nicht nur bei neuen Kühlsystemen, sondern ebenso bei der Entwicklung anderer Technologien möglich. Bionik kann also in vielen unterschiedlichen Gebieten eine Hilfestellung oder Problemlösung bieten. Bionik besteht nicht nur darin, Funktionalitäten aus der Biologie unmittelbar zu übernehmen, sondern darin, aus ihnen Inspiration für technische Neuerungen zu gewinnen. Einsatzbereiche finden sich derzeit unter anderem in der Medizin, bei klimafreundlicheren Autos, bei der Reduktion der Wasserverschmutzung und bei energiesparenden Kühlmethoden.

Um das Potential auszunutzen, das die Bionik bieten kann, ist es wichtig, diese unmittelbar in die Forschung und Entwicklung der Industrie zu integrieren. Die Entwicklung neuer oder verbesserter Produkte erfolgt häufig durch Innovationen in den technischen Abteilungen von Unternehmen. Deren Aufgabe besteht darin, kosteneffiziente Lösungen zu entwickeln. Für

Unternehmen spielt es keine Rolle, woher die Inspiration für die Entwicklung ihrer Produkte kommt, solange sie damit Gewinn machen, worauf Prof. Gebeshuber auch nachdrücklich hinweist. Es sollte verstärkt auf die Möglichkeiten des Einsatzes bionischer Lösungen bei der technischen Umsetzung von Produktentwicklungen aufmerksam gemacht werden, um überdies Vorteile wie Ressourcenschonung, Einsatz abbaubarer Materialien und Energieeffizienz zu erzielen.

Eine vertiefte Integration der Bionik in die technische Entwicklung könnte auch zur Entwicklung neuer, derzeit noch sehr entfernt scheinender Technologien führen. So wies Prof. Gebeshuber darauf hin, dass sie im Bereich der Pflanzengallen das größte Potenzial für zukünftige Entwicklungen im Bereich der Güterproduktion sehe. Insekten geben dabei Anweisungen an Pflanzen weiter, etwa durch einen Insektenstich, um die Pflanze dazu zu bringen, eine Art Wohnhöhle am Pflanzenkörper anwachsen zu lassen. Könnte man diesen Prozess nutzbar machen, so ist es nicht undenkbar, dass einem Baum der Befehl gegeben werden kann, drei Bretter wachsen zu lassen, die sich ernten lassen, ohne gleich den ganzen Baum fällen zu müssen. Noch weiter gedacht könnte auf diese Weise die Produktion ganz anderer Produkte, vielleicht sogar hochtechnischer wie Autos oder Handys, durch Pflanzen erfolgen. Forschung auch in diesem Bereich könnte ungeahnte Entwicklungen nach sich ziehen, selbst wenn ein möglicher Erfolg noch in ferner Zukunft liegt (siehe Anhang S. 36-37).

## 6. Conclusio

Die Natur hat nachhaltige, energieeffiziente und ressourcenschonende Methoden, Systeme und Prozesse entwickelt. Die Bionik bemüht sich darum diese ausgeklügelten Systeme durch Abstraktion, Veränderungen und Verbesserungen in die Technik zu übertragen. Durch die Übertragung verschiedener tierischer Körperstrukturen konnten schon Prototypen von Filtrationssystemen für Mikroplastik, einem neuen Gerät für die Schlüsselloch-Chirurgie und neue Treibstoff sparende Autoformen hergestellt werden. Der Einsatzbereich der Bionik scheint in allen Bereichen der Industrie möglich zu sein, da die effizientesten Lösungen gesucht werden. Bei der Kühlung von Gebäuden können durch die von der Silberameise abstrahierten Strukturen, die PDRC nutzen, Energie, Strom und die damit verbundenen Kosten gespart werden. Ein Fassadenanstrich mit Strukturfarben könnte Klimaanlage ersetzen und auch dort, wo Strom nicht verfügbar ist oder die finanziellen Verhältnisse diese nicht zulassen, für Kühlung sorgen. Jedoch müssen mögliche Schwierigkeiten bei der Bedruckung unterschiedlicher Materialien (Glas,

Holz, usw.) beachtet werden. Auch ist der ästhetische Aspekt, also der durch Strukturen erzeugte Farbeindruck, zu bedenken. Vollständig anwendbar sind dieses Kühlungssystem sowie die anderen zuvor genannten Prototypen noch nicht, sie ebnen aber den Weg für weitere Forschung, die zu nachhaltigen und effizienten Ergebnissen führen kann.

# Bibliografie

Aili, Ablimit, Jingjing Chen, Tengyao Jiang, Gang Tan, Yonggang Wen, Ronggui Yang und Xiaobo Yin. 2024. „Passive daytime radiative cooling: Moving beyond materials towards real-world applications”. 26. Dezember 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949821X24000267>.

Aryee, Patrick. 2022. *30 TIERE, DIE UNS KLÜGER MACHEN: Geniale Inspirationen für die Zukunft*. 1.Aufl. München: dtv Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.

Benett, Paul und Steven Tanaka. 2016. *BIONIK: HIGHTECH AUS DER NATUR*. 1.Aufl. Köln: Fackelträger Verlag GmbH.

Blüchel, Kurt G. und Werner Nachtigall. 2001. *Das große Buch der BIONIK: Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur*. 2.Aufl. Stuttgart/München: Deutsche Verlags-Anstalt.

Brandt, Heike, Diana Freudendahl und Ramona Langner. 2024. „Passive Strahlungskühlung“. 27. Dezember 2024. <https://werkstoffzeitschrift.de/passive-strahlungskuehlung/>.

Brechner, Elke, Barbara Dinkelaker und Daniel Dreesmann. 2001. „Strukturfarben“. 27. Dezember 2024. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/strukturfarben/11409>.

Buehler, Jake. 2019. „World’s fastest ants found racing across the Sahara”. 2. Jänner 2025. <https://www.nationalgeographic.com/animals/article/silver-saharan-ants-fastest-desert>.

Cencillo-Abad, Pablo, Debashis Chanda, Daniel Franklin, Pamela Mastranzo-Ortega und Javier Sanchez-Mondragon. 2023. “Ultralight plasmonic structural color paint”. 29. September 2024. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adf7207>.

Eisenbach, Claus D. 1997. „Pigmente – Farbmittel und Funktionsträger“. 4. Februar 2025. <https://www.spektrum.de/magazin/pigmente-farbmittel-und-funktionstrae-ger/824173#:~:text=Absorption%2C%20Reflexion%20und%20Streuung&text=Wäh- rend%20Selbstleuchter%20additiv%20Farben%20mischen,ein%20blaues%20ver- hält%20sich%20umgekehrt>.

Gebeshuber, Ille C. 2016. *Wo die Maschinen wachsen: Wie Lösungen aus dem Dschungel unser Leben verändern werden*. 1.Aufl. Wals bei Salzburg: Ecowin Verlag.

Gebeshuber, Ille C., Richard W. van Nieuwenhoven, Wilfried Vetter, Karin Whitmore und Markus Zimmerl. 2024. „Biomimetic Cooling: Functionalizing Biodegradable Chitosan Films with Saharan Silver Ant Microstructures”. 18. Dezember 2024. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

Gebeshuber, Ille C. 2013. „Lernen von der Natur: Für besseres Wirtschaften und nachhaltige Technologien“. 20. November 2024. [https://www2.iap.tuwien.ac.at/~gebeshuber/Ille\\_UMP\\_2013.pdf](https://www2.iap.tuwien.ac.at/~gebeshuber/Ille_UMP_2013.pdf).

Gruber, Sabine und Lisa Baumgartner. 2023. „Pilze und Insekten: Chitosan biotechnologisch nachhaltig herstellen“. 11. Februar 2025. <https://magazin.fh-campuswien.ac.at/unser-podcast/detail/pilze-und-insekten-chitosan-biotechnologisch-nachhaltig-herstellen.html#:~:text=Chitin%20wird%20durch%20die%20Umwandlung,dann%20auch%20in%20Wasser%20löslich.>

Hammel, August. 2023. „RITTER IN GLÄNZENDER RÜSTUNG“. 2. Jänner 2025. [https://www.technischesmuseum.at/museum/tmw-zine\\_-\\_unsere\\_storys/ki\\_zine/magazin\\_detail&j-cc-id=1679570340187&j-cc-node=magazineintrag&j-cc-name=hybrid-content.](https://www.technischesmuseum.at/museum/tmw-zine_-_unsere_storys/ki_zine/magazin_detail&j-cc-id=1679570340187&j-cc-node=magazineintrag&j-cc-name=hybrid-content)

Hodges, Glenn. 2013. „Raser des Eismeers“. 5. Februar 2025. [https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/wie-kaiserpinguine-so-schnell-schwimmen-koennen-a-879674.html.](https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/wie-kaiserpinguine-so-schnell-schwimmen-koennen-a-879674.html)

Huang, Jinhua, Shenghua Lin, Yuehui Lu, Weijie Song, Mingming Wei, Wanchun Wu und Hua Xu. 2020. „Flexible passive radiative cooling inspired by Saharan silver ants“. 26. Dezember 2024. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024820301161.](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024820301161)

Jung, Yeongju und Seung Hwan Ko. 2024. „Radiative cooling technology with artificial intelligence“. 19. Jänner 2025. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004224025501.](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589004224025501)

LEIFIPhysik. 2025. „Der Lotuseffekt – selbstreinigende Oberfläche“. 6. Februar 2025. [https://www.leifiphysik.de/uebergreifend/bionik/grundwissen/der-lotuseffekt-selbstreinigende-oberflaeche.](https://www.leifiphysik.de/uebergreifend/bionik/grundwissen/der-lotuseffekt-selbstreinigende-oberflaeche)

Meyer, Lothar, Kerstin Prokoph, Bernd Raum und Martin Stelzig. 2007. „Licht und Farben“. In Natur Mensch Technik. herausgegeben von Bernd Raum und Gerd-Dietrich Schmidt. 2.Aufl. Berlin: DUDEN PAETEC GmbH.

SIMPLY SCIENCE. 2013. „Strukturfarben – Die schillernde Farbenwelt des Tier- und Pflanzenreichs“. 30. Dezember 2024. [https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/strukturfarben-die-schillernde-farbenwelt-des-tier-und-pflanzenreichs?r=1.](https://www.simplyscience.ch/teens/wissen/strukturfarben-die-schillernde-farbenwelt-des-tier-und-pflanzenreichs?r=1)

studyflix. 2025. „Lotuseffekt“. 6. Februar 2025. [https://studyflix.de/biologie/lotuseffekt-3498.](https://studyflix.de/biologie/lotuseffekt-3498)

Türk, Franziska. 2023. „Anpassungswunder im Tierreich: Überleben bei bis zu 70 Grad: Wie Hitze-Genies hohen Temperaturen trotzen“. 2. Jänner 2025. [https://www.geo.de/natur/tierwelt/die-tricks-der-hitze-genies-aus-dem-tierreich-33687442.html.](https://www.geo.de/natur/tierwelt/die-tricks-der-hitze-genies-aus-dem-tierreich-33687442.html)

Zeldovich, Lina. 2020. „Cool Butterfly Effect: Insect Equipment Could Inspire Heat-Radiating Tech“. 29. September 2024. [https://www.scientificamerican.com/article/cool-butterfly-effect-insect-equipment-could-inspire-heat-radiating-tech/.](https://www.scientificamerican.com/article/cool-butterfly-effect-insect-equipment-could-inspire-heat-radiating-tech/)

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Wachsstruktur der Pflanze. 11. Februar 2025. <https://studyflix.de/biologie/lotuseffekt-3498>.

Abb. 2: Oberflächen mit geringer und hoher Adhäsion. 11. Februar 2025. <https://studyflix.de/biologie/lotuseffekt-3498>.

Abb. 3: Prototyp des „Mercedes-benz bionic car“, inspiriert vom Kofferrisch. 11. Februar 2025. Benett, Paul und Steven Tanaka. 2016. *BIONIK: Hightech aus der Natur*. S. 139.

Abb. 4: Materialien für Schokolade-Experiment. 18. Dezember 2025. TU Wien.

Abb. 5: Ergebnis des Schokolade-Experiments. 18. Dezember 2025. TU Wien.

Abb. 6: Ameisenhaare. 11. Februar 2025. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

Abb. 7: Reflexion an Ameisenhaar. 11. Februar 2025. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

Abb. 8: Chitosan vor Aussetzung in Wetterzyklen. 11. Februar 2025. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

Abb. 9: Chitosan nach Aussetzung in Wetterzyklen. 11. Februar 2025. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

Abb. 10: Regenbogenglanz auf Chitosanfolie. 11. Februar 2025. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

Abb. 11: Druckprozess. 11. Februar 2025. <https://www.mdpi.com/2313-7673/9/10/630#B2-biomimetics-09-00630>.

# Anhang

Besonderen Dank will ich an dieser Stelle an Prof. Ille C. Gebeshuber aussprechen, die mir nicht nur das folgende Interview gab, sondern auch durch Einladungen zu einer Vorlesung und das Beantworten weiterer Fragen, diese Arbeit unterstützte!

- **Interviewkontext:** Interview für die Erstellung einer VWA, Themenfeld „Bionik“
- **Name der interviewten Person (IP):** Ille C. Gebeshuber, Physikerin
- **Tag & Ort des Interviews:** 18.12.2024, Wien, in TU Wien
- **Dauer des Interviews:** 19:33min.
- **Name der interviewenden Person (I):** Alice Gottesmann, Schülerin

I: Mein Name ist Alice Gottesmann und ich nehme am 18. Dezember 2024 jetzt das Interview für meine VWA mit der Frau Professor Gebeshuber auf. Dann beginnen wir auch gleich mit der ersten Frage: Sie beschäftigen sich mit Bionik und da wollte ich fragen, wie Sie denn dazu gekommen sind, sich besonders mit Bionik zu beschäftigen und dies den Leuten auch näherbringen zu wollen?

IP: Also bei mir ist relativ früh diese Begeisterung losgegangen, über die Welt der Organismen, gesehen aus der Sichtweise der Naturwissenschaften. Ich war damals 17 Jahre alt, als unser Biologielehrer, der Herr Professor Zenkl, uns von Glas machenden Algen erzählt hat. Ich war damals schon völlig fasziniert davon, dass es Algen gibt, die bei Umgebungstemperatur im kalten Wasser im Fluss ein Haus aus Glas für sich machen können. Etwas mehr als ein Jahrzehnt später bei meinem Postdoc in Santa Barbara in Kalifornien an der UCSB, University of California Santa Barbara, war es dann eben meine Aufgabe diese lebenden Kieselalgen, diese lebenden Glas machenden Algen mit einer damals ganz neuen Art der Mikroskopie, der Rasterkraftmikroskopie, anzuschauen. Ich war dann sehr glücklich, dass ich wieder mit Organismen arbeiten konnte und sogar außergewöhnlich mit meinen Lieblingsorganismen. Das hat mich für mein ganzes weiteres Leben geprägt. Als ich dann von diesem Forschungsgebiet „Bionik“ gehört habe, habe ich gewusst, das ist meins. Organismen, nicht nur mit dem Blick der Physikerin sich anzuschauen, sondern auch zu überlegen, welche Eigenschaften kann man wie von den Organismen abstrahiert in die Technik übertragen.

I: Sie beschäftigen sich damit, wie die Natur die Technik inspirieren kann. Es gibt schon viele Bereiche, in denen die Bionik dazu beigetragen hat, technische Innovationen zu schaffen. In welchem Bereich konnte der größte Fortschritt durch Bionik erzielt werden, insbesondere in Hinsicht auf entweder Praktikabilität im Alltag oder positive Auswirkungen auf die Umwelt?

IP: Seit kurzem, seitdem wir Mikroskope zu Verfügung haben, mit denen wir nicht nur in den Nanokosmos reinschauen können, sondern mit denen wir auch im Nanokosmos Materialien verändern können, strukturieren können, sind wir draufgekommen, wie absolut faszinierend Organismen auch auf dieser ganz kleinen Skala aufgebaut sind. Ein Nanometer ist  $10^{-9}$  Meter, also ein Millionstel Millimeter, und in dieser Größenordnung gibt es Wunderwelten, die wir langsam anfangen für uns und unsere Technologien zu erschließen. Dabei sehe ich das größte Potential, darin, dass viele Organismen außergewöhnlicher Weise von uns aus gesehen, von Ihnen aus gesehen, ist das wahrscheinlich das Normalste der Welt, mit herkömmlichen Materialien arbeiten, die biobasiert sind, die abbaubar sind, biologisch abbaubar, die sie aber ganz smart strukturieren. Also sie induzieren Funktionen durch Strukturen in Materialien, die eigentlich normal sind, wie Keratin vom Pferdehuf oder Chitin vom Schmetterlingsflügel. Diese Materialien, die bestehen aus Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff, also abundant chemical elements. Nichtsdestotrotz haben wir wunderbare Funktionalitäten wie Farben, Selbstreinigungsfähigkeit, Unbenetzbarkeit, stealth mechanisms, das bedeutet, das man sich vor Räubern versteckt, eine Motte vor einer Fledermaus zum Beispiel, und ähnliche Funktionalitäten. Das ist jetzt gerade in einer Zeit, wo wir in Bezug auf Ressourcen immer mehr nachdenken sollten: „Wo kriegen wir sie her? Wie gewinnen wir sie? Wollen wir wirklich von Ländern, mit denen wir politisch nicht so übereinstimmen um großes Geld seltene Metalle oder besondere chemische Elemente kaufen? Wohingegen man mit einfachen lokalen Materialien dieselben Funktionalitäten erreichen kann. Ich finde, das ist das absolut zukunftsweisende und wunderbare in der Bionik, wo sich erst in den letzten Jahren herauskristallisiert hat, dass, das möglich ist. Das ist eben das, was meiner Meinung nach die Bionik jetzt schon revolutioniert und in Zukunft noch mehr Impact haben wird.

I: Sie beschreiben in Ihrem Buch die Strukturfarben der Schmetterlinge. Schon im März 2023 gab es ein Forschungsteam der University of Central Florida, das die Ergebnisse eines Forschungsprojekts vorgestellt hat, indem es einen Strukturfarbstoff entwickelt hat, der im Gegensatz zu pigmentbasierten Farben Objekte kühler halten würde und die Menge des erforderlichen

Farbstoffes reduzieren würde. Dadurch könnte Energie für Klimaanlage oder Ressourcen gespart werden. Aber woran scheitert es dann bis heute, diese Strukturfarbstoffe einzusetzen?

IP: Ich kenne die spezielle Arbeit, die Sie da ansprechen nicht im Detail, aber wir haben uns selbst mit Schmetterlingsflügeln und ihren kühlenden Eigenschaften beschäftigt und sind draufgekommen, dass die so unendlich faszinierend, schön, klein, wunderbar sind, dass man diese intricate nanostructures nicht einfach auf Fassaden übertragen kann. Wir wissen, dass sie in Chitin funktionieren, dass einige Schmetterlinge sich dadurch kühlen können, aber wir sind noch viel zu weit davon entfernt, derartige kleinste Strukturen zum Beispiel auf eine Walze zu übertragen, um damit dann die Fassade zu funktionalisieren. Wir haben dann beschlossen, nachdem wir diese wunderschönen funktionalen Schmetterlingsflügelstrukturen gesehen haben und darüber berichtet haben, auf einfachere Strukturen zurückzugreifen. Nämlich auf die dreieckigen Haare der Saharawüstenameise (Silberameise), von der wir die Physik hundertprozentig verstehen und die Chemie verstehen. Das sind Chitin basierte Strukturen, im Gegensatz zu Keratin basierten Strukturen. Mit diesen Saharawüstenameisen dreieckigen Haaren, die eine Kantenlänge von zwei Mikrometern haben, kommen wir in Bereiche die einfacher und leichter durch Pressverfahren auf Fassaden zu transferieren sind. Wir haben auch begonnen Computersimulationen über diese dreieckigen Haare zu initiieren und zu rechnen und es zeigt sich, dass diese Haare vielleicht sogar 10 Mikrometer groß, also Kantenlänge, haben könnten, gleichseitige Dreiecke und 10 Mikrometer, ist dann natürlich schon viel eher in einem Bereich, denn man leichter auf Fassaden übertragen kann. Also da ist das jetzt, wo wir viel Energie reinstecken und hoffen, dass man was Schönes bekommt. Denn die Idee ist Chitin Folien oder Chitosan Folien, die nicht wasserlöslich sind, auf Fassaden zu übertragen, zum Beispiel von Shrimp -Abfällen oder auch im Bioreaktor hergestellt mithilfe von Pilzen, *Aspergillus niger* zum Beispiel macht das, und die dann eben mit dieser nicht Farbwalze, sondern Strukturwalze zu strukturieren, um diese kühlende Funktionalität zu erreichen. Kurz zusammengefasst, der Schmetterling ist wunderschön, aber viel zu kompliziert und wir hoffen, dass wir mit den Saharawüstenameisen schneller, aber gleich gut zum Erfolg kommen.

I: Denken Sie, dass man diese Strukturen inspiriert von der Ameise im großen Raum anwenden könnte. Also, dass man zum Beispiel eine ganze Stadt mit denen „bemalen“ oder strukturieren kann?

IP: Ja, das wollen wir erreichen.

I: Lässt sich dann sagen, wie hoch der Energieaufwand bei der Herstellung von solchen Strukturfarben ist? Oder ob dann durch einen zu hohen Energieaufwand die positiven Effekte neutralisiert werden würden, im Vergleich zu pigmentbasierten Farben?

IP: Also das haben wir noch nicht durchgerechnet, weil man noch weit davon entfernt ist, das großflächig auf Fassaden aufzubringen. Aber bei unserer Arbeit zu der Übertragung der Struktur basierten blitzblauen Farben des Morpho-Schmetterlings auf Künstler\*innenfarben hat sich gezeigt, dass man einen sehr großen Bereich wunderbar strukturieren kann, mit einem sogenannten Meisterstempel. Wenn man diesen Meisterstempel, der vielleicht einen Quadratzentimeter groß ist, Tausende Male reindrücken kann und die Übertragung funktioniert, ist der einzige Anteil, wo man Energieaufwand hat, eben die Herstellung dieses Meisterstempels. In unserem Fall von den dreieckigen Haarstrukturen der Saharawüstenameisen, wäre es die Herstellung dieser Malerrolle, in die man viel Zeit und viel Energie investiert, aber die man dann eben, das ist unsere Hoffnung, unser Traum, unser Wunsch, auch Tausende Male verwenden kann. Also die Idee wäre, dass in heißen Ländern diese Malerrolle dann von einer Hand zur anderen wandert, und die Leute jeweils ihre Häuser funktional kühlend strukturieren können.

I: Denken Sie, dass das jetzt eine Klimaanlage ersetzen könnte, dass dann eben so viel Energie gespart werden würde, dass man die Klimaanlage nur noch weniger brauchen würde und dadurch dann auch Strom sparen könnte?

IP: Naja, wir sind bei 10 bis 15 Grad Celsius im prallen Sonnenlicht Temperaturreduktion im Vergleich zu benachbarten Oberflächen. Also das ist schon gut, also ich glaube, da könnte man sich die Klimaanlagen sparen.

I: Noch eine Frage jetzt mehr zu Ihren persönlichen Erfahrungen. Sie bemühen sich ja, die Bionik vielen anderen Menschen näherzubringen und zu zeigen, aber werden solche Natur

inspirierten Technik-Ideen oft schnell verworfen, da es Vorurteile gibt, dass diese jetzt mit zu hohen Kosten oder zu viel Aufwand verbunden sind und nicht praktisch umsetzbar sind?

IP: Nein, ich glaube, das ist eine falsche Denkweise, wie Sie da die Fragen stellen. Denn den Firmen ist es wichtig, dass sie verkaufbare Produkte haben. Ob die Inspiration aus dem Nachdenken kommt, aus der Natur oder von ganz wo anders her, ist eigentlich egal. Das heißt, es gibt viele bionische Innovationen, die gar nicht als Bionik bekannt sind. Die Firmen stellen sich auch keine Bioniker\*innen ein, sondern Innovator\*innen, die auf ein großes Pool an inspirierenden Entitäten zurückgreifen können. Manche mehr auf die belebte Natur und manche weniger.

I: In welchen Bereichen können Ideen aus der Bionik in der Zukunft am ehesten umgesetzt werden? Gibt es da bestimmte Bereiche, in denen in der Zukunft, wenn es mehr Technologien gibt, sich besonders bionische Ideen verstärken würden oder denken Sie, dass alles irgendwann bionisch sein kann oder nur noch von der Natur inspiriert gearbeitet werden könnte?

IP: Einer der faszinierendsten Aspekte von Lebewesen ist dieser: Wenn man sich zum Beispiel eine Pflanze anschaut, wächst die Pflanze aus einem kleinen Stück Samen. In diesem kleinen Stück Samen ist die gesamte Information drinnen, wie diese kleine Pflanze in Interaktion mit ihrer Umwelt, dann zu einem großen starken zum Beispiel Baum wird. Das faszinierende an diesen programmierbaren Materialien, wenn man es so mit reduktionistischem Blick sieht, ist, dass sie mit lokalen Materialien und Umgebungsbedingungen mit Wasser basierter Chemie ihre Strukturen in funktionaler Form aufbauen und am Ende ihres Lebens dann auch noch als Dünger oder als Futter, wenn sie verfallen, verwendet werden können. Ich glaube, dass die große Zukunft der Bionik darin besteht, analog zu derartigen wachsenden Pflanzensamen, die zu großen Bäumen werden, unsere Dinge wachsen zu lassen, da wo wir sie brauchen. Sei es sowas wie ein Handy, das in der Zukunft vielleicht ganz anders aussieht, oder sowas wie ein Haus, oder sowas wie ein Tisch, oder sowas wie ein Schwimmbad, oder sowas wie ein Auto. Und unsere wissenschaftlichen Zugänge in Bezug auf dieses growth, auf dieses Wachstum, machen wir einen kleinen Umweg, und zwar den Umweg machen wir über Pflanzengallen. Pflanzengallen sind von Insekten unprogrammierte Teile einer Pflanze, bei der die Pflanze ein Haus für die Nachfahren, für die Kinder der Insekten, baut. Diese chemische Information, wie dieses

Haus ausschauen soll, wie groß das Haus ist, wo das Futter in diesem Haus drinnen ist, wo die Ausgangstüren sind und so weiter und sofort, schickt das Insektenei, oder die Larve, oder die Raupe, je nachdem in welchem Entwicklungsstadiums sie gerade ist, über nur zwei oder drei Pflanzenzellen in zum Beispiel die Eiche rein. Die Eiche lässt sich dann überreden, überzeugen, wer weiß welches Wort man da am besten verwendet, ein Haus für dieses Insekt zu bauen. Das versuchen wir zu analysieren und zu verstehen. Ich bin da auch Mitglied in der British Plant Gall Society, also in der englischen Pflanzengallengesellschaft, und wir waren jetzt im September 2024 beim Pflanzengallen-Wochenende in Peterborough in der Nähe von Cambridge und haben uns verschiedenste Gallen auf verschiedenen Pflanzen angesehen, die absolut faszinierend und interessant sind für uns als Bioniker\*innen, Physiker\*innen, weil diese Insekten das mit ganz wenig Material machen, das aber absolut spezifisch den Baum adressiert. Wenn man eine Galle sieht als Spezialist\*in kann man sofort zwei lateinische Namen sagen, nämlich den Namen der Pflanze und den Namen des Insekts, das diese Galle verursacht. Es ist absolut hochspezifisch und faszinierend und mein Traum wäre eben, einem Baum zum Beispiel klarzumachen: „Lieber Baum, wenn du mir auf der Seite fünf Bretter wachsen lässt, dann schneide ich dich nicht um, sondern verwende die fünf Bretter, die du mir zur Verfügung stellst.“

I: Vielen Dank! Das waren alle Fragen, ich beende jetzt die Aufnahme!

Ich bin damit einverstanden,

- dass das Interview von Frau Alice Gottesmann digital aufgezeichnet wird.

ja  nein

- dass das Interview von Frau Alice Gottesmann transkribiert wird.

ja  nein

- dass ausgewählte Passagen des transkribierten Interviews in der VWA von Frau Alice Gottesmann zitiert werden.

ja  nein

- dass das transkribierte Interview der VWA von Frau Alice Gottesmann beigelegt wird.

ja  nein

- Ich möchte die ausgewählten Interviewpassagen, die verwendet werden, vorab nochmals sehen.

ja  nein

- Mein Name darf in der VWA genannt werden

ja  nein

Unter den oben angeführten Bedingungen erkläre ich mich bereit, das Interview zu geben.

Vor- und Nachname (Druckschrift): ILSE GEBESTHUBER

Ort und Datum: Wien, 18.12.2024

Unterschrift: 

Als interviewende Person verpflichte ich mich zu einem ordnungsgemäßen Umgang mit den im Interview vorkommenden personenbezogenen Daten und dazu, die oben vereinbarten Rahmenbedingungen zu wahren.

Vor- und Nachname (Druckschrift): Alice Gottesmann

Ort und Datum: Wien, 18.12.2024

Unterschrift: 

## Emailkorrespondenz mit Prof. Gebeshuber wegen aufgekommener Fragen:

21. Jänner 2025



**Gebeshuber, Ilse-Christine**

Aw: VWA

An: Alice Gottesmann

21. Jänner 2025 um 10:47

---

Liebe Alice!

Es würde ausschauen wie die Ameisen - 🐜 kleine silberne Astronauten.

Beste Grüße,

Ille

11. Februar 2025



**Gebeshuber, Ilse-Christi...**

Aw: Interview

An: Alice Gottesmann

---

Liebe Frau Gottesmann

ja die Totalreflexion war wegen des Luftspalts

die zweite Frage kann ich leider nicht beantworten weil die Experimente hat mein Student gemacht und der ist gerade auf Semesterferien

liebe Grüße und Alles Gute

Ille Gebeshuber

## **Eigenständigkeitserklärung**

---

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benützt habe. Die Stellen, die anderen Werken (gilt ebenso für Werke aus elektronischen Datenbanken oder aus dem Internet) wörtlich oder sinngemäß entnommen sind, habe ich unter Angabe der Quelle und Einhaltung der Regeln wissenschaftlichen Zitierens kenntlich gemacht. Diese Versicherung umfasst auch in der Arbeit verwendete bildliche Darstellungen, Tabellen, Skizzen und Zeichnungen.

Für die Erstellung der Arbeit habe ich keine generativen KI-Tools verwendet.

Die verwendeten Hilfsmittel wurden vollständig und wahrheitsgetreu (inkl. Produktversion und Prompt) ausgewiesen.

Wien, 13.02.2025

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gottschalk', with a long, sweeping flourish extending to the right.

## Begleitprotokoll

Name der Schülerin: Alice Gottesmann  
Thema der Arbeit: Übertragung tierischer Körperstrukturen in die Technik  
Name der Betreuungsperson: MMag. Matthias Köck

<b>Zeitraum:</b>	<b>Besprechung mit Lehrperson und Vorgangsschritte:</b>
<b>05.09. – 25.10.2023</b>	Überlegung des Themas; Betreuer finden
<b>14.11.2023</b>	Prof. Köck bittet um Erstellung eines „roten Fadens“
<b>20.11.2023</b>	Sdwi-Austausch mit Prof. Köck über möglichen Einstiegspunkt
<b>29.11.2023</b>	1. Besprechung mit Prof. Köck; Besprechung über konkretes Thema, Gliederung, Möglichkeiten; roter Faden wird angeschaut
<b>30.11.2023</b>	Abgabe des roten Fadens
<b>20.12.2023</b>	2. Besprechung mit Prof. Köck; Besprechung des Titels
<b>06.01.2024</b>	Kontaktaufnahme mit Prof. Gebeshuber an TU-Wien
<b>07.01.2024</b>	Rückmeldung von Frau Prof. Gebeshuber inklusive Tipp für Buch und Website
<b>08.01.2024</b>	Abgabe des Erwartungshorizontes und Prof. Köck gibt Feedback zu ihm
<b>12.01.2024</b>	letzte Besprechung des Titels der VWA über Sdwi
<b>13.01.2024</b>	finale Einreichung des Themas
<b>20.1.2024</b>	vollständige Genehmigung des Themas
<b>13.03.2024</b>	Zeitplanbesprechung mit Prof. Köck

<b>20. – 26.06.2024</b>	Kurze Besprechung mit Prof. Köck & Arbeiten an der VWA
<b>23.06.2024</b>	Anfrage für ein kurzes Treffen mit Prof. Gebeshuber
<b>24.06.2024</b>	Treffen mit Prof. Gebeshuber an TU Wien
<b>Sommerferien</b>	Literaturrecherche
<b>04.09.2024</b>	erste Kontaktaufnahme mit Prof. Köck nach den Sommerferien wegen Zeitplan
<b>29.09.2024</b>	Abgabe eines Teilkapitels
<b>29.09.-25.10.2024</b>	kurze Besprechung der ersten Teilabgabe
<b>25.10.2024</b>	Sduigespräch über Zeitplan
<b>08.11.2024</b>	Sduigespräch, um Gesprächstermin auszumachen
<b>13.11.2024</b>	Gespräch zum Schreibprozess
<b>17.11.2024</b>	Abgabe eines Kapitels
<b>26.11.2024</b>	Korrektur des Kapitels
<b>04.12.2024</b>	Termin für Interview mit Prof. Gebeshuber ausgemacht
<b>15.12.2024</b>	Abgabe der Interviewfragen
<b>16.-18.12.2024</b>	Verbesserung der Interviewfragen
<b>18.12.2024</b>	Interview mit Prof. Gebeshuber an der TU Wien und anschließender Besuch der Vorlesung zu Bionik
<b>12.01.2025</b>	Abgabe des Großteils der VWA
<b>16.01.2025</b>	Korrektur zweier Teilkapitel

<b>18.-20.01.2025</b>	Sduigespräch, um Gesprächstermin auszu- machen
<b>21.01.2025</b>	Frage via Email an Prof. Gebeshuber gestellt
<b>22.01.2025</b>	Treffen mit Prof. Köck und gemeinsames Formulieren/Verbessern eines Unterkapitels
<b>28.01.2025</b>	Abgabe eines Unterkapitels
<b>31.01.2025</b>	Korrektur des Unterkapitels
<b>03.02.2025</b>	Abgabe eines Kapitels
<b>05.02.2025</b>	Korrektur des Kapitels
<b>08.02.2025</b>	Abgabe eines Kapitels und Korrektur des Kapitels erhalten
<b>11.02.2025</b>	Transkribiertes Interview an Prof. Gebeshu- ber inklusive abschließender Fragen ge- schickt (Antworten für diese erhalten)
<b>12.02.2025</b>	Klärung noch offener Fragen zu formalen Kriterien mit Prof. Köck