

Marco Tamborini (Hg.)

---

# **Die Philosophie der Bio-Robotik**

**Meiner**

Tamborini (Hg.)

**Die Philosophie der Bio-Robotik**



Marco Tamborini (Hg.)



# Die Philosophie der Bio-Robotik

Meiner



Open Access: This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY SA 4.0).

DOI: <https://doi.org/10.28937/978-3-7873-4432-1>

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in  
der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten  
sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-7873-4431-4

ISBN eBook (PDF) 978-3-7873-4432-1

Gedruckt mit freundlicher Unterstützung der  
Johanna-Quandt-Young-Academy an der Goethe-Universität (JQYA).

© Felix Meiner Verlag, Hamburg 2024

Umschlaggestaltung: Andrea Pieper, Hamburg

Satz: SatzWeise, Bad Wünnenberg

Druck und Bindung: Books on Demand GmbH, Norderstedt

Gedruckt auf alterungsbeständigem Werkdruckpapier

Printed in Germany

# Inhalt

*Marco Tamborini*

Einleitung. Die Formen der Biorobotik . . . . . 7

Danksagung . . . . . 14

*Michael Vogrin, Martina Szopek, Matthias Becher, Martin Stefanec,  
Dajana Lazic, Valerin Stokanic, Daniel Nicolas Hofstadler, Laurenz Fedotoff,  
Thomas Schmickl*

Biohybride Technologien zur Unterstützung von Natur und Mensch . . . 15

*Lukas Geiszler*

Automatenbau zwischen Illusion und Imitation. Zur Debatte um den  
Modellcharakter von (Körper-)Automaten . . . . . 37

*Fiorella Battaglia*

Technoanthropologie. Was heißt die Verschmelzung von Mensch und  
Maschine für die menschliche Natur? . . . . . 56

*Ruth Stock-Homburg*

Androide Roboter. Menschliche Assoziationen und ethische Aspekte  
der Gestaltung . . . . . 73

*Marco Tamborini*

»Im Anfang war die Tat«. Form und Materie der Biorobotik . . . . . 95

*José Antonio Pérez-Escobar*

Epistemische Brücken zwischen dem Verständnis von Artefakten und  
der Biologie. Welche Teleologie brauchen wir? . . . . . 111

*Edoardo Datteri*

Interaktive humanoide Biorobotik. Vom unruhigen COG zum  
gährenden Roboter . . . . . 122

*Johanna Seifert, Orsolya Friedrich*

Bioroboter. Neue Perspektiven auf das Verhältnis von Leben und  
Technik . . . . . 145

*Philipp Schmidt*

Soziale Erfahrung? Embodiment und Einfühlung in der Mensch-  
Maschinen-Interaktion . . . . . 159

*Thomas Fuchs*

Sophia verstehen? Menschliche Interaktion mit künstlichen Systemen 182

*Catrin Misselhorn*

Artifizielle Empathie auf dem Weg zur Biorobotik . . . . . 207

Autor\*innen . . . . . 225

## Einleitung

### Die Formen der Biorobotik

Auf der Weltausstellung von 1939 in New York gab es einen besonderen Pavillon: den der Westinghouse Electric Corporation. Es war ein amerikanisches Industrieunternehmen, das 1886 von Unternehmer und Ingenieur George Westinghouse (1846–1914) gegründet wurde. In diesem Pavillon konnten die Tausenden von Besucher\*innen das neueste Produkt amerikanischer Ingenieurskunst bewundern: den anthropomorphen Roboter Elektro<sup>1</sup>. Dieser Roboter war das neueste Modell der Westinghouse-Fabrik und wurde als die ultimative humanoide Maschine präsentiert. Die Erwartungen der Messebesucher\*innen und Journalist\*innen waren daher enorm. In der Tat hat Westinghouse von den Erfolgen von Robotern wie Televox, Katrina van Televox, Telulux und Willie Vocalite profitiert. Wie der amerikanische Historiker Dustin Abnet festgestellt hat, war die Weltausstellung 1939/40 eine Ode an die persönliche Freiheit und implizierte eine enge Verbindung zwischen dieser Freiheit und technologischen Möglichkeiten<sup>2</sup>.

Der Roboter Elektro war etwa 23 Meter hoch, wog über 118 kg und hatte ein beeindruckendes Stahlskelett und eine Panzerung. Darüber hinaus – und das war der wichtigste Mechanismus des Elektro – bauten die Ingenieure Steuerungen ein, die es ihm ermöglichten, auf Sprache, Licht oder Musik zu reagieren. Der Betreiber konnte sogar über ein Telefon mit Elektro kommunizieren. Wie in dem von Westinghouse produzierten Film *The Middleton Family at the New York World's Fair* zu sehen ist, fanden die Auftritte von Elektro auf der Weltausstellung auf einer erhöhten Bühne statt und die Zuschauer\*innen füllten den gesamten Pavillon, um den Roboter zu bewundern.

Um theatralische Effekte zu erzielen und die vermeintliche Stärke und Innovation des humanoiden Roboters zu zeigen, erteilte der Betreiber dem Roboter das Wort, um sich vorzustellen: »Ich bin ein sehr intelligenter Kerl«, sagte der Roboter, »denn ich habe ein sehr feines Gehirn mit 48 elektrischen Relais.« Nach dieser Einführung, die es dem Androiden ermöglichte, sich dem

<sup>1</sup> R. R. Snody/Audio Productions/Westinghouse Electric/W. Steiner, *The Middleton Family at the New York World's Fair* [Video], USA 1939.

<sup>2</sup> Vgl. D. Abnet, *The American robot: A cultural history*, Chicago 2020.

Publikum vorzustellen, gab der Operator Elektro mehrere Befehle. Das Publikum erfuhr so, dass der Roboter sich bewegen, zählen, pusten und etwa 700 Wörter aussprechen konnte. Schließlich steckte er dem Roboter eine Zigarette in den Mund und forderte ihn zum Rauchen auf. Der Roboter nahm die Einladung an und begann einzusatmen und auszusatmen. In diesem Fall sollte die Theatralik des Roboters also eine einfühlsame Verbindung zu einem amerikanischen Mann der Mittelklasse herstellen. Wie eine der Hauptfiguren der Familie Middleton auf der Messe sagte: »Er ist fast menschlich!«.

Heute hat sich die Kluft zwischen der Technologie und der biologischen Welt sowohl verkleinert als auch vergrößert. Einerseits hat sie sich auf der ontologischen Ebene ausgeweitet, indem sie alle wesentlichen Unterschiede zwischen Lebewesen und Artefakten aufzeigt. Andererseits hat sie sich technisch-wissenschaftlich verengt, da biologisch inspirierte Roboter nun für biologische und kognitive Zwecke eingesetzt werden (z. B. um die komplexe Formfunktion von lebenden Organismen zu verstehen), um neue Technologien zu entwickeln (z. B. Exoskelette oder weiche Exoskelette), um verschiedene menschliche Arbeitsplätze zu unterstützen (Roboter können verschiedene Aufgaben in Büro- und Industrieumgebungen übernehmen), für psychologische Therapien (humanoide Roboter können mit Patient\*innen interagieren) usw. Angesichts der steigenden Zahl pflegebedürftiger Menschen arbeiten Robotik, künstliche Intelligenz und Datenwissenschaft gemeinsam an der Entwicklung bio-robotischer Lösungen, die die Altenpflege der Zukunft unterstützen und gleichzeitig die mit der Altenpflege verbundenen Kosten senken.

Diese Entwicklungen führen einflussreiche Wissenschaftler\*innen zu der Überzeugung, dass Roboter eine entscheidende Rolle bei der Erforschung des Verhaltens und der Kognition von Tieren und Menschen spielen können.<sup>3</sup> Roboter werden heute nicht nur als Werkzeuge zur Unterstützung menschlichen Handelns gesehen, sondern auch als Instrumente zur Wissensproduktion und als Mittel zur Veränderung und Verbesserung der menschlichen Gesellschaft.

<sup>3</sup> Vgl. N. Bostrom, *Superintelligenz, Szenarien einer kommenden Revolution*, Berlin 2014.; R. Kurzweil, *Menschheit 2.0: die Singularität naht*, Berlin 2014.; F. Fukuyama, *Our Posthuman Future: Consequences of the Biotechnology Revolution*, New York 2002.; K. Hayles, *How We Became Posthuman: Virtual Bodies in Cybernetics, Literature, and Informatics*, Chicago 1999.; H. W. Baillie/T. K. Casey (Hrsg.), *Is Human Nature Obsolete? Genetics, Bioengineering, and the Future of the Human Condition*, Cambridge 2004.; H. Moravec, *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind*, Oxford 2000. Dazu siehe auch K. Liggieri/M. Tamborini (Hrsg.), *Organismus und Technik. Anthologie zu einem produktiven und problematischen Wechselverhältnis*, Darmstadt 2021.; K. Liggieri/M. Tamborini (Hrsg.), *Homo technologicus: Menschenbilder in den Technikwissenschaften des 21. Jahrhunderts*, Wiesbaden 2023.

---

Dieses Buch bringt führende Expert\*innen zusammen, um die jüngsten Entwicklungen in der Biorobotik und ihre philosophischen und ethischen Voraussetzungen zu diskutieren. Die Betrachtung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den verschiedenen Formen der Biorobotik und ihr verantwortungsvoller Einsatz zwischen Natur, Technologie und Gesellschaft hat zu einigen in diesem Buch gestellten Forschungsfragen geführt:

Wie können Roboter die Strukturen von Organismen nachahmen und verfeinern? Wie ist die Beziehung zwischen biotechnologisch hergestellten Artefakten und natürlichen Organismen? Was sind die Unterschiede zwischen weicher und harter Robotik? Welche Rolle hat und welche Grenzen setzt die KI bei der Entwicklung von Robotern? Was sind die rechtlichen und ethischen Fragen und Perspektiven im Zusammenhang mit der Biorobotik? Wie können bioinspirierte Roboter und die menschliche Gesellschaft integriert werden? Inwieweit sollten Wissen und industrielle Produktion neu überdacht werden, indem man das Biologische mit dem Technischen verbindet? Welches Bild des Menschen entsteht durch die Hybridisierung von Natur und Technik? Kurz gesagt: Welchen Wert hat die Biorobotik für die Neugestaltung der Grenzen zwischen Natur, Technologie und Gesellschaft angesichts der heutigen globalen Herausforderungen?

In dieser kurzen Einführung möchte ich einige philosophische Aspekte hervorheben, die für die Produktion von bio-robotischem Wissen zentral sind. Die methodologische These, die ich in der Einleitung vertrete, ist ontologischer und phänomenologischer Natur. Das zentrale Element der Biorobotik ist das Konzept der Form, und die biologische Form wiederum ist ihr metaphysisches Element und verleiht ihr disziplinäre Stabilität.<sup>4</sup> Die Form, die der Roboter verkörpert, ist eine biotechnische Form und der technomorph agierenden Natur nach hybrid: Sie ist folglich von Natur aus hybrid und ist weder natürlich noch künstlich, sondern nimmt beide Eigenschaften an. Die Biorobotik wiederum verkörpert eine Reihe unterschiedlicher Praktiken, Ziele und Methoden, die jedoch alle auf der metaphysischen Grundlage natürlicher Formen basieren.<sup>5</sup> Wenn Sie die Website des IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) besuchen, finden Sie eine Seite, auf der verschiedene Arten von Robotern aufgelistet sind. Sie reichen von Humanoiden bis hin zu Robotern für medizinische und militärische Zwecke, Exoskeletonen usw. Die

<sup>4</sup> Siehe dazu M. Tamborini, *Entgrenzung. Die Biologisierung der Technik und die Technisierung der Biologie*, Hamburg 2022.

<sup>5</sup> Vgl. M. Tamborini, Technische Form und Konstruktion, *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 68/5 (2020), 712–733.

Seite zeigt verschiedene Formen von Robotern, die Wissenschaftler\*innen und Ingenieur\*innen einsetzen können, um verschiedene Ziele zu erreichen. Die Robotik und ihre bio-inspirierte Variante ist also eine praktische Form des Handelns. Mit Hilfe von Robotern erforschen und verändern Wissenschaftler\*innen die Beziehung zwischen Organismus, Umwelt und Gesellschaft. Mit anderen Worten: Durch technisches Handeln werden Räume für kognitives und praktisches Handeln geschaffen. Folglich wird das Problem und die Kraft der natürlichen Form als Kraft bei der Konstruktion von Robotern auf das Rätsel des Verständnisses und der technischen Beherrschung der biologischen Form reduziert.

In der Tat kann Biorobotik definiert werden als der experimentelle Einsatz von Robotern zur Erforschung und Prüfung von Theorien in den Lebens- und Sozialwissenschaften.<sup>6</sup> In diesem umfassenden Prozess steht das Problem der Nachahmung der Natur im Mittelpunkt. In der Biorobotik muss sich die Technik von den Formen der Natur inspirieren lassen, sie modifizieren und mit ihnen verschmelzen. Organismen sind der Ausgangspunkt für die Arbeit der Biorobotik, um biotechnische Formen zu schaffen, die eine realistische Definition von Natur testen, beherrschen, unterstützen und übertreffen, das heißt von einer Natur, die unabhängig von uns existiert. Mit der Erschaffung biorobotischer Formen versuchen Wissenschaftler\*innen, diese Lücke zwischen Menschen-gemacht und Natur-beschreibend zu schließen; dabei spielen die Eigenschaften der Materie eine wichtige Rolle<sup>7</sup>. Um dies zu erreichen, verwenden Ingenieur\*innen eine Vielzahl von Ansätzen, Praktiken und Methoden, von denen die meisten in diesem Buch vorgestellt und kritisch diskutiert werden. In diesem Zusammenhang hat der Philosoph Mark Coeckelbergh zu Recht geschrieben: »Roboter sind menschlich, aber nicht menschlich: Sie werden erschaffen und benutzt, und sie formen unsere Ziele. Sie sind Instrumente, aber sie sind unsere Instrumente. Und mit ihren ungewollten Auswirkungen prägen sie auch unsere Ziele. Instrument und Ziel sind auch voneinander abhängig.«<sup>8</sup>

<sup>6</sup> Vgl. B. Webb/T. Consilvio (Hrsg.), *Biorobotics*, Cambridge 2001. Siehe auch M. Tamborini/E. Datteri, Is biorobotics a science? Some theoretical reflections, in: *Bioinspiration & Biomimetics* 18/1 (2023), 015005.

<sup>7</sup> Siehe dazu M. Tamborini, The Elephant in the Room: The Biomimetic Principle in Biorobotics and embodied AI, in: *Studies in History and Philosophy of Science* 97 (2023), 13–19.; M. Tamborini, The Material Turn in The Study of Form: From Bio-Inspired Robots to Robotics-Inspired Morphology, in: *Perspectives on Science* 29/5 (2021), 643–665.

<sup>8</sup> M. Coeckelbergh, Three responses to anthropomorphism in social robotics: Towards a critical, relational, and hermeneutic approach, in: *International Journal of Social Robotics* 14/10 (2022), 2049–2061, hier 2057.

---

Um ein philosophisches Licht auf die verschiedenen Formen der Biorobotik zu werfen, ist eine kleine Taxonomie der Bioengineering-Praktiken als Ausgangspunkt notwendig. Durch diese Taxonomie kann eine tiefere ontologische Frage über die Bedeutung des Seins und die metaphysische Grundlage der Biorobotik als (techno-)wissenschaftliche Disziplin sowie das Konzept der natürlichen Form selbst geklärt werden.

Die kurze Taxonomie der bio-robotischen Praktiken, die auf den nächsten Seiten dieser Einführung vorgeschlagen wird, dreht sich um drei wichtige Aspekte oder Formen der bio-robotischen Praxis. Erstens verwenden Wissenschaftler\*innen die sogenannte synthetische Methode, um biologisch inspirierte Roboter herzustellen. Diese Methode kann als eine konstruktive Strategie beschrieben werden, die angewendet wird, um den Mechanismus zu entdecken, der das Verhalten eines lebenden Systems steuert. Das Ziel ist es, einen Roboter zu entwickeln und zu bauen, der den Mechanismus zur Modellierung einer komplexen Form/Funktion des Organismus implementiert und das Verhalten durch die Interaktion zwischen ihm und der Umwelt beeinflusst.<sup>9</sup> Wie die Wissenschaftler Rolf Pfeifer und Josh Bongard in ihrem einflussreichen Buch *How the Body Shapes the Way We Think. A New View of Intelligence* schrieben: »[D]ie synthetische Methodik besagt, dass wir durch den Bau von physischen Agenten – echten Robotern – eine Menge über die Natur der Intelligenz lernen können.«<sup>10</sup>

Zweitens: Wissenschaftler\*innen entwickeln Roboter, die mit anderen Organismen interagieren können. In der interaktiven Biorobotik ist der Roboter ein Modell eines anderen Systems als demjenigen, das untersucht wird. Bei dieser zweiten Form der Biorobotik muss der Roboter mit dem untersuchten organischen System interagieren und eine symbiotische Beziehung eingehen, um ein neues biotechnologisches System zu entwickeln.

Eine letzte Form der Biorobotik, die in dieser kurzen Taxonomie der Biorobotik-Praktiken hervorgehoben werden kann, zielt darauf ab, Technologien zu entwickeln, die am Körper getragen werden können: so genannte »tragbare Technologien«. In ihrer ursprünglichen Entwicklung (und in der kollektiven Vorstellung) werden diese Technologien als sperrige Strukturen verstanden, die den menschlichen Körper irgendwie stützen sollen. Im Laufe der Jahre haben sie sich radikal verändert und sind zu bio-inspirierten Struk-

<sup>9</sup> Siehe dazu E. Datteri, The logic of interactive biorobotics, in: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020), 637.; E. Datteri/G. Tamburrini, Biorobotic experiments for the discovery of biological mechanisms, in: *Philosophy of Science* 74/3 (2007), 409–430.; Tamburrini/Datteri, *Is biorobotics a science?*

<sup>10</sup> R. Pfeifer/J. Bongard, *How the Body Shapes the Way We Think. A New View of Intelligence*, Cambridge 2007, 55.

turen geworden, die sich an die Vielfalt und Flexibilität der verschiedenen menschlichen Körper anpassen können. Bei diesem Wandel gewinnt die Soft-Robotik zunehmend an Bedeutung. Der Schwerpunkt liegt auf der Reaktivität und Flexibilität des Materials, das für die Entwicklung und Konstruktion von Roboterstrukturen verwendet wird. Lorenzo Masia und sein Team haben zum Beispiel leichte kleidungsähnliche Exo-Anzüge entwickelt, die Energie direkt zwischen dem Roboter und dem Körper übertragen. Exo-Anzüge sind keine starren Strukturen, die den Körper von außen stützen, sondern weiche Strukturen, die sich dem Körper anpassen, der sie trägt. Das Funktionsprinzip besteht darin, dass ein am Rucksack oder an der Taille befestigter Motor eine Reihe von künstlichen Sehnen antreibt, die im Inneren des Exosuits entlang bestimmter Belastungspfade verlaufen.

Diese kurze Taxonomie hat die metaphysische Grundlage der Biorobotik hervorgehoben und die Probleme und Möglichkeiten dieser Praxis aufgezeigt. Die metaphysische Grundlage (und ihr kognitiver Anspruch) ist das Konzept der natürlichen Form. Dieses wird jedoch nicht als statisches und substanzielles Substrat (wie in *res extensa* oder *res cogitans*) verstanden, sondern im Gegenteil als eine ingenieurmäßige Art, an technische Lösungen heranzugehen. Die Natur produziert technische Formen, die verstanden, erklärt und nachgeahmt werden müssen, um neue technische Lösungen zu finden<sup>11</sup>. In diesem Prozess verwandelt sich die Natur in Technologie. Das heißt, es motiviert uns, Fähigkeiten zu beherrschen, die gelernt und wiederholt werden können und müssen. In diesem Prozess verschieben sich die epistemischen Grenzen zwischen Natur und Technik, zwischen Mensch und Maschine. Die technische Machbarkeit und Manipulierbarkeit der Biorobotik ermöglicht es, Prinzipien der technowissenschaftlichen Übersetzung von der Natur (wie wir sie wahrnehmen und kategorisieren) in ihr technisches Äquivalent zu finden.<sup>12</sup> In dieser Übersetzung kommen alle Unterschiede zwischen Robotik und Natur zum Vorschein.

Die gewaltigen Probleme, aber auch die Möglichkeiten dieses techno-epistemischen Prozesses liegen auf der Hand und werden im vorliegenden Band ausführlich diskutiert. Die Probleme, an denen sich die nächsten Kapitel orientieren, die von führenden Expert\*innen auf dem Gebiet der Biorobotik und ihrer Philosophie verfasst wurden, lauten wie folgt:

Das Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Universität Graz (Michael Vogrin, Martina Szopek, Matthias Becher, Martin Stefanec, Dajana Lazic, Valerin Stokanic, Daniel Nicolas Hofstadler, Laurenz Fedotoff, Tho-

<sup>11</sup> Siehe M. Tamborini, *Entgrenzung*.

<sup>12</sup> Siehe dazu M. Tamborini, Philosophie der Bionik: Das Komponieren von bio-robotischen Formen, in: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 71/1, (2023), 30–35.

---

mas Schmickl) untersucht, welche Methoden der Biorobotik sie in ihrer täglichen Praxis anwenden und was biohybride Organismen sind. In diesem Text zeigt sich auch der gegenseitige Einfluss, den Biorobotik als Instrument und Ziel aufeinander haben. Lukas Geisler analysiert philosophisch die Praktiken des Automatenbaus im 18. Jahrhundert und fragt, was die nachahmenden Praktiken der Natur und ihre möglichen Gültigkeiten für den Automatenbau im 18. Jahrhundert sind. Er ordnet den ihn in die wissenschaftsgeschichtliche Entwicklung der Biorobotik ein und untersucht, von welcher Bedeutung die Sprache für diese Entwicklung ist. Fiorella Battaglia stellt die Frage, ob Bioroboter auf moralisch vertretbare Weise handeln können und was die Verschmelzung von Mensch und Maschine für das menschliche Selbstverständnis bedeutet. Ruth Stock-Homburg untersucht, welche Arten von sozialen Bindungen Menschen mit Sozialrobotern eingehen können und sowie die ethischen Implikationen, die sich aus der zunehmenden Menschenähnlichkeit solcher Roboter ergeben. Marco Tamborini fragt, was am Anfang des biorobotischen Design- und Produktionsprozesses steht. Dies veranlasst den Autor zu der Frage danach, ob es eine Grenze zwischen Handlungsfähigkeit, Materialität und Intelligenz in der Biorobotik gibt. José Antonio Pérez-Escobar denkt darüber nach, wie wir versuchen, die epistemischen Verbindungen zwischen dem Verständnis von Artefakten und der Biologie mithilfe von teleologischen Konzepten zu erfassen, und entwickelt eine Struktur, die diese Übersetzungsarbeit zwischen unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen auf vereinheitlichte Weise ermöglichen soll. Edoardo Datteri untersucht die Methoden und Ansprüche der interaktiven humanoiden Biorobotik. Er zeigt auf, was mittels dieser über soziale Kognition gelernt werden kann und was die Struktur der interaktiven humanoiden Biorobotik auszeichnet. Johanna Seifert und Orsolya Friedrich beschäftigten sich mit der Frage, inwieweit Xenobots eine neue Beziehung zwischen Leben und Technologie darstellen. Mit einem phänomenologischen Ansatz überprüft Philipp Schmidt, was die phänomenologische Intersubjektivitätstheorie in Bezug auf die Bedeutung der Verkörperung für die soziale Erfahrung im Kontext der Mensch-Maschine-Interaktion erkennen kann, und hinterfragt so, ob Roboter überhaupt ein erfahrender Anderer sind, mit dem man in sozialen Kontakt treten könne. Thomas Fuchs diskutiert, ob es möglich ist, mit KI-Systemen oder Robotern zu kommunizieren. Um dieser Frage nachzugehen, untersucht er, ob wir ihnen einen quasi-persönlichen Status zuschreiben können und was die Aufhebung der Unterscheidung zwischen simulierten und realen Begegnungen über das menschliche Selbstverständnis aussagt. Schließlich erforscht Catrin Misselhorn die Möglichkeiten und Grenzen der künstlichen Empathie bei der Anwendung von weicher und harter Biorobotik.

---

## Danksagung

Die Idee zu diesem Buch entstammt einem Workshop, den ich konzipiert und organisiert habe: »Interdisziplinärer Workshop: Die Formen der Bio-Robotik – Die Verschmelzung von Biologie, Technik und Mensch«. Dieser fand in Zusammenarbeit mit der Jungen Akademie | Mainz und der Johanna-Quandt-Young-Academy an der Goethe-Universität statt. Ich möchte mich bei der Johanna-Quandt-Young-Academy at Goethe für die finanzielle Unterstützung dieses Bandes bedanken.

Dieses Buch ist im Rahmen des DFG-Projekts »Hybride Systeme, Bionik und die Zirkulation von morphologischem Wissen in der zweiten Hälfte des 20. und dem frühen 21. Jahrhundert« entstanden (DFG-Projektnummer 491776489). Schließlich möchte ich mich bei Louisa Maria Born für ihre hervorragende Arbeit und die riesige Unterstützung bedanken.

---

*Michael Vogrin, Martina Szopek, Matthias Becher, Martin Stefanec, Dajana Ladic, Valerin Stokanic, Daniel Nicolas Hofstadler, Laurenz Fedotoff, Thomas Schmickl*

## **Biohybride Technologien zur Unterstützung von Natur und Mensch**

Technologischer Fortschritt hat seit jeher unser Leben in vielen Bereichen verbessert, allerdings nicht ohne auch massive Verschlechterungen in anderen bewirkt zu haben. Neben der allseits diskutierten Belastung der Natur sind auch Themen wie die sich öffnende Kluft zwischen Arm und Reich sowie diverse soziale Polarisierungseffekte unerwartete Nebeneffekte des technologischen Fortschritts. Die Vereinten Nationen haben daher in ihrer »Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung«<sup>1</sup> 17 Entwicklungsziele, sogenannte Sustainable Development Goals (SDGs), ausgegeben, um die Natur und die Gesellschaften der Erde für alle nachhaltig zu verbessern. Eine der Hauptursachen hinter den Problemen, die von den SDGs anvisiert werden, ist die Zerstörung der Umwelt, vom Klimawandel bis zum Ökosystemverfall, oft auch in einem Teufelskreis kombiniert mit Armut, Migrationszwang und Krieg. Wenn es um Umweltschutz geht, wird immer wieder ein romantisierender Blick in die Vergangenheit geworfen, eine Betrachtung, bei der Kulturlandschaften mit natürlichen Bedingungen verwechselt werden. Dabei wird Technologie oft als etwas Schlechtes abgelehnt, was meist aus einer selektiven und subjektiven Sichtweise der Geschichte resultiert. Im Artificial Life Lab der Universität Graz<sup>2</sup> hingegen wird angestrebt, das Potential der Technologie zu erforschen und laufend neuartige Technologien zu entwickeln, wobei einer umgekehrten Perspektive gefolgt wird: »Wie kann Technologie verwendet werden, um die Natur zu unterstützen?« In den internationalen Projekten ASSISlbf,<sup>3</sup> Flora

<sup>1</sup> United Nations General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, in: United Nations (21. 10. 2015), von [https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_70\\_1\\_E.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf) (Zugriff 18. 11. 2022).

<sup>2</sup> ASSISlbf – Artificial Life Lab der Abteilung für Zoologie des Instituts für Biologie an der Universität Graz (Artificial Life Lab of the Institute of Biology, Section Zoology – University of Graz, in: Artificial Life Laboratory (2022), von: <https://alife.uni-graz.at/> (Zugriff 18. 11. 2022).)

<sup>3</sup> Animal and robot Societies Self-organise and integrate by Social Interaction (bees and fish), in: Artificial Life Laboratory (2022), von <https://alife.uni-graz.at/projects/assislbf/> (Zugriff 18. 11. 2022).

Robotica,<sup>4</sup> Hiveopolis<sup>5</sup> und RoboRoyale<sup>6</sup> werden dazu im Artificial Life Lab Graz verschiedene biohybride Technologien rund um Honigbienen und Pflanzen entwickelt, mit dem Ziel dabei mitzuwirken, unsere Ernährungssicherheit nachhaltig zu unterstützen (SDG-2) und somit auch einen Beitrag zur Bekämpfung der Armut zu leisten (SDG-1), die Imkerei als Erwerb und die Gewährleistung landwirtschaftlicher Bestäubungssicherheit für alle zugänglicher zu machen (SDG-10), die urbanen Bereiche resilienter und nachhaltiger zu machen (SDG-11) und terrestrische Ökosysteme zu schützen und zu stabilisieren (SDG-15).

Im Zentrum dieser Entwicklungen des Artificial Life Lab Graz stehen ganz bewusst Honigbienen und Pflanzen: Bienen sind die bedeutendsten Bestäuber von Blütenpflanzen und gleichzeitig auch (land-)wirtschaftlich von hoher Bedeutung. Pflanzen bilden die Grundlage aller Ökosysteme, wobei bestäubte Blütenpflanzen mit ihren Samen und Früchten nicht nur als Nahrung für unzählige Tierarten eine Existenzgrundlage bilden, sondern auch Nistplätze, Baumaterialien, Refugium und Lebensraum sind. Pflanzen ernähren Bienen und fördern ihre Verbreitung, gleichzeitig fördern Bienen wiederum die Verbreitung von Pflanzen. Diese symbiotische Rückkopplungsschleife (»Mutualismus«) bildet die Basis für eine starke und immer wieder nachwachsende Grundlage aller terrestrischen Ökosysteme. In den Arbeiten des Artificial Life Lab Graz wird angestrebt, ganze Kolonien der Westlichen Honigbiene (*Apis mellifera*) zu biohybriden Agenten zu machen, die als integriertes Kollektiv von lebenden Organismen und moderner Technik Ökosysteme langfristig und weiträumig stabilisieren. Die Einbettung von mechatronischer Technologie in einen Superorganismus wie z.B. einer Honigbienenkolonie wird dabei als »Organismische Augmentierung« bezeichnet, die dadurch bewirkten Umwelteffekte als »Ecosystem Hacking« und die Inklusion der biohybriden Technologie in breite Gesellschaftsschichten als »biohybride Sozialisierung«. Im Prinzip wären auch Kolonien von anderen eusozialen Insekten für diese Vorgehensweisen geeignet, aber die Westliche Honigbiene ist sicherlich die auffälligste Kandidatenspezies: Eine Kolonie entsendet zehntausende Sammelbienen, die in Summe täglich hunderttausende Sammelflüge unternehmen

<sup>4</sup> *Flora Robotica – Societies of Symbiotic Robot-Plant Bio-Hybrids as Social Architectural Artifacts*, in: Artificial Life Laboratory (2022), von <https://alife.uni-graz.at/projects/florarobotica/> (Zugriff 18. 11. 2022).

<sup>5</sup> HIVEOPOLIS – Futuristic Beehives for a Smart Metropolis, in: Artificial Life Laboratory (2022), von <https://alife.uni-graz.at/projects/hiveopolis/> (Zugriff 18. 11. 2022).

<sup>6</sup> RoboRoyale – ROBOtic Replicants for Optimizing the Yield by Augmenting Living Ecosystems, in: Artificial Life Laboratory (2022), von <https://alife.uni-graz.at/projects/roboroyal/> (Zugriff 18. 11. 2022).

und dabei Millionen von Blütenpflanzen bestäuben. Dies geschieht in einem Radius von bis zu 6 Kilometern im Umkreis der Kolonie, also über eine Fläche von über 110 Quadratkilometern. Es ist hier folglich möglich, mit dem Ökosystem über eine große Fläche zu interagieren, wozu nur ein einziger Bienenstock »augmentiert« werden muss. Dadurch wird die Technologie nicht über diese Fläche verteilt, sondern bleibt unter menschlicher Kontrolle zentralisiert im Bienenstock konzentriert, was wiederum einen Schutz vor versehentlicher Umweltgefährdung darstellt.

Ein Bienenvolk ist ein dynamisches und hochkomplexes System, gebildet aus zehntausenden Bienen, die ihren Insektenstaat mittels vieler verschachtelter und verhaltensbasierter Rückkopplungsschleifen regulieren. Diese Regulation reicht von der Populationsdynamik über die Arbeitsteilung bis hin zur Zielauswahl der Sammelflüge. Der komplexe Superorganismus ›Honigbienenvolk‹ ist eingebettet in ein ebenfalls dynamisches und komplexes Ökosystem, mit dem er fortwährend und in vielfältiger Weise interagiert. Um hier die gewünschten Effekte erzielen zu können und ungünstige Effekte abzuwenden, ist ein hohes Maß an Systemverständnis nötig. Dieses wird im Artificial Life Lab Graz, unter Mithilfe der ebenfalls an der Universität Graz geschaffenen Initiative COLIBRI<sup>7</sup> (Komplexitätsforschung an lebenden Systemen), mit empirischen Messungen, Beobachtungen und Experimenten, aber auch mit mathematischer Modellierung und Simulation geschaffen. Im Wesentlichen wird der klassische wissenschaftliche Weg verfolgt: Die Faszination an Naturphänomenen führt zu genauer und systematischer Beobachtung. Erhobene Eindrücke und Daten werden diskutiert und in (mathematische) Modelle integriert, mit denen mögliche Folgen von Veränderungen der Naturphänomene abgeschätzt werden können. Der wissenschaftliche Prozess erlaubt dann das Einwirken auf die natürliche Welt auf positive Art und Weise.

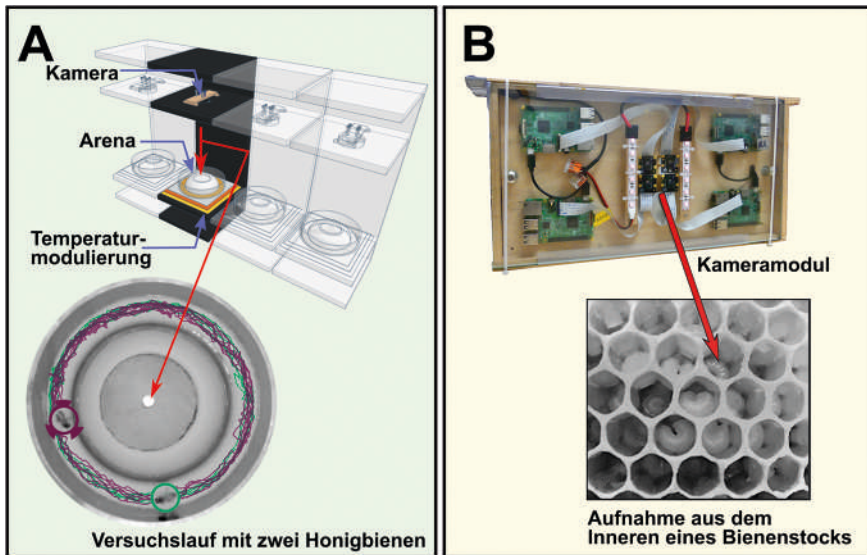
## Technologie zur Naturbeobachtung

Damit biohybride Technologien ihre stabilisierende Wirkung entfalten können, ist ein tiefgehendes Verständnis der involvierten Organismen und Herausforderungen erforderlich. Dementsprechend besteht der erste Schritt in der Entwicklung von biohybriden Technologien aus der Beobachtung und Erforschung von Grundlagen.

<sup>7</sup> Profilbildender Bereich COLIBRI: Complexity of Life in Basic Research and Innovation (COLIBRI: Complexity of Life in Basic Research and Innovation, in: Universität Graz (2022), von <https://colibri.uni-graz.at> (Zugriff 18. 11. 2022)).

Beobachtung ist grundsätzlich ein subjektiver Prozess, bei dem Beobachtende ihre Aufmerksamkeit auf bestimmte Aspekte lenken. Das führt dazu, dass manches in den Vordergrund tritt, anderes aber verborgen bleibt. Bei wissenschaftlicher Arbeit ist es notwendig, aus den subjektiven Eindrücken objektive Daten zu gewinnen. In der Regel muss dafür eine sehr große Anzahl an Beobachtungen gemacht werden, daher ist es sinnvoll, den Beobachtungsprozess zu automatisieren. Zu diesem Zweck wurde am Artificial Life Lab Graz eine nahezu vollautomatische Versuchskammer entwickelt, in der Bienen (oder andere kleinere Tiere) in einer beheizbaren Arena gefilmt werden können (Abb. 1A). Diese Versuchskammer verfügt über ein beheizbares Bodenelement und eine infrarotempfindliche Kamera mit Infrarotbeleuchtung, die es ermöglicht, qualitativ hochwertige Bilder aufzunehmen. In Verbindung mit dem Heizelement ermöglicht dies eine Vielzahl interessanter Experimente, bei denen die Reaktionen der Bienen auf die abgegebene Wärme untersucht werden. So ist es möglich, das Verhalten von und zwischen einzelnen Bienen systematisch und automatisiert zu erfassen und mit einer eigens dafür entwickelten Software auszuwerten. Durch diese Automatisierung kann zeitgleich auf viele Verhaltensaspekte geachtet werden, was die Aufmerksamkeit eines menschlichen Beobachters in einer »ad hoc Live-Beobachtung« weit übersteigt. Die so lückenlos messbaren Observablen sind unter anderem die Abstände zwischen den Bienen, deren Gehgeschwindigkeiten und die Dauer der Kontakte beim Aufeinandertreffen von Bienen. Ein weiterer Vorteil gegenüber der sonst oft üblichen subjektiven »Live-Beobachtung« durch einen menschlichen Experimentator ist, dass diese automatischen Beobachtungen objektiv und effizient sind, während sie gleichzeitig eine vollständige Dokumentation der Daten erlauben. Somit können wichtige soziale Verhaltensweisen von Honigbienen im Labor aus den Tierbeobachtungen extrahiert und untersucht und auch später weitere Analysen mit dem archivierten Datenbestand gemacht werden.

Die oben beschriebene automatisierte Tierbeobachtung ist die Grundlage zur Entwicklung einer Technologie zur Modulation des Verhaltens von Einzelbienen und somit zur Steuerung des kollektiven Kolonieverhaltens. Dazu ist es notwendig, die Bienen nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch in ihrem konventionellen Umfeld, dem Bienenstock, zu beobachten. Neuartige Technologien liefern auch in dieser anspruchsvollen Umgebung immer mehr Möglichkeiten zum minimalinvasiven Umweltmonitoring. Will man nun die Bienen im natürlichen Umfeld innerhalb des Bienenstocks beobachten, sind zahlreiche Einschränkungen zu beachten: In einem Bienenstock ist es dauerhaft dunkel, was die Beobachtung per Kamera erschwert. Helle Beleuchtung würde jedoch die Bienen irritieren und auf längere Zeit möglicher-



*Abb. 1:* Werkzeuge, die speziell für die automatisierte Beobachtung von Honigbienen entwickelt wurden. A: Ein automatisiertes Experimentalsystem, bestehend aus einer Versuchsarena, einer Einheit zur Temperaturkontrolle und einem Kameramodul mit Infrarotbeleuchtung, das die automatisierte Analyse von Verhaltensexperimenten ermöglicht. B: Kameramodul, das in einen Bienenstock eingebaut werden kann und z.B. die visuelle Überwachung der Entwicklung von Larven in einem Brutnest ermöglicht.

weise schädigen. Allerdings nehmen Bienen Infrarotlicht nicht wahr, weswegen die Verwendung einer Infrarotbeleuchtung mit einer entsprechend sensitiven Kamera hier sinnvoll ist. Die Steuerung der Kamera und der Beleuchtung übernimmt dabei ein Einplatinencomputer, welcher die Aufnahmen verarbeitet und speichert. Hier ist oftmals ein Kompromiss zwischen Genauigkeit (Bildqualität, Bildfrequenz, Videolänge) und Machbarkeit (Speicher-/Akku-Kapazität, Temperatur) nötig und dem jeweiligen Kontext entsprechend zu wählen. Beispielsweise ist es von großer Bedeutung, den Gesundheits- und Wachstumszustand der Brut zu untersuchen. Die Entfernung der Kamera zum Brutnest beziehungsweise zur Öffnung der Brutzelle beträgt nur wenige Zentimeter und der Bereich dazwischen ist voller frisch geschlüpfter, adulter Bienen, die ihren Brutpflege-Tätigkeiten nachgehen. Diese adulten Bienen verdecken oft die abzubildende Brut für die Kamera. Es wird daher eine Bilderserie aufgenommen und danach werden die verdeckenden Adultbienen »weggerechnet« und die Bilderserie zu einem Einzelbild kombiniert, in dem es im optimalen Fall keine Verdeckungen mehr gibt. In der anschlie-

ßenden Analyse, welche in der Regel auf einem gesonderten Gerät geschieht, werden diese Bilder überlappt, statische Pixel als Hintergrund erkannt und der Rest entfernt. Übrig bleibt der ungehinderte Blick auf den Zustand der Zelle: Ist sie offen, so ist ein Ei oder eine Larve sichtbar; ist sie verschlossen, so ist anzunehmen, dass sich darunter eine Puppe befindet. Wiederholte Beobachtungen über mehrere Tage erlauben Rückschlüsse auf Schädlingsbefall, Kannibalismus oder Brutentwicklung. Im Artificial Life Lab wird zu diesem Zweck ein ebensolches Modul entwickelt, um einen nichtinvasiven Blick ins Innere einer Kolonie werfen zu können (Abb. 1B). In der Entwicklung wird einerseits zusätzlich auf biokompatible Materialien und andererseits auf die Gehäusemaße geachtet, um auch den Einsatz in konventionellen Bienenstöcken zu erlauben. Solche fortgeschrittenen Beobachtungssysteme sind hochrelevant für moderne Forschung, und die mit ihnen erhobenen Daten bilden die Grundlage für die Hypothesen- und Modellbildung.

### **Modellierung des Bienenverhaltens**

Besonders die Prozesse, die für das Überleben der Kolonie essenziell sind, müssen identifiziert und studiert werden, um Bienenvölker und ihre Ökosysteme zu unterstützen. Nur durch ein tiefgreifendes Verständnis der Mechanismen, die die selbstregulierenden Prozesse einer Bienenkolonie steuern, kann ein Bienenvolk vorhersagbar mittels eingebetteter Technologien unterstützt werden.

Innerhalb des Bienenvolkes nimmt das Brutnest eine wichtige Rolle ein, und der Zustand der Brut steht in direktem Zusammenhang mit dem allgemeinen Gesundheitsstatus des gesamten Volkes. Jene Prozesse im Brutnest, die für gesunde und zahlreiche Brut in der Periode vom Frühjahr bis hin zum Spätsommer sorgen, garantieren das Vorhandensein einer ausreichenden Menge gesunder und leistungsfähiger Sammlerinnen, somit eine starke Bestäubungsleistung des Bienenvolkes und das Überleben des Bienenvolkes im Winter. Die Wärme im Brutnest wird hierbei aktiv von den Arbeiterinnen erzeugt und geregelt und beträgt in etwa 36 Grad Celsius.<sup>8</sup> Den frisch aus ihrer Verpuppung geschlüpften Jungbienen fehlt in den ersten Tagen ihres Adultlebens genau diese Fähigkeit der Temperaturregelung. Aufgrund ihres Entwicklungszustands ist die Flugmuskulatur noch nicht vollständig genug ausgebildet, um die Wabe durch Bewegung zu beheizen.<sup>9</sup> Es ist für die opti-

<sup>8</sup> T. D. Seeley, *Honeybee Ecology*, Princeton 1985.

<sup>9</sup> J. Vollmann/A. Stabentheiner/H. Kovac, Die Entwicklung der Endothermie bei Honig-

male physiologische Entwicklung der Jungbienen erforderlich, dass sie den Bereich des warmen Brutnests nicht verlassen. Mehr noch, sie übernehmen in diesem Zeitraum auch die Aufgabe, die nun leeren Brut-Zellen zu reinigen. Die Jungbienen tragen damit ursächlich zu einer effektiven Brutaufzucht bei, da die Königin nur in geputzte und vorbereitete Zellen Eier legt.<sup>10</sup> Daher ist die Aufgabe der Jungbienen essenziell für das Wachstum der gesamten Kolonie. Indem sich die Jungbienen am Wärmefeld des Brutnests orientieren, sind sie fähig, sich in dieser komplexen Umwelt effektiv und effizient zu bewegen. Diese Fähigkeit steht oft im Fokus von Beobachtungen und Modellierungen des Artificial Life Labs in Graz. In Laborexperimenten wurde gezeigt, dass Jungbienen in einem Temperaturgradienten jene Temperatur aufsuchen, welche auch in einem herkömmlichen Stock im Zentrum des Brutnests herrscht.<sup>11</sup>

In unseren Laborversuchen bewegen sich die noch flugunfähigen Jungbienen in einer »Arena«,<sup>12</sup> die im Wesentlichen eine heterogen beheizte horizontale Wachfläche ist und so vereinfacht die Bedingungen des Brutnests abbildet. Dieses Setting lässt sich leicht mathematisch modellieren, indem jede Bienenposition als zweidimensionales Koordinatenpaar, d.h. als Punkt auf einer Ebene abgebildet wird. Die Bewegung der Biene kann dann für ein Zeitintervall als Bewegungsvektor von diesem Punkt ausgehend berechnet werden. Dieses mathematische Modell beschreibt in der Folge, wie sich diese Bewegungsvektoren in Abhängigkeit zur lokalen Temperatur und zur räumlichen Nähe anderer Bienen verändern, um so das temperaturabhängige und soziale Bewegungsverhalten der Bienen zu modellieren. Die Aneinanderreihung dieser Punkte ergibt den »Bewegungspfad« jeder Biene, oft auch als »Trajektorie« bezeichnet.

Die Bewegung der individuellen Insekten kann dabei in einem Gruppenverband zu emergenten Mustern führen. Diese Muster zeigen komplexe Eigenschaften, während sie sich aus einfachen Interaktionsmechanismen ergeben. Dies wird oft auch als »Schwarm-Intelligenz« bezeichnet. Diese Phänomene

bienen (*Apis mellifera carnica* Pollm.), in: *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie* 14 (2004), 467–470.

<sup>10</sup> G. A. Rösch, Untersuchungen über die Arbeitsteilung im Bienenstaat. 1. Teil: Die Tätigkeiten im normalen Bienenstaat und ihre Beziehungen zum Alter der Arbeitsbienen, in: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie* 2 (1925), 571–631.

<sup>11</sup> H. Heran, Untersuchungen über den Temperatursinn der Honigbiene (*Apis mellifica*) unter besonderer Berücksichtigung der Wahrnehmung strahlender Wärme, in: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie* 34/2 (1952), 179–206.

<sup>12</sup> R. Scheiner/C. I. Abramson/R. Brodschneider/K. Crailsheim/W. M. Farina/S. Fuchs/B. Grünwald/S. Hahshold/M. Karrer/G. Koeniger/N. Koeniger/R. Menzel/S. Mujagic/R. Radspieler/T. Schmickl/C. Schneider/A. J. Siegel/M. Szopek/R. Thenius, Standard methods for behavioural studies of *Apis mellifera*, in: *Journal of Apicultural Research* 52/4 (2013), 1–58.

der komplexen Mikro-Makro-Kausalitäten (»Einfaches ergibt Komplexes.«) können mittels verschiedener mathematischer Methoden beschrieben und analysiert werden:

Die Trajektorie einer zufälligen Bewegung (»Random Walk«) kann dabei folgendermaßen beschrieben werden:

$$X_n = X_0 + \sum_{j=1}^n Z_j$$

Hierbei ist  $X_n$  der Satz aus x- und y-Koordinaten nach n Zeitschritten,  $X_0$  der Ursprung und  $Z_j$  eine (gleichverteilte) Zufallsvariable, die in jedem Zeitschritt und insgesamt n-mal additiv auf den Ursprung wirkt.

Solch eine Formulierung erlaubt allerdings nur sprunghafte Schritte zur Seite oder zurück, was im Kontext einer gehenden Biene nicht der Realität entspricht. Eine alternative und sinnvollere Formulierung beschreibt die Bewegung mittels einer über einen Winkel  $\theta$  definierten Richtung und einer Geschwindigkeit. Dabei können beide Werte wieder zufälligen Verteilungen folgen, welche aber hier im Allgemeinen mit einem Mittelwert bzw. Modus und einer Abweichung charakterisiert sind und somit einen bevorzugten Drehwinkel und eine Grundgeschwindigkeit beschreiben. Zusätzlich kann noch eine explizite Zeitabhängigkeit einbezogen werden, um den zeitlichen Verlauf zu verdeutlichen.

Dabei lautet die Trajektorie nun wie folgt:

$$\frac{dX}{dt} = \hat{n}(t) \cdot v(t)$$

Hierbei repräsentiert  $dX/dt$  die Änderung der Koordinaten nach der Zeit,  $\hat{n}(t)$  die zeitabhängige Richtung und  $v(t)$  die zeitabhängige Geschwindigkeit. Die Verknüpfung zwischen der Richtung  $n$  und dem Winkel  $\theta$  erlaubt die nahtlose Überführung zwischen den Formulierungen mittels:

$$\hat{n}(t) = \begin{pmatrix} \cos \theta(t) \\ \sin \theta(t) \end{pmatrix}$$

Je nachdem welcher Verteilung die jeweiligen Variablen nun folgen, entstehen schon bei isolierten (und in ihrer Komplexität angepassten) Simulationen die gleichen Muster, die wir auch in der Natur beobachten: Einzelne navigierende Bienen finden in einem ausreichend steilen Temperaturgradienten, wenn der Unterschied zwischen der kältesten und der wärmsten Stelle also relativ groß ist, verlässlich die optimale Temperatur. Sobald der Gradient aber flach wird, also den natürlichen Bedingungen im Brutnest gleicht, finden sie das Optimum nicht. Die Fähigkeiten des Individuums allein reichen hierfür offenbar nicht aus. In einer Gruppe wiederum führt die zusätzliche soziale Komponente im Verhalten auch in flachen Gradienten zum Erfolg. Genau