

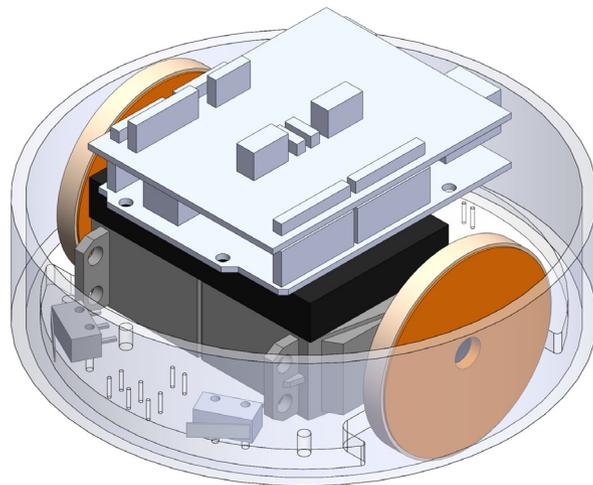
Swarm Robots – Wie aus einfachen Regeln emergente Systeme entstehen

Bachelorarbeit
Mey Lean Kronemann

Mey Lean Kronemann

Swarm Robots

Wie aus einfachen Regeln
emergente Systeme entstehen



Bachelorarbeit
Theorieteil

Impressum

Theoretischer Teil der Bachelorarbeit von
Mey Lean Kronemann
Matrikelnummer 5445
Fachhochschule Potsdam, Fachbereich Design

Betreuer: Prof. Reto Wettach, Prof. Jörg Hundertpfund,
Lehrende der Bereiche Interface Design und Produktdesign
Kooperationspartner: Prof. Dr. Verena V. Hafner,
Leiterin des Lehrstuhls für Kognitive Robotik am Institut
für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin

© Mey Lean Kronemann, Berlin 2009
Druck, Satz und Bindung: Eigenverlag
Fachhochschule Potsdam

Inhalt

Vorwort	Relevanz der Schwarmthematik in der Gesellschaft	7
Einführung: Beispiele für Emergenz		
	Definitionen: Schlagwörter	8
	Emergenz im Alltag: Beispiele	11
	Geschichte der Schwarmforschung: Meilensteine	12
	Entwicklung der Schwarmforschung: Emergenz als interdisziplinäres Konzept	15
	Emergenz – Bezugsfelder. Eine Themenkarte	18
	Schwarmrobotik: Angewandte Schwarmforschung	21
Grundlagen: Bedingungen für emergente Systeme		
	Die Menge macht's: Nonlineare und dezentrale Systeme	25
	Think local, act global: Lokale Informationen	27
	Auf die Nachbarn hören: Rekursive Systeme	29
	Regeln, an die sich jeder hält: Emergenz und Regeln	31
Beispiele für emergierende Eigenschaften		
	Formale Strukturen: Schwarmformen	33
	Formale Strukturen: Zwischen Kunst und Mathematik	35
Weiterführende Gedanken: Roboter und unser Verhältnis zu ihnen		
	Autonome Roboter als didaktisches Werkzeug: Roboter als Lernmaterial	43
	Roboter als Interfaces: Soziale Interaktion mit Robotern	47
	Schwarmroboter als Interface: Interaktion mit Schwarmrobotern	53
	Sensoren und Embodiment: Ist Intelligenz an Körperlichkeit gebunden?	57
	Braitenberg-Vehikel und das Bezugsrahmenproblem	59
Nachwort	Was kann uns Emergenz für die Zukunft lehren?	65
Anhang		
	Literatur und Quellen	66
	Abbildungsverzeichnis	68



Vorwort

Schwärme – ein Thema, das mehr und mehr ins Zentrum der Aufmerksamkeit rückt.

Durch die zunehmende Vernetzung unserer Gesellschaft, in der jeder Produzent und Konsument gleichzeitig ist, wo alte Hierarchien obsolet werden, gewinnen Themen wie Selbstorganisation und Dezentralität zunehmend an Bedeutung. Konzepte wie Emergenz, vormals wenigen Fachleuten bekannt, werden zu einem Erklärungsmodell für unsere komplette (Lebens-)Welt, wie in dem Buch *Emergence* von Steven Johnson. Der theoretische Physiker Philip W. Anderson geht sogar so weit zu sagen, dass die gesamte Welt, die wir wahrnehmen, durch Emergenz entsteht:

„In jedem Stadium entsteht die Welt, die wir wahrnehmen, durch »Emergenz«. Das heißt durch den Prozeß, bei dem beträchtliche Aggregationen von Materie spontan Eigenschaften entwickeln können, die für die einfacheren Einheiten, aus denen sie bestehen, keine Bedeutung haben. – Eine Zelle ist noch kein Tiger. Ebensowenig ist ein einzelnes Goldatom gelb und glänzend.“¹

Der Schwarm, früher etwas Bedrohliches, weil schwer zu Fassendes (siehe Horrorfilme), wird zum Vorbild: *Bittorrents, Flash Mobs, Grassroots Movements*. Selbst in einem zeitgenössischen Thriller wie dem Bestseller von Frank Schätzing ist der Schwarm zwar unheimlich, aber umso respekt einflößender: und dem (unvernetzt denkenden) Menschen voraus und sowieso überlegen. Unser Verständnis von Schwärmen ist noch immer geprägt von alten Denkstrukturen: Wir sprechen von der *Bienenkönigin*, als ob diese die oberste Befehlshaberin ihres Staates sei. Dabei ist sie vielmehr ein Organ, in ihrem Fall das Geschlechtsorgan eines Superorganismus. Dinge, die geschehen, ohne dass ein Einzelner dafür verantwortlich ist oder die Kontrolle hat, sind uns unheimlich. Banken Krisen und Klimawandel scheinen uns ähnlich jenseits jeglicher Einflussnahme wie Unwetter und Sturmfluten. Dabei kann uns das Wissen über komplexe und emergente Systeme helfen, die zugrundeliegenden Mechanismen zu verstehen und langfristig zu beeinflussen.

¹. Philip W. Anderson: Zitat aus *Die wichtigsten Erfindungen der letzten 2000 Jahre*. Berlin: Ullstein, 2000. S.178.

Definitionen

Schwarm:

Ein Verband von schwimmenden oder fliegenden Lebewesen mit großer Individuenzahl. Ein Schwarm besteht im Gegensatz zu Rudel und Herde aus gleichberechtigten Individuen, es gibt also *kein Leittier*.

Ein Schwarm nützt seinen Mitgliedern: Durch seine Größe wirkt er einschüchternd und verwirrend auf Angreifer. Ein Fressfeind kann sich nur schwer auf ein einzelnes Opfer konzentrieren. Außerdem besteht eine tatsächliche Gefahr für Flugfeinde:

Ein Falke würde sich beispielsweise durch einen Sturzflug in einen dichten Schwarm lebensgefährlich verletzen.¹ Ein Schwarm kann Gefahren, aber auch Futterquellen möglicherweise schneller entdecken. Manchmal bringt die Fortbewegung im Verband auch eine Kräfteersparnis: Nachfolgende Schwarmmitglieder profitieren von Windschatten oder Wirbeln im Wasser.

Ein Schwarm bewegt sich räumlich und zeitlich koordiniert. Deswegen werden auch Flugzeug- oder Roboterverbände Schwarm genannt. Neuerdings wird der Begriff auch in der Filesharing-Szene verwandt. Mit einem Schwarm ist dort die Menge aller am gleichen Torrent interessier-

ten Clients gemeint (also alle Nutzer, die dieselbe Datei herunterladen).

Schwarmverhalten:

Das Verhalten eines Schwarms folgt Regeln. Durch sie entstehen die geometrischen Formen eines Schwarms. Beispiele für solche Regeln sind z.B. ein konstanter Individualabstand (meist etwa eine Körperlänge), Streben zum Mittelpunkt des Schwarms und die Ausrichtung an den Nachbarn. Die Mitglieder des Schwarms passen sich ständig an die Bewegungen ihrer Nachbarn an und sind dadurch selbst in ständiger Bewegung.

Superorganismus:

Eine lebendige Gemeinschaft von meist sehr vielen eigenständigen Organismen, die in mehreren Generationen zusammenleben. Die Individuen sind theoretisch auch einzeln überlebensfähig, langfristig können sie aber nicht ohne die Gemeinschaft überleben. Die Mitglieder haben sich spezialisiert, wobei das Zusammenwirken dieser spezialisierten Handlungsweisen die Möglichkeiten des Individuums bei weitem übertrifft.² Gruppen oder Einzeltiere übernehmen im

¹ vgl. Johannes Otto Först: *Schwarmverhalten*. In: *Kollegstufe Biologie: Verhaltensbiologie: Angeborene Verhaltensteile*.
Quelle: <http://digitale-schule-bayern.de/dsdaten/218/23.pdf>

Superorganismus für eine gewisse Zeit oder auch lebenslang eine Aufgabe, die mit einer Organfunktion vergleichbar ist, z.B. Fortpflanzung. Der Biologe William Morton Wheeler prägte den Begriff anhand des Soziallebens von Ameisen.³ Typische Beispiele für Superorganismen sind Termitenstaaten und Bienenvölker, doch der Autor Steven Johnson bezeichnet auch moderne Städte als Superorganismen.⁴

Selbstorganisation:

Selbstorganisierende Systeme strukturieren und stabilisieren sich ohne übergeordnete Ordnungsinstanz oder äußeres Zutun. Die Systemkomponenten sind prinzipiell gleichberechtigt. Jedes Element kann eine lenkende Funktion einnehmen. Durch ihre Vernetzung erschaffen die Systemteilnehmer aus Chaos Ordnung.

Schwarmintelligenz, auch:

kollektive Intelligenz:

Wenn mehrere Individuen spontane gemeinsame Entscheidungen ohne übergeordnete Organisation treffen, kann es vorkommen, dass das Ergebnis für das Kollektiv eine bessere Lösung darstellt als die Entscheidung eines Einzelnen.

Dabei haben die Mitglieder keine gemeinsame Vision der gesamten Entwicklung: Jedes Individuum entscheidet und handelt für sich. Aus der Summe der Einzelhandlungen können Verhaltensweisen des *Superorganismus* emergieren, die wie geplante, intelligente Lösungen wirken.

Emergenz, lat. *emergere*: auftauchen, hervorkommen, sich zeigen:

Emergenz liegt vor, wenn das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile („*Übersummativität*“); wenn also ein System Merkmale oder Verhaltensweisen aufweist, die bei bloßer Betrachtung seiner Einzelbestandteile nicht feststellbar sind. Emergenz entsteht durch die Interaktion der Bestandteile eines Systems, wobei für jedes System eine bestimmte Mindestanzahl an Bausteinen vorhanden sein muss. Die Interaktion der zusammenwirkenden Teile basiert auf lokalen Informationen und einfachen Regeln. Emergente Systeme sind wegen ihrer Selbstreferentialität schwer vorhersagbar, einige Wissenschaftler gehen sogar von einer *prinzipiellen Unvorhersagbarkeit* und *Nichterklärbarkeit* aus (z.B. die Nobelpreisträger Philip W. Anderson und Robert B. Laughlin oder der Biologe und Philosoph Stuart Kauffman)⁵.

2. vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Superorganismus> (Version vom 29.05.2009)

3. Ebenda.

4. In seinem Buch *Emergence. The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*. New York (NY): Scribner, 2001.

5. vgl. Abschnitt: *Starke und schwache Emergenz*. In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Emergenz> (Version vom 15.09.2009)



Emergenz im Alltag

Bei einem Spaziergang in der Natur lassen sich viele emergente Erscheinungen beobachten – Ameisenhaufen, Vögel in V-Formation, oder einfach das Wetter. Aber wir müssen, um Emergenz zu beobachten, gar nicht vor die Tür. Auch in unserem Alltagsleben zeigt sich ständig, wie aus der Summe von Einzelhandlungen übergreifendes Verhalten entsteht. Sowohl Grundlagen unserer Gesellschaft, wie das Finanzsystem und die Börse, als auch Bedrohungen, wie der transnationale Terrorismus, sind emergente Phänomene.

Ist der Schwarm eins oder sind es mehrere?

Von außen betrachtet scheint ein Schwarm ein einziges, denkendes Subjekt zu sein. Doch von innen verändert sich diese Perspektive: Der einzelne Fisch oder Vogel weiß nicht, dass er Teil eines Schwarms ist. Er versucht nur, nicht mit seinen Nachbarn zusammenzustoßen. Erst aus dem Verhalten aller Tiere entsteht der Schwarm.

Die Unkenntnis des Individuums über seine Schwarmzugehörigkeit betrifft ebenso den Menschen. Ob am Wühltisch, den überfüllten Strän-

den der Costa Blanca oder in einer gewöhnlichen Fußgängerzone: Dichte Ansammlungen von Menschen zeigen Schwarmstrukturen – ohne dass sich die Individuen dessen bewusst sein müssen. Als Einkäufer im dichten Menschenstrom nehmen wir nur unsere Nachbarn wahr, und natürlich erleben wir sie und uns als mehrere. Doch wenn man die Menschenmassen von oben beobachtet, vielleicht noch im Zeitraffer, bemerkt man Bewegungsmuster, die aus der Bodenperspektive nicht erkennbar sind.¹ Ein globales Verhalten des gesamten Schwarms lässt sich folglich nur von außen, mit einem gewissen Abstand zum System wahrnehmen.

1. In der Arte-Dokumentation *Schwärme – Die Intelligenz der Massen* (Jakob Kneser, D 2009) sieht man eindrucksvolle Filmaufnahmen solcher Strukturen.

Meilensteine der Schwarmforschung

4. Jhd. v. Chr.

Aristoteles formuliert in seiner Schrift *Metaphysik* erste Beobachtungen zu emergenten Eigenschaften von Systemen: „Das was aus Bestandteilen so zusammengesetzt ist, dass es ein einheitliches Ganzes bildet, ist nicht nach Art eines Haufens, sondern wie eine Silbe, das ist offenbar mehr als bloß die Summe seiner Bestandteile. Eine Silbe ist nicht die Summe ihrer Laute: ba ist nicht dasselbe wie b plus a, und Fleisch ist nicht dasselbe wie Feuer plus Erde.“

1910

Der Ameisenforscher **William Morton Wheeler** prägt den Begriff des Superorganismus

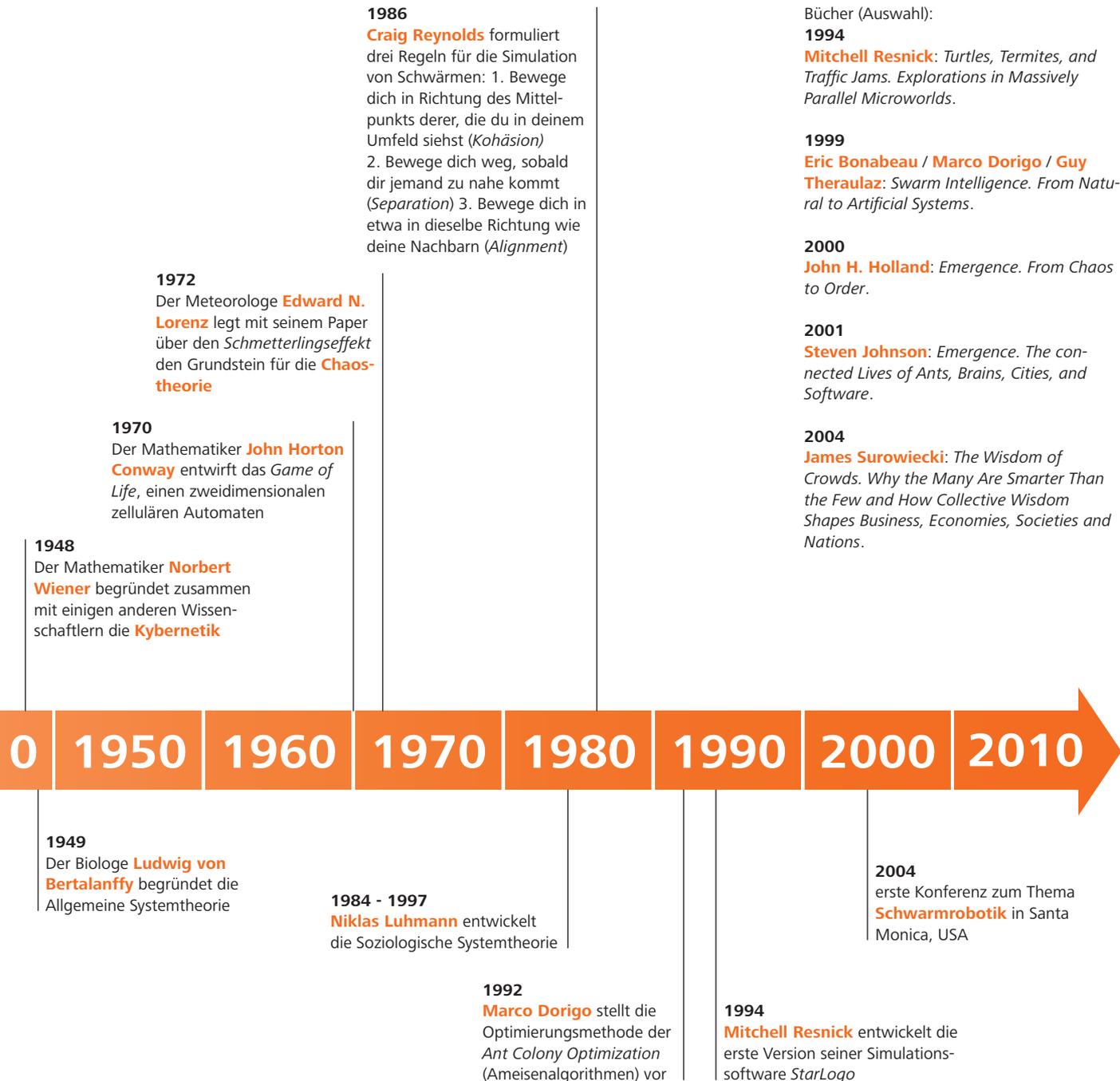
1900

1910

1920

1930

1940



Entwicklung der Schwarmforschung

Was haben Ameisen, Autos und Agenten gemeinsam? Der Begriff „Schwarm“ hat sich im Zuge der Forschung von seinem biologischen Bedeutungsursprung fortentwickelt und geweitet. *„Wir benutzen die Bezeichnung »Schwarm« generell für alle Ansammlungen von lose miteinander interagierenden Agenten. Das klassische Beispiel dafür ist ein Schwarm Bienen, aber die Metapher eines Schwarms kann auf alle möglichen Systeme mit ähnlicher Architektur angewendet werden. Ein Ameisenstaat kann als Schwarm verstanden werden, bei dem die einzelnen Ameisen die Agenten sind, ein Vogelschwarm ist ein Schwarm, bei dem die einzelnen Vögel die Agenten sind, Verkehr ist ein Schwarm von Autos, eine Menschenmenge ist ein Schwarm von Menschen, ein Immunsystem ist ein Schwarm, bestehend aus Blutzellen und Molekülen und selbst eine Ökonomie kann als Schwarm betrachtet werden, bestehend aus ökonomischen Agenten.“*¹

Emergenz als disziplinübergreifendes Konzept

Der Schwarm wird also inzwischen strukturell analysiert; statt seine Bestandteile zu betrachten, versucht man, die zugrundeliegenden Beziehungen zu verstehen. Diese grundsätzliche Änderung der Sichtweise führte seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts zur Entstehung neuer Wissenschaftszweige und einer Renaissance der interdisziplinären Forschung. Es entstanden die Kybernetik, die Systemtheorien, und viele Zweige mit starken Überschneidungen wie die Chaosforschung, die Komplexitätsforschung, die Kognitionswissenschaft und in neuerer Zeit die Schwarmforschung.

Die Geschichte der Schwarmforschung hängt eng mit der Entwicklung des Computers zusammen. Erst seit in den 70er Jahren grafische Benutzeroberflächen erfunden wurden, konnte man Schwärme überhaupt simulieren. Da man für eine Simulation Regeln und Algorithmen festlegen muss, war es plötzlich naheliegend, sich mit Schwarmregeln und den Voraussetzungen für Emergenz zu beschäftigen.

1. James Kennedy, Russell C. Eberhart: *Swarm Intelligence*. San Francisco: Academic Press, 2001. S.102.

Vergrößert man den Maßstab weiter, so schwillt das Konzept Emergenz zum universalen Weltklärungsmodell an: Bewusstsein, Intelligenz und Kultur sind Folgen neurologischer Prozesse. Leben ist aus chemischen Reaktionen emergiert. Auch die Evolution ist ein emergentes Phänomen und basiert auf einfachen Regeln. Letztlich entsteht unser gesamtes Universum durch Emergenz, da die einzelnen Moleküle (Atome, Quarks, Strings...) nicht über die Eigenschaften der makroskopischen Welt verfügen.



Abb.: Autoschwarm

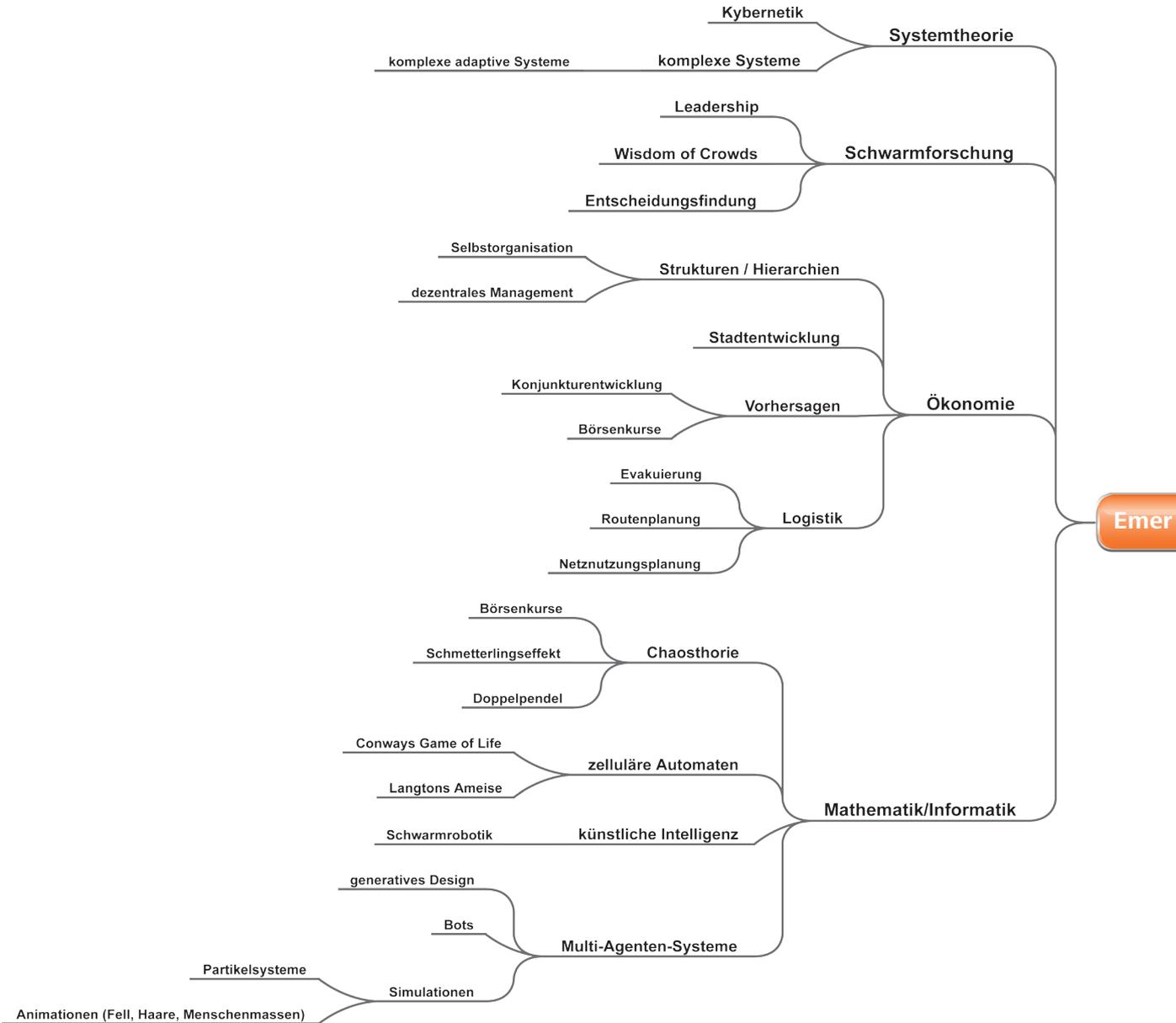


Abb.: Schnäppchenjagd

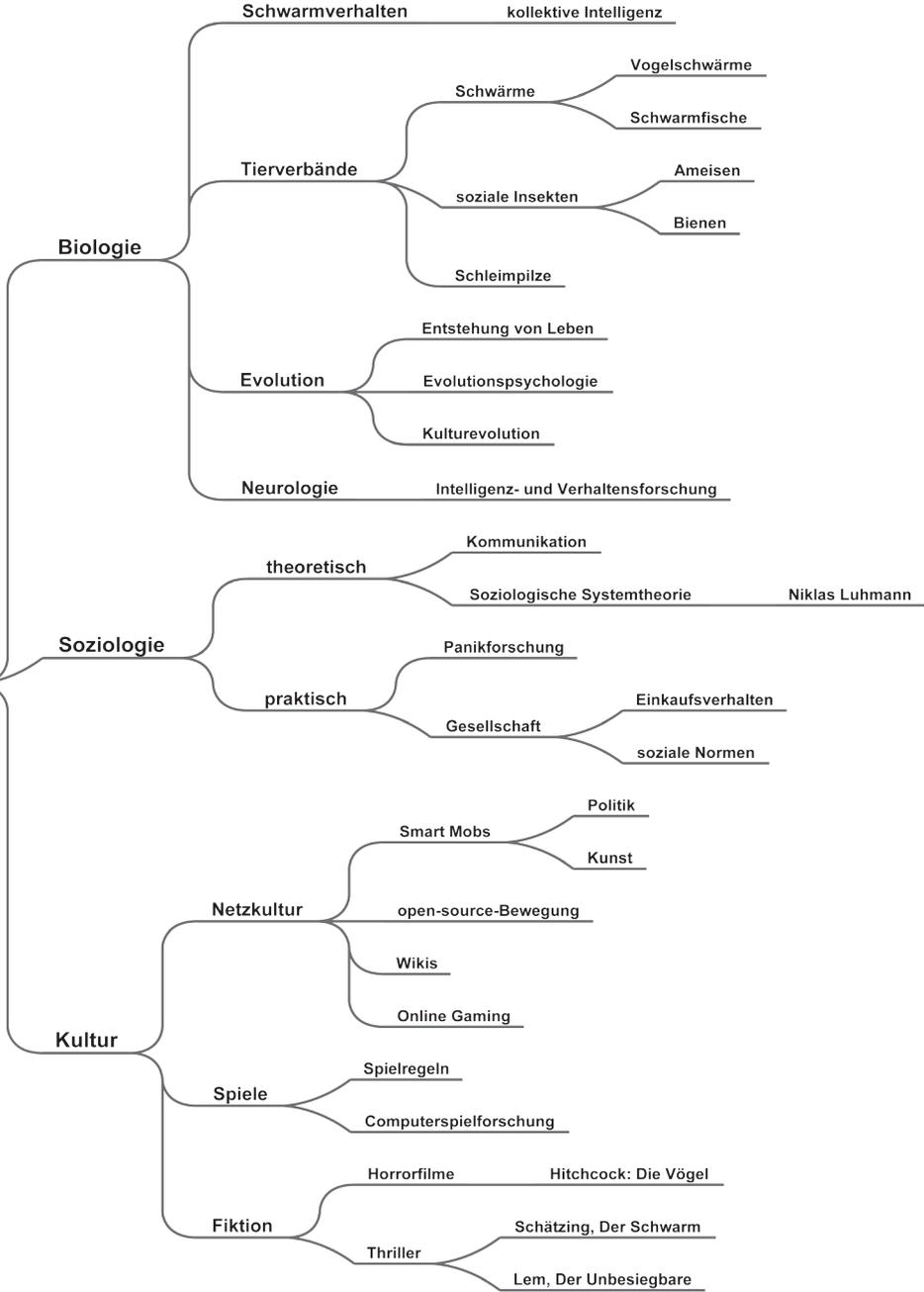


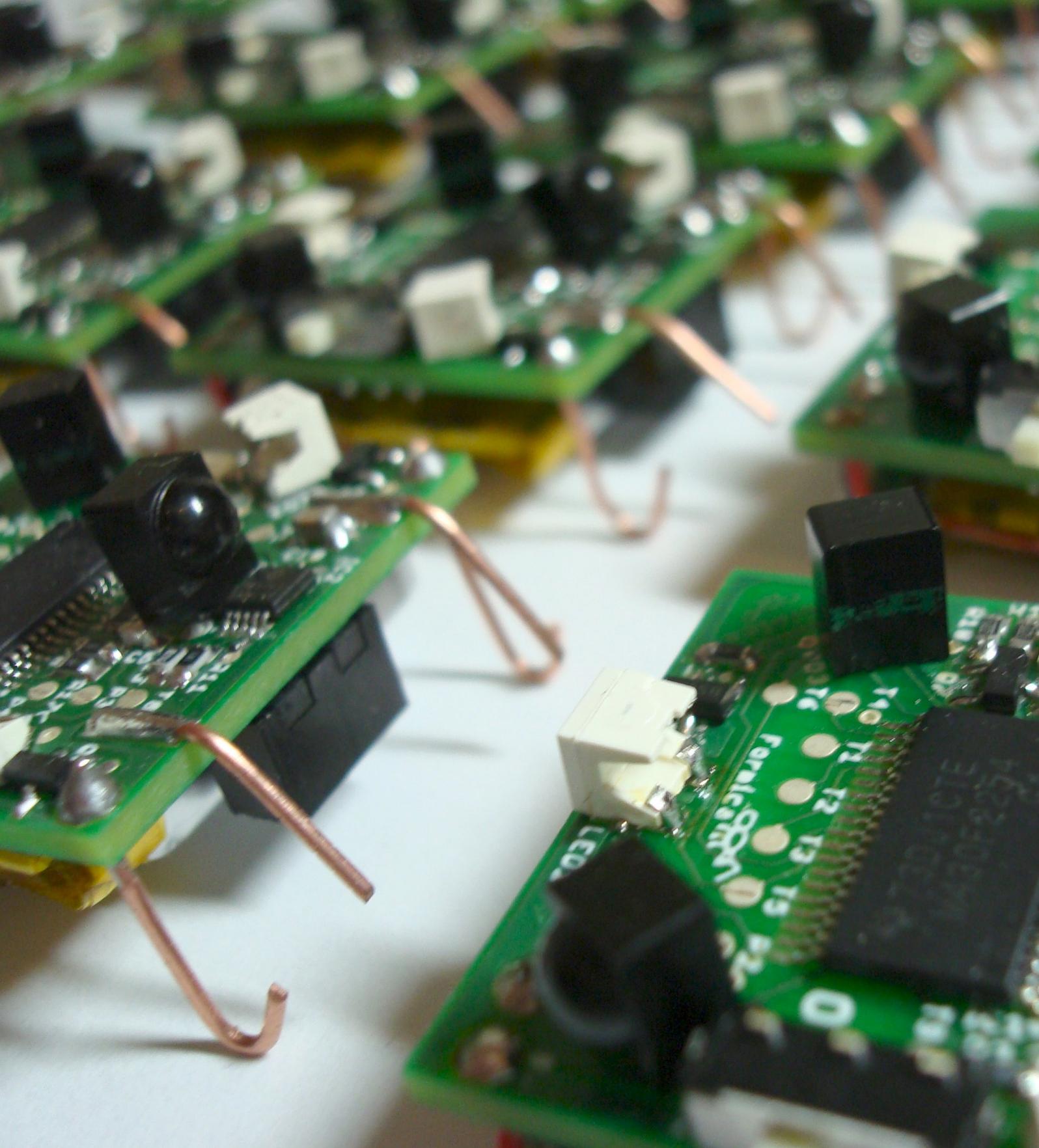
Abb.: Massentourismus

Themenkarte



genz





Schwarmrobotik

In der Schwarmrobotik werden Erkenntnisse aus der Biologie, der Informatik, und der Robotik (also der Elektrotechnik und des Maschinenbaus) kombiniert. Wichtige Forschungsstätten sind die École Polytechnique Fédérale in Lausanne (EPFL) und die Universität Stuttgart. Letztere ist im *Symbrion*-Projekt mit anderen Universitäten und Instituten vernetzt.¹

Der aktuell (Juli 2009) größte Roboterschwarm der Welt befindet sich in Stuttgart. Das Projekt der Universität Stuttgart umfasst 300 Mikroroboter, die nur knapp drei Kubikzentimeter messen.^{2,3}

Warum nicht nur ein Roboter? Es gibt Aufgaben, die man nur im Team lösen kann. Viele zu sein, bietet sich an, wenn man an mehreren Orten gleichzeitig sein soll. Das trifft zum Beispiel für Messungen zu – Erdbeben, Temperatur, Pollenflug. *„Auch wenn ein einzelner Roboter nur eingeschränkte Fähigkeiten hat, kann ein Schwarm aus etlichen solcher simplen Exemplare (...) mehr Daten sammeln, als ein einziger großer Roboter, der an sich viel leistungsfähiger ist.“*⁴

Ein anderes Beispiel ist Fußball: Der *Robocup* veranstaltet jährliche Weltmeisterschaften und Konferenzen und verfolgt die Vision, im Jahr 2050 mit autonomen humanoiden Robotern gegen den FIFA-Weltmeister zu spielen und zu gewinnen. Nun scheint Fußball keine besonders praxisnahe Anwendung für Schwarmroboter zu sein. Aber: *„Ein Roboter, der Fußball spielt und versteht, kann auch in der U-Bahn mitfahren.“*⁵

Die Robustheit eines Schwarms ist besonders dann ein entscheidender Vorteil, wenn Reparaturen gar nicht oder nur sehr schwer möglich sind – zum Beispiel auf Missionen im Weltraum. *„Je komplexer ein System ist, desto fehleranfälliger ist es. Ein Roboter, der aus vielen Komponenten besteht und viele Funktionen erfüllen kann, ist allein durch seine Konstruktion fehleranfälliger als ein Roboter, der aus wenigen Komponenten besteht. Fällt ein einzelner komplexer Roboter aus, kann dadurch die ganze Mission fehlschlagen – eine Katastrophe für die Forscher, etwa bei einem Einsatz auf einem fremden Planeten.“*⁶

1. http://www.symbrion.eu/tiki-index.php?page_ref_id=6

2. GEO Magazin Nr. 07/09 - Motoren des Lebens. S.49.

3. <http://www.swarmrobot.org>

4. Kristi Morgansen von der University of Washington in:

Werner Pluta, *Grips aus dem Gewimmel*. Bild der Wissenschaft, Ausgabe 4/2009, Seite 92. http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php?object_id=31820944

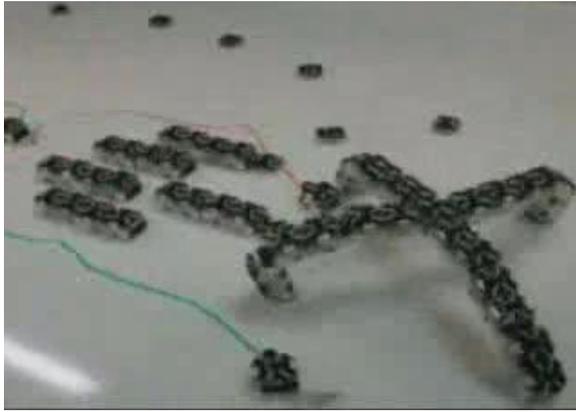


Abb.: Schwarmroboter als künstlicher Organismus

Je kleiner, desto feiner. Bei Mikrorobotern besteht die Herausforderung in der Reduktion von Gewicht und Größe. In einen solchen Winzling passt nicht viel Technik. Deswegen versucht man gerade in der Mikrorobotik die Vorteile eines Schwarms zu nutzen: Redundanz und Flexibilität. Viele niedrigauflösende Kameras sehen mehr als eine hochauflösende. Durch die Pufferwirkung des Schwarms ist es nicht schlimm, falls ein Roboter kaputt oder verloren geht. Gerade bei Mikrorobotern soll die Mitgliederanzahl im Schwarm besonders groß sein. Je größer ein Roboterschwarm werden soll, desto geringer müssen die Kosten für einen einzelnen Roboter ausfallen: Auch das ist ein Grund, Mikroroboter nur mit minimaler Technik auszustatten.

Werden Roboterschwärme irgendwann überall sein? Die Vision, einen riesigen Schwarm aus winzigen, sogenannten Nanorobotern zu bauen, ist in vielerlei Hinsicht verlockend: Sie könnten schonend und mit großer Genauigkeit medizinische Operationen durchführen, oder Gegenstände

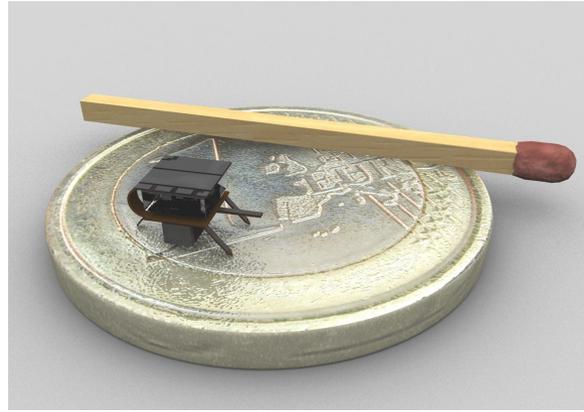


Abb.: i-Swarm-Roboter

aus einzelnen Molekülen ausbauen.⁷ Wie in dem Science-Fiction-Roman *Prey* von Michael Crichton könnten Schwärme aus Nanorobotern aber auch eine Bedrohung darstellen. Szenarien wie winzige fliegende Überwachungsroboter sind denkbar und werden bereits entwickelt. Wissenschaftler aus Berkeley reden sogar von „Intelligentem Staub“⁸, der sich unbemerkt ausstreuen ließe – eine Grundlage für diverse Horrorvisionen von Überwachung und Spionage.

Es gibt zahlreiche militärische Einsatzgebiete für Roboterschwärme.⁹ Hoffen wir, dass sich vor allem die zivilen Anwendungen weiterentwickeln.

5. Prof. Dr. Hans-Dieter Burkhard, Institut für Informatik, HU Berlin in einem Vortrag an der TU Berlin am 05.05.09. Präsentationsmaterial unter <http://files.getdropbox.com/u/563992/RoboCup-Schwarm-kurz.pdf>

6. Bild der Wissenschaft, *Grips aus dem Gewimmel*.

7. vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Nanobot> (Version vom 07.09.2009)

8. <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/16/16312/1.html>

9. Einige solcher Anwendungen sind auf <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/13/13715/1.html> verlinkt



Abb.: Ein Schwarm e-Pucks



Abb.: Die s-Bots arbeiten zusammen



Die Menge macht's

Warum macht es denn überhaupt einen Unterschied, ob wir etwas separat oder als Teil eines Ganzen betrachten? Das liegt daran, dass manche Eigenschaften erst auftreten, wenn mehrere Teile miteinander interagieren. Man kann zum Beispiel soziales Verhalten nicht an einem einzelnen Tier oder Menschen studieren. Auch ein einzelnes Wassermolekül ist nicht flüchtig. Diese Qualität von Wasser emergiert erst aus dem Zusammenspiel von vielen Wassermolekülen unter bestimmten Bedingungen wie günstigen Temperatur- und Druckverhältnissen.

„Es existiert für jedes System eine Mindestanzahl von interagierenden Bausteinen, die für die Entwicklung einer emergenten Eigenschaft notwendig ist.“¹

Diese Zahl zu bestimmen ist nicht ganz einfach: Wieviel Bäume braucht ein Wald? Es gibt eine Anzahl, bei der man schon nicht mehr von einzelnen Bäumen, aber noch nicht von einem Wald sprechen würde.

Das Emergieren von Eigenschaften geschieht als eine Art Phasenübergang. Ab einer bestimmten

Menge (teilweise auch kritische Masse genannt) ändern sich Verhaltensweisen oder Merkmale fast schlagartig. Daher kann eine lineare Zunahme eine nonlineare Veränderung bewirken.²

Ob wir diese Effekte bemerken, hängt ebenfalls mit unserem Blickwinkel zusammen. Der berühmte Schmetterling aus der Chaostheorie kann nur dann einen Tornado auslösen, wenn wir ihn als Teil eines Systems sehen. Und ein kleines Leck ist im Kühlsystem eines Atomkraftwerks eben nicht einfach nur ein Leck, sondern kann einen landstricheverwüstenden Unfall auslösen.

Auf der anderen Seite können Systeme, die aus sehr vielen, gleichen Teilen bestehen, aus Chaos Ordnung schaffen. Solche Systeme nennt man *selbstorganisierend*. Sie können sich ohne eine übergeordnete Steuerungsinstanz strukturieren und stabilisieren, wenn die Teile miteinander vernetzt sind und wechselwirken.

Systeme, die nicht zentral gesteuert werden, heißen *dezentrale Systeme*. Sie sind robuster und flexibler als zentral gesteuerte Systeme: Fällt ein

¹. vgl. Abschnitt: Irreduzibilität. In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Emergenz> (Version vom 15.09.2009)

². vgl. Steven Johnson: *Emergence. The Connected Lives of Ants, Brains, and Software*. New York (NY): Scribner, 2004. S.111f.

Mitglied aus, können die anderen trotzdem weiterarbeiten. Wenn jeder Teil eines Systems mehrfach vorhanden ist, wie das bei einem Schwarm der Fall ist, spricht man von *Redundanz*. Der Schwarm braucht keinen Anführer. Fällt bei einem hierarchischen System die zentrale Steuerung aus, bricht das System zusammen. Ein Schwarm kann beim Ausfall einzelner Komponenten weiterfunktionieren, solange die Mindestanzahl an Teilnehmern nicht unterschritten wird. Weil alle Aufgaben, auch die leitenden Funktionen, verteilt werden können, sind die Anforderungen an den Einzelnen weit geringer.



Abb.: Ameisen bilden mit ihren Körpern eine Brücke

Think local, act global

Lokale Informationen – Denke lokal, wirke global. Das Fehlen einer übergeordneten, zentralen Steuerungsinanz bringt eine entscheidende Eigenschaft emergenter Systeme mit sich: Keiner weiß über alles Bescheid, alle haben nur lokale Informationen. „Die einzelnen Individuen haben nur Teilinformationen, aber das reicht aus, wenn viele Individuen zusammenwirken.“¹ Jeder entscheidet und handelt für sich selbst. Aus der Summe der individuellen Entscheidungen und spezifischen Einzelhandlungen entsteht globales Verhalten.

Das Verhalten des Superorganismus ist natürlich von innerhalb nicht erkennbar – das Gesamtsystem kann man nur von außerhalb des Systems betrachten. Allerdings ist globale Information auch gar nicht notwendig: Keine der Ameisen eines Baus kann den ganzen Hügel von oben sehen (selbst wenn sie es könnte – die Information würde sie intellektuell überfordern, sie könnte damit nichts anfangen)². Und doch bauen die Ameisen ihr Nest wie nach einem Masterplan.

Nichtwissen kann nützlich sein. Es gibt einen Unterschied zwischen der Abwesenheit von Information und der Information über Abwesenheit.³ Emergente Systeme können schwerfällig werden, wenn ihre Komponenten allzu kompliziert werden.⁴ Das heißt, das Wissen von Individuen über den Gesamtstatus des Systems kann für sein Funktionieren hinderlich sein.

Stare orientieren sich im Schwarm nur an ihren sechs bis sieben Nachbarn: so weit können sie nämlich zählen. Noch mehr Vögel im Auge zu behalten, gar den ganzen Schwarm, würde die Verarbeitungskapazität ihres Gehirns sprengen. Wo der achtnächste Vogel sich befindet, spielt keine Rolle mehr.⁵ Unter Umständen weiß der einzelne Vogel gar nicht, dass der Schwarm, dessen Teil er ist, gerade ein Ausweichmanöver wegen eines Raubvogelangriffs fliegt – er versucht nur, nicht mit seinen Nachbarvögeln zusammenzustoßen.

1. Der Verhaltensbiologe Prof. Ronacher in: Tobias Mory, *The next social revolution* (D, 2006). Diplomarbeit an der Fachhochschule Potsdam.

2. vgl. Steven Johnson: *Emergence*. S.75.

3. vgl. Zitat des Philosophen Daniel Dennett, Johnson S.201.

4. vgl. Johnson S.78.

5. Ergebnis einer Studie von Forschern um Giorgio Parisi von der Universität Rom 2007 im Rahmen eines EU-Projektes. <http://www.scienceticker.info/2008/01/29/wie-stare-kontakt-halten/>



Auf die Nachbarn hören

In einem Schwarm richten sich die Mitglieder danach, was ihre Nachbarn tun. Das Verhalten der Nachbarn kann das Verhalten der Individuen verstärken (*positives Feedback*) oder abschwächen (*negatives Feedback*). Das kann in der Gesamtheit dazu führen, dass sich das Verhalten des Schwarms ändert (ein Beispiel wäre ein Ausweichmanöver) oder stabilisiert (zum Beispiel das Einnehmen einer stabilen Flugformation).

Positives Feedback – je mehr desto mehr

Positives Feedback (auch Mitkopplung oder positive Rückkopplung genannt) wirkt verstärkend. Diese Verstärkung geschieht zum Beispiel durch Nachahmung und Wiederholung¹: Im Gehirn verfestigen sich neuronale Netze und Verbindungen durch Wiederholung. Der Gesamteffekt wird als Lernen bezeichnet.

Positives Feedback kann dazu führen, dass ein kleiner Auslöser sich zu einem unkontrollierbaren Effekt aufschaukelt. Beispiele dafür sind Lawinen, Explosionen oder Schuldenfallen. Auch in den Medien kann es zu solchen Aufschaukel-Effekten

kommen: Eine kleine Randmeldung, anfangs von den meisten Zeitungen ignoriert, taucht plötzlich auf den Titelseiten auf und beherrscht wochenlang die Fernsehlandschaft. Da viele Blätter über das Thema schreiben, sehen sich die anderen Zeitungen gezwungen, ebenfalls darüber zu berichten, es werden Fernsehbeiträge produziert, Diskussionsrunden einberufen und schließlich philosophieren die Feuilletons über die Brisanz des Themas...¹ Solche Systeme nennt man selbstreferentiell: „*Jedes Verhalten des Systems wirkt auf sich selbst zurück und wird zum Ausgangspunkt für weiteres Verhalten.*“²

Negatives Feedback – je mehr desto weniger

Negatives Feedback (auch Gegenkopplung oder negative Rückkopplung genannt) dagegen wirkt stabilisierend. Es ermöglicht das Erreichen und Erhalten eines Gleichgewichts bei sich ändernden Außenbedingungen. Ein klassisches Beispiel ist ein Thermostat, ein System, das aus einer Heizung und einem Thermometer besteht: Die Elemente beeinflussen und kontrollieren sich

¹. Verstärkung durch Wiederholung. Vgl. Steven Johnson, *Emergence*. S.130ff.

². <http://de.wikipedia.org/wiki/Selbstorganisation> (Version vom 04.10.2009)

gegenseitig, so dass die Temperatur konstant bleibt. Ein System ohne negatives Feedback ist nicht anpassungsfähig: Es würde sich, einmal angeregt, bis zum Zusammenbruch selbst verstärken.

Alle dezentralen Systeme brauchen Rückkopplungsschleifen (Feedback loops), positive für Wachstum und negative zur Selbstregulierung.³ Wir haben lauter solche selbstregulierenden Systeme in unserem Körper: Sie halten Blutdruck, Körpertemperatur und die Zusammensetzung des Blutes konstant. Aber auch wir selbst sind wiederum Teil von Systemen mit positiven und negativen Rückkopplungen: Familien, Freundeskreisen, Nachbarschaften, Stadtvierteln, Kulturen.

3. vgl. Johnson S.133.

Regeln, an die sich jeder hält

In Schwärmen entstehen aus der Summe unzähliger Einzelaktionen Bewegungsmuster, Strukturen, die sich ständig ändern. Diese Muster sind unglaublich komplex, doch sie beruhen auf einfachen Regeln.

Der Informatiker Craig Reynolds formulierte 1986 drei Regeln, mit denen sich Schwärme am Computer simulieren lassen:

1. Bewege dich in Richtung des Mittelpunkts deiner, die du in deinem Umfeld siehst (*Kohäsion*)
2. Bewege dich weg, sobald dir jemand zu nahe kommt (*Separation*)
3. Bewege dich in etwa in dieselbe Richtung wie deine Nachbarn (*Alignment*)¹

Diese drei Hauptregeln gelten für alle sich bewegenden Zusammenballungen mit großer Individuenzahl. Aus ihnen emergieren unterschiedliche formale Strukturen.

Menschen bewegen sich im Gedränge ebenfalls nach Schwarmregeln. Beobachten lässt sich das in jeder Fußgängerzone: In der Masse bilden sich Strukturen aus Menschen, die sich mit ähnlicher

Geschwindigkeit in die gleiche Richtung bewegen. Die Muster entstehen, weil die Fußgänger einerseits versuchen, ihren Intimabstand zu erhalten (*Separation*), und sich andererseits Gruppen anschließen, die sich in Richtung ihres eigenen Ziels bewegen, um schneller voranzukommen (*Alignment*).

Die V-Formationen, in denen Zugvögel fliegen, entstehen aus nur zwei einfachen Regeln für jedes Tier:

1. Sorge für gute Sicht
2. Nutze den Windschatten der anderen.²

Ist das vergleichbar mit sozialen Regeln?

Teilweise handelt es sich sogar um soziale Regeln oder Normen, wie beim kulturell unterschiedlichen Intimabstand. Bei Tieren sind es meist angeborene Verhaltensweisen.

Und was ist mit Spielregeln? Auch Spiele sind emergente Systeme, die auf Regeln basieren. Aus den Spielregeln ist zum Beispiel nicht ersichtlich, ob ein Spiel Spaß macht. Ein besonders gutes Bei-

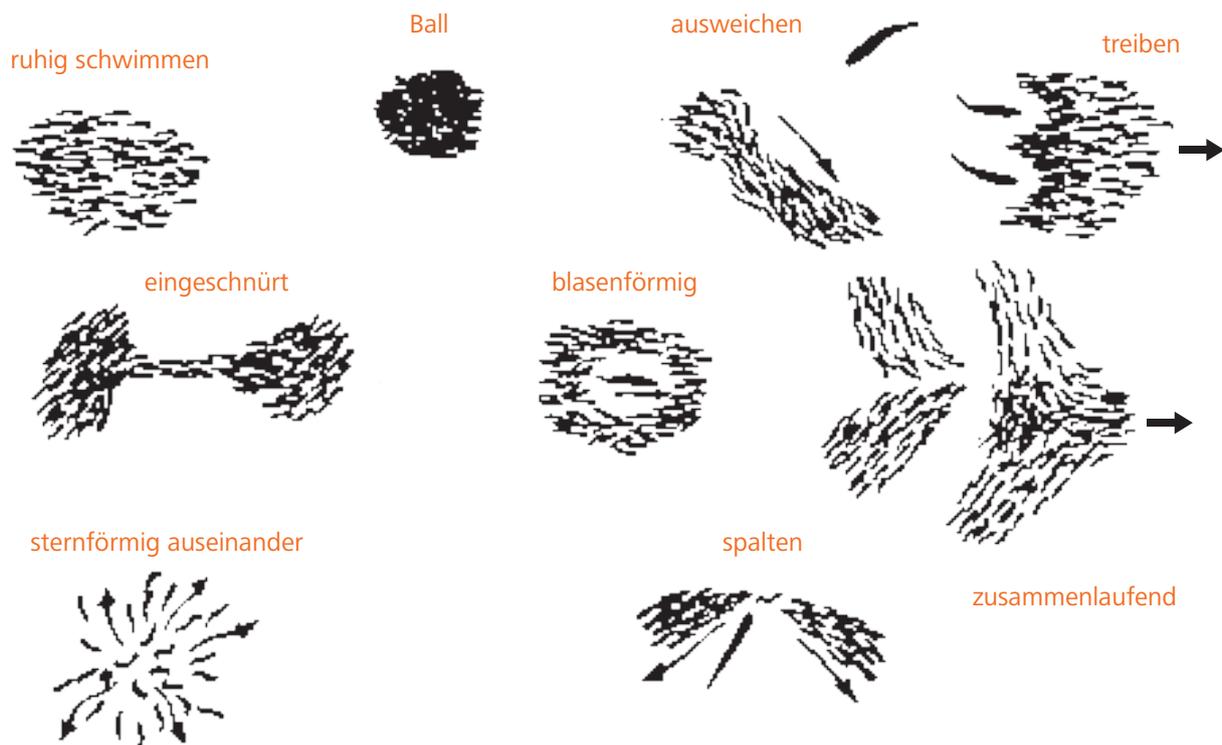
¹ vgl. Craig Reynolds: Boids.
<http://www.red3d.com/cwr/boids/>

² vgl. Andre Nathan, Valmir C. Barbosa: *V-like formations in flocks of artificial birds*. In: *Artificial Life*. MIT Press, 2008. Vol. 14, Nr. 2, S.179-188.

spiel für Emergenz ist das Schachspiel, bei dem es keine Zufallskomponente gibt. Trotz der begrenzten Möglichkeiten für das Ziehen der Figuren gibt es unzählige Spielverläufe. Ein Spiel ohne Regeln dagegen ist nicht emergent und macht wahrscheinlich auch keinen Spaß.



Schwarmformen

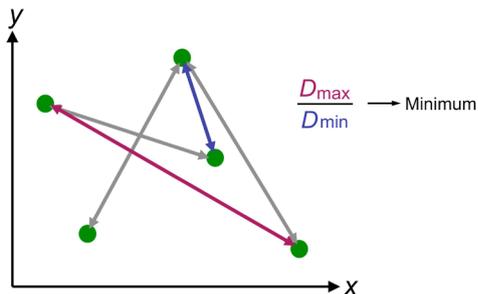




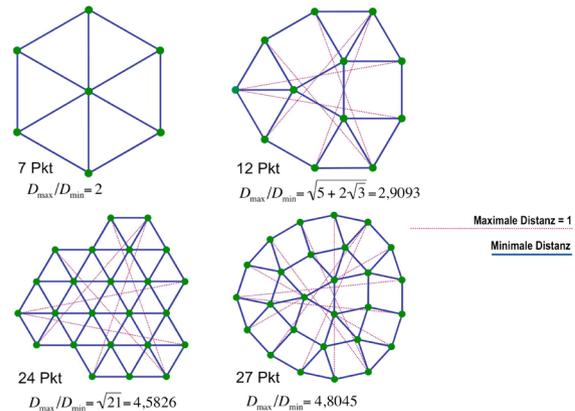
Zwischen Kunst und Mathematik

Mathematisch ausgedrückt handelt es sich bei den beiden Regeln Kohäsion und Separation um ein Maximum-Minimum-Distanz-Problem¹: Jedes Individuum im Schwarm versucht gleichzeitig, so nah wie möglich bei den anderen zu bleiben und so viel Abstand wie möglich oder nötig zu seinen Nachbarn zu halten.

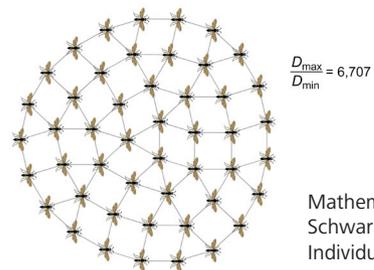
Das max/min-Distanz-Problem



Ersetzt man die Schwarmmitglieder durch Punkte und optimiert ihre Distanz, ergeben sich folgende strukturelle, mathematische Lösungen:²

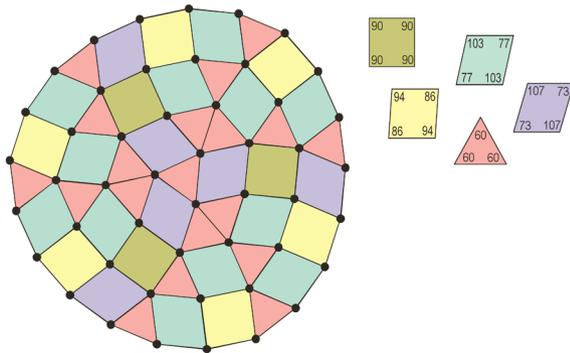


Demnach müsste ein idealer Schwarm mit 48 Mitgliedern etwa so aussehen:



1. Aus dem Vortrag von Prof. Dr. Ingo Rechenberg (Bionik und Evolutionstechnik) an der TU Berlin am 21.04.09. Präsentationsmaterial unter http://files.getdropbox.com/u/563992/schwarmlabor_bionik.pdf

2. Ebenda.



Bei solchen Berechnungen entstehen recht interessante Parkettierungen mit einer endlichen Anzahl von Steinsorten.³

Es sind dies natürlich ideale, statische Formen, die bei dynamischen, sich bewegenden Schwärmen so nicht erreicht werden. Die Formeln sind aber Grundlage für Simulationen und auch für praktische Anwendungen. Algorithmen dieser Art werden heutzutage für Flugzeugschwärme angewandt⁴, damit jedes Flugzeug bei Wahrung des Sicherheitsabstands möglichst nah bei den anderen fliegt.

Selbst Mücken – mathematisch eher minderbemittelte Wesen – scheinen nach diesen Berechnungen zu fliegen:

1. Mache in eine zufällige Richtung einen geradlinigen Flug der Länge s
2. Verkürze den Abstand zum Schwarmmittelpunkt um den Faktor a .

Simuliert man einen Schwarm mit dieser Formel, beginnen die virtuellen Mücken innerhalb einer bestimmten Wertespanne für s und a in einer

Torus-Formation (Doughnut-förmig) zu fliegen.⁵ Es emergiert also eine Form, die aus den beiden Regeln nicht ersichtlich ist. (Ob echte Mücken auch als Torus fliegen, bleibt zu untersuchen.) Die emergierende Torus-Form wurde 2007 in einem spektakulären Experiment bewiesen: 300 Menschen bekamen zwei Anweisungen:

1. Bleibe immer in Bewegung
2. Bleibe immer etwa eine Armlänge entfernt von den anderen Schwärmen um Dich herum.

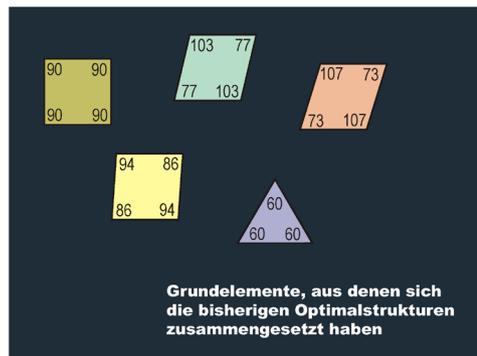
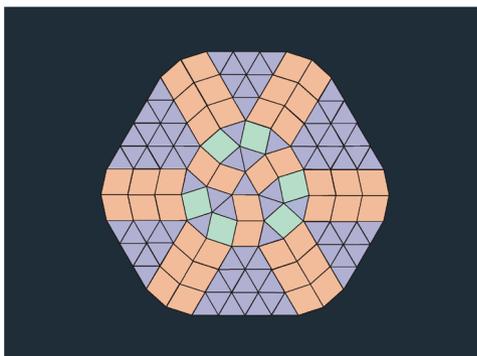
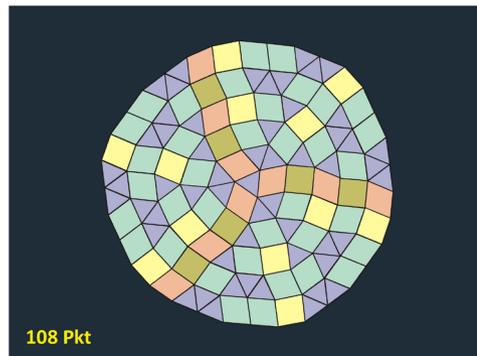
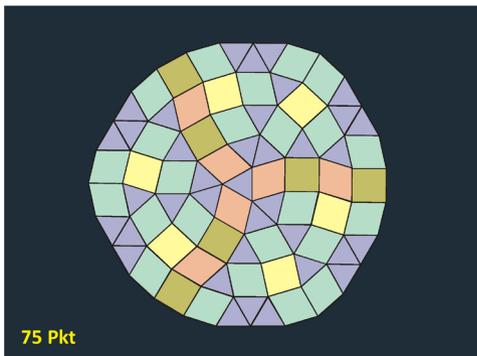
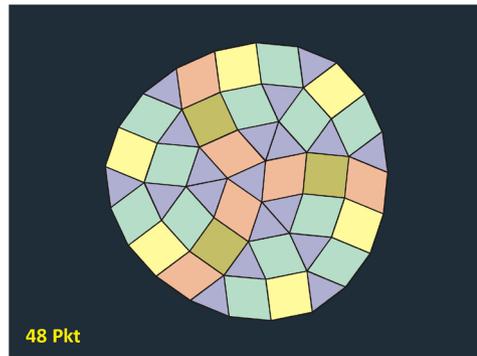
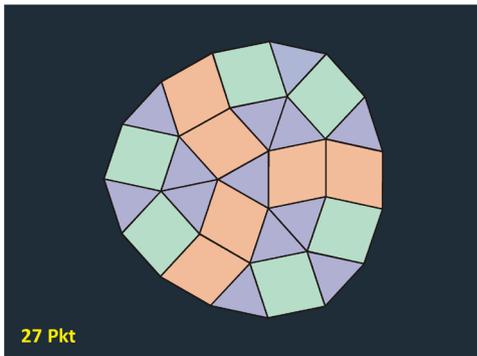
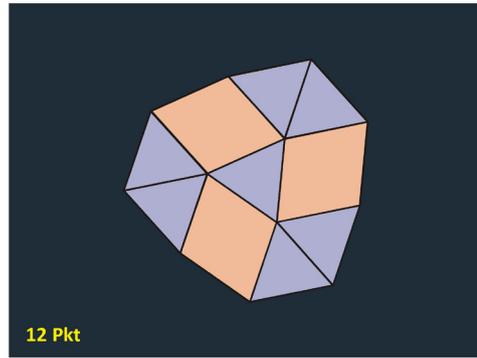
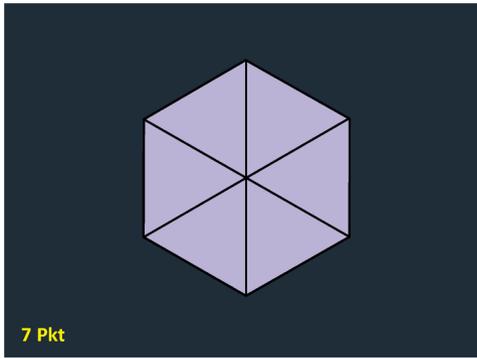
Es bildete sich spontan eine um sich selbst rotierende Walze mit einem Loch in der Mitte, wobei sich die menschlichen Schwärmer in zwei Streifen mit entgegengesetzten Laufrichtungen bewegten.⁶

3. Eine Theorie Rechenbergs, ebenfalls aus dem Vortrag.

4. Ebenda.

5. Ebenda.

6. vgl. http://www.wdr.de/tv/quarks/sendungsbeitraege/2007/0410/002_schwarm.jsp



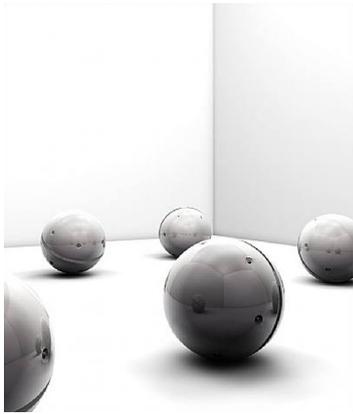


Abb.: Julius Popp, *micro.spheres* (2003-2005)

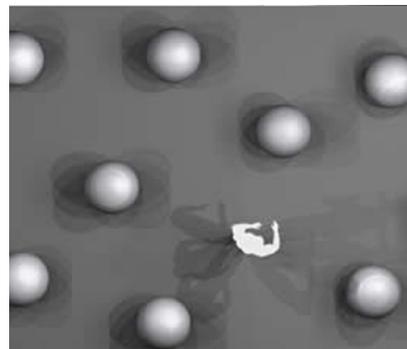
Den Effekt emergierender Formen machen sich Gestalter und Künstler beim generativen Design zunutze. Der Designer gestaltet dabei nicht mehr die Form selbst, sondern den Algorithmus, aus dem sich die Form bildet. Als Beispiel seien hier die von Software-Agenten erstellten Strukturbilder von Casey Reas genannt.

Julius Popp, *micro.spheres*

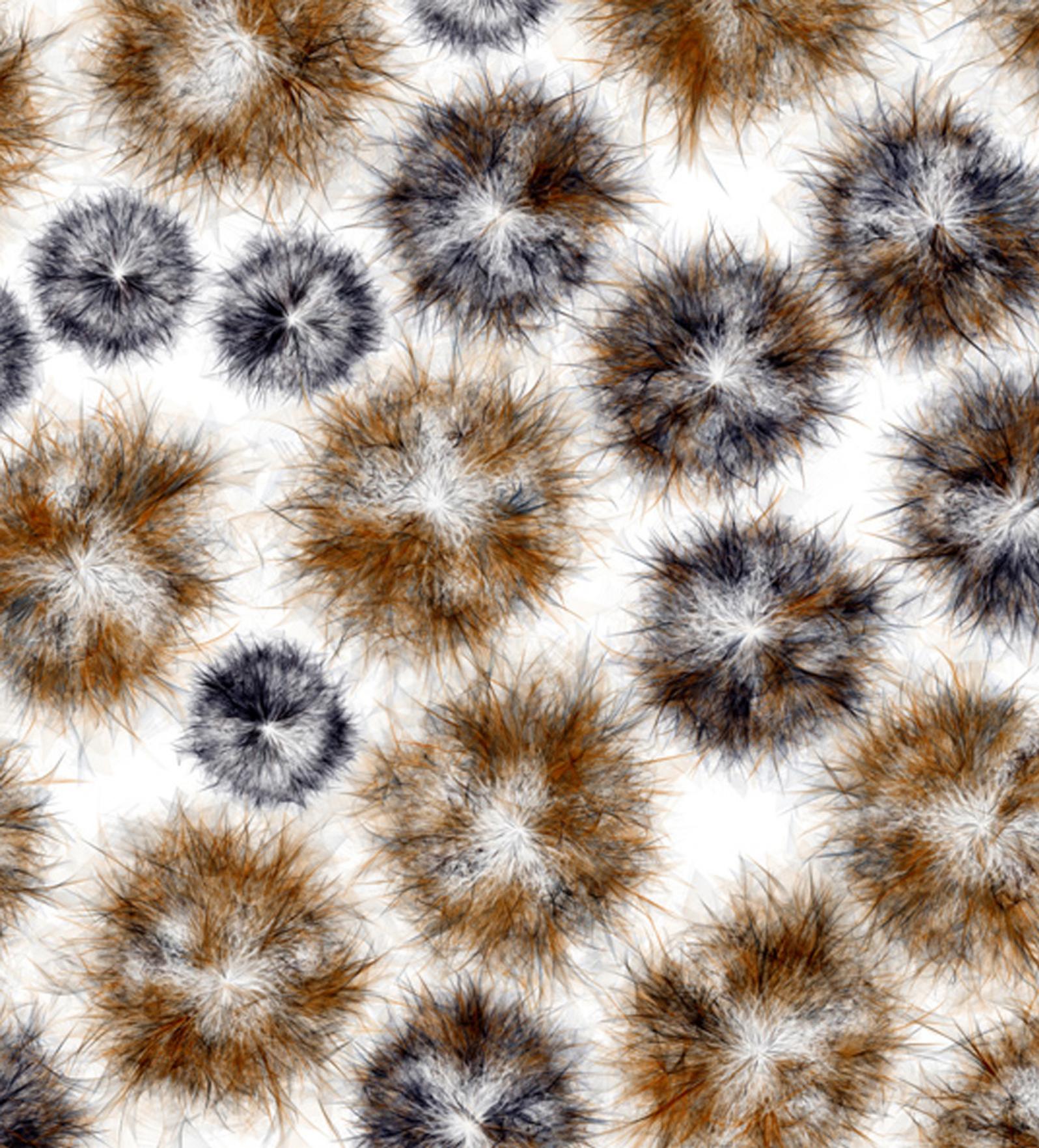
Eine künstlerische Anwendung des Minimum-Maximum-Distanz-Problems: „In *micro.spheres* treten 16 Roboter in eine simple, zugleich aber ungeahnt folgenreiche Interaktion mit den Ausstellungsbesuchern: Die etwa kniehohen Kugeln haben eine einzige Fähigkeit, sie rollen automatisch zum Mittelpunkt des ihnen zur Verfügung stehenden Raums. Bleiben die Kugeln unter sich, entstehen statische, geometrische Muster. Sobald aber ein »fremdes« Element den Raum betritt, wird eine wellenförmige Kettenreaktion ausgelöst, in der sich der Raum neu ordnet.“¹

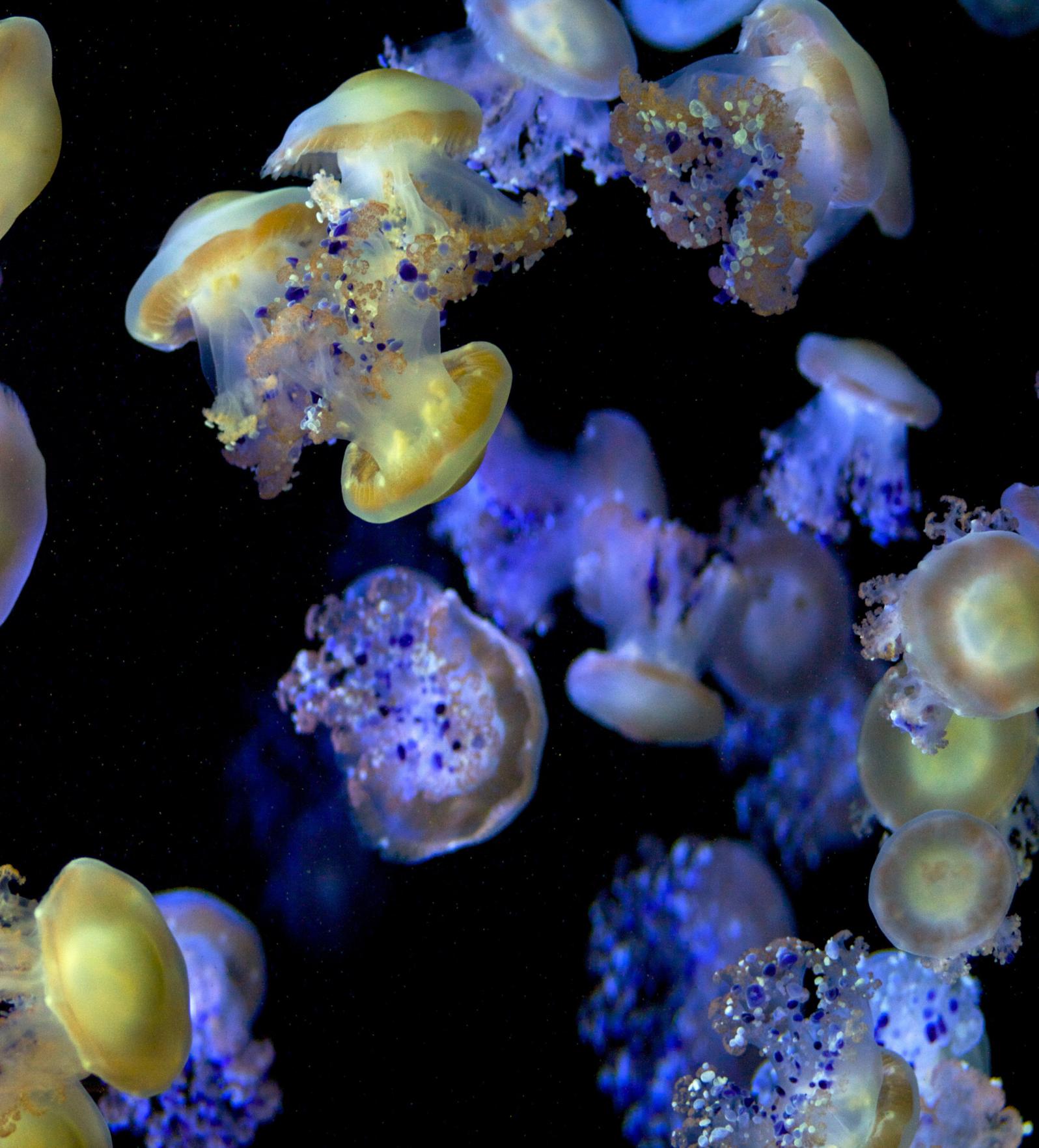
Wenn man diesen Ansatz weiterdenkt, kann man sich spannende neue Beziehungen zwischen

Mensch und Architektur vorstellen: Es gibt viele Situationen, in denen Menschen sich (nach der Maximum-Minimum-Distanz-Formel) im Raum verteilen – in Fahrstühlen, Verkehrsmitteln, Sitzungsräumen. Oft fühlen sich die Anwesenden dann unwohl, weil sie zu viel oder zu wenig Platz haben. Zu viel Platz kann zu einem Unsicherheitsgefühl führen, ist es zu eng, löst das Aggressionen aus. Interaktive Räume könnten sich den unterschiedlichen Bedürfnissen von vielen oder wenigen Menschen reagieren und sich anpassen.



1. http://www.art-report.com/de/artists/Julius_Popp/2298





Autonome Roboter als didaktisches Werkzeug

Weil unser Gehirn auf eine physische Umwelt eingerichtet ist, bedeutet Anfassen eine reichere Erfahrung als die bloße Auseinandersetzung am Bildschirm oder auf Papier. Wir können durch physischen Kontakt lernen – wir sehen das bei Babys, die alles in den Mund nehmen, um Form und Material zu spüren. Nicht umsonst sagt man statt Verstehen auch *Begreifen*.

Konstruktivistischer Ansatz des Lernens

Die meisten Menschen können sich Erkenntnisse, die sie durch eigene Erfahrung gewonnen haben, besser merken als gelesene oder gehörte. *„Laut dem konstruktivistischen Paradigma machen Menschen tiefe Verknüpfungen mit neuen Ideen, wenn sie direkt in ihre Umsetzung involviert sind.“*^{1,2}

Kreative Lernerlebnisse durch Selber-Bauen

Das Umsetzen einer eigenen Idee ist reich an Erlebnissen, an positiven wie negativen. Die gescheiterten Versuche und die selbst gefundenen Lösungen, die letztendlich zum Ziel führten, machen Selber-Bauen zu einer nachhaltigen Lernme-

thode, die zwar mühsam, aber dafür umso spannender ist. Selber-Bauen verfolgt nicht unbedingt ein Ziel, es darf spielerisch sein. Spielen und Lernen ist aber kein Widerspruch: Im freien Spiel (das heißt ohne Ziel) werden durch Ausprobieren Erfahrungen gesammelt, aus denen man lernt. Computer und Elektrotechnik sind Themengebiete, die in der heutigen Gesellschaft eine zentrale Rolle spielen. Es sind aber gleichzeitig komplexe Wissensgebiete, über die zu lernen mühsam und zeitintensiv ist. Hierin liegt das besondere Potential von Robotern als Lernmaterial: Die Beschäftigung mit ihnen vermittelt gleichzeitig die Grundlagen von Elektronik und Informatik.

Warum ist es wichtig, dass spezielle Technologien zum Lernen und Selber-Bauen entwickelt werden? Damit Laien (Kinder, Schüler, Studenten, Designer...) selber elektronische und interaktive Gegenstände bauen zu können, benötigen sie Zugang zu Material. Die Anforderungen dafür unterscheiden sich in vieler Hinsicht vom professionellen Bereich – nicht nur was die Sicherheits-

1. Kathrin Balderer: *Braitenberg Vehikel*. Universität Zürich, 2000. www.ifi.uzh.ch/groups/ailab/teaching/semi2000/Braitenberg.pdf

2. Das gleiche sagt auch ein bei Museumspädagogen beliebtes Sprichwort aus: *Was du mir sagst, das vergesse ich. Was du mir zeigst, daran erinnere ich mich. Was du mich tun lässt, das verstehe ich.*

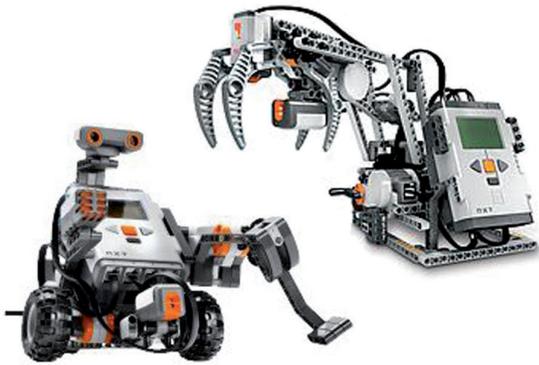


Abb.: LEGO Mindstorms

auflagen angeht. Lernmaterial muss einerseits funktionsfähig und andererseits besonders leicht zu verstehen sein. Wenn man, bevor man loslegen kann, dicke Handbücher wälzen oder erst die Grundlagen elektrischer Schaltungen verstehen muss, kann von einem kreativen Lernerlebnis keine Rede sein. Andererseits dürfen die Möglichkeiten des Materials nicht zu schnell ausgeschöpft sein. Es sollte auch fortgeschrittene bis semiprofessionelle Anwendungen unterstützen, damit der Lernende nicht nach kurzer Zeit das Gefühl bekommt, eine unnütze „Kindergarten“-Methode erworben zu haben.

Es ist klar, dass eine einzige Plattform nicht die Bedürfnisse aller Zielgruppen abdecken kann.

Robots for kids³

Die wohl bekannteste und älteste Roboterplattform im *Edutainment*-Bereich ist die *LEGO Mindstorms*-Serie, die 1998 vom bekannten Spielwarenhersteller auf den Markt gebracht wurde.⁴ Sie besteht aus einem programmierbaren



Abb.: PICO Cricket

Legostein sowie verschiedenen mechanischen und elektronischen Bauteilen. Kinder ab etwa zehn Jahren sollen damit selber Roboter oder andere autonome und interaktive Maschinen bauen und programmieren können.

„*Learning through Designing*“⁵ (Mitchel Resnick)

Mindstorms wurde von den Arbeiten und Forschungen einer Gruppe um Mitchel Resnick im Media Laboratory am MIT (Massachusetts Institute of Technology) inspiriert. Dort werden neue Technologien entwickelt, die besonders Kindern kreative Lernerlebnisse durch Selber-Bauen ermöglichen sollen.⁶ Aus dieser Idee ist außerdem die Produktserie *PICO Cricket* entstanden, die einen kindgerechten Microcontroller enthält. Die *PICO Crickets* wurden speziell für künstlerisches Spielen entwickelt. Sie sollen Kindern ermöglichen, interaktive Gegenstände mit Licht, Motoren und Sensoren zu bauen und nebenbei Grundlagenkenntnisse aus Mathematik, Naturwissenschaften und Konstruktion zu erwerben.⁷

3. Titel eines Buches, das 2000 bei Academic Press erschien
 4. <http://www.lego.com/eng/info/default.asp?page=timeline>
 5. <http://llk.media.mit.edu/papers/ll.html>

6. <http://web.media.mit.edu/~mres/>
 7. <http://llk.media.mit.edu/projects.php?id=1942>

Roboter für Studenten

Der *e-Puck* wurde an der EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) als Lernwerkzeug entworfen, das die Konzepte der Schwarmrobotik vermitteln soll. Die Roboter sollen die Kommunikation im Schwarm demonstrieren und lehren. Sie nutzen dafür Funk mit Reichweitenbegrenzung. Neben dem Roboter existiert eine auf den *e-Puck* zugeschnittene Simulationssoftware namens *Webots*. Sie dient dazu, große Schwärme zu simulieren, und um die Unterschiede zwischen Simulation und Realität aufzuzeigen.⁸ Das Hauptaugenmerk lag bei der Entwicklung des *e-Puck* auf dem Verstehen von Schwarmintelligenz, die Studenten sollten die Roboter nicht selber bauen.

Roboter für Designstudenten

Der AdMoVeo wurde an der Universität Eindhoven speziell entwickelt, um Industriedesign-Studenten das Programmieren beizubringen. Die Idee ist, dass ein mobiler Roboter die Studenten motivieren könnte, sich mit Programmierung und Technologie auseinanderzusetzen. Lang-

fristig sollen die Designer dadurch in der Lage sein, intelligentes Verhalten in ihre Prototypen zu integrieren.⁹ Auch hier lag der Schwerpunkt auf der einfachen Programmierung, der Roboter wird den Studenten als fertig zusammengebautes Werkzeug überlassen.



Abb.: e-Puck

8. vgl. Christopher M. Cianci et al.: *Communication in a Swarm of Miniature Robots: The e-Puck as an Educational Tool for Swarm Robotics*. In: Erol Sahin, William M. Spears (Hrsg.): *Swarm Robotics. WS 2004*. LNCS 3342. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. S.103-115.

9. vgl. Sjriek Alers, Jun Hu: *AdMoVeo: A Robotic Platform for Teaching Creative Programming to Designers*. In: *Learning by Playing. Game-based Education System Design and Development*. LNCS 5670. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. S.410-421.



Roboter als Interfaces

Wie menschlich soll ein Roboter sein? Je menschenähnlicher eine Maschine ist, desto intuitiver und natürlicher können wir mit ihr kommunizieren. Wegen der visuellen Ausrichtung des Menschen ist ein *Graphical User Interface* viel besser und leichter zu bedienen als ein strukturelles Interface (Datei, Text, Adresse). Noch leichter zu bedienen wäre eine Maschine, mit der wir reden könnten und die verstünde, was wir von ihr wollen, und die dann Dinge für uns erledigen könnte. Körperlichkeit ist also wichtig für Interfaces.¹ Je menschenähnlicher ein Roboter ist, desto einfacher kann man ihn in einer „normalen“, also für „normale“ Menschen gemachten Umgebung einsetzen: Der Roboter muss, um autonom zu sein, auch in der Lage sein, Treppen zu gehen, Türen zu öffnen oder Wasserhähne zu bedienen.² Erst dann kann man ihn auch als Pfleger oder Begleiter einsetzen, oder um den neuen Schrank zusammenzubauen (*Assistenzroboter*). Man möchte erwarten, dass sich auch die Sympathie verstärkt, je menschenähnlicher ein Roboter wird: Das ist nicht der Fall. An einem bestimmten

Punkt empfinden wir humanoide Roboter sogar als ausgesprochen unheimlich. Dann nämlich, wenn nur minimale Abweichungen zu normalem menschlichen Aussehen und Verhalten uns verraten, dass „etwas nicht stimmt“. Das Phänomen ist als *uncanny valley* oder Zombieeffekt bekannt und wurde 1970 von Masahiro Mori vorgestellt.³

„Menschen schreiben Robotern Absichten zu.“⁴ Menschen neigen dazu, ihre eigenen Gefühle und Verhaltensweisen auf andere Menschen, auf Tiere, Maschinen und sogar abstrakte Formen zu projizieren. Besonders Bewegungen werden mit Emotionen beschrieben: Wenn sich ein Gegenstand rasch hinter einem anderen herbewegt, sagt man, der erste habe vor dem zweiten Angst, besonders wenn der zweite größer oder spitzer als der erste ist. Bewegt sich ein Objekt erst langsam und dann schneller, wird das als Schüchternheit beschrieben, ist ein zweites Objekt im Spiel, als Zuneigung. Die Art der Bewegung scheint auszureichen, um bei Menschen eine Reaktion wie auf ein Lebewesen zu provozieren.⁴

1. Prof. Dr. Hans-Dieter Burkhard, Institut für Informatik, HU Berlin in einem Vortrag an der TU Berlin am 05.05.09.
2. Ebenda.

3. vgl. <http://www.androidscience.com/theuncannyvalley/proceedings2005/uncannyvalley.html>

3. Prof. Dr. Burkhard

4. Eine Feststellung, die ich 2006 bereits bei meiner Installation *schüchterne Lichter* machen konnte, bei der auf den Boden projizierte Lichtpunkte auf Bewegung reagierten. Es hieß, die Lichter „flüchteten“ bei hektischen Bewegungen.

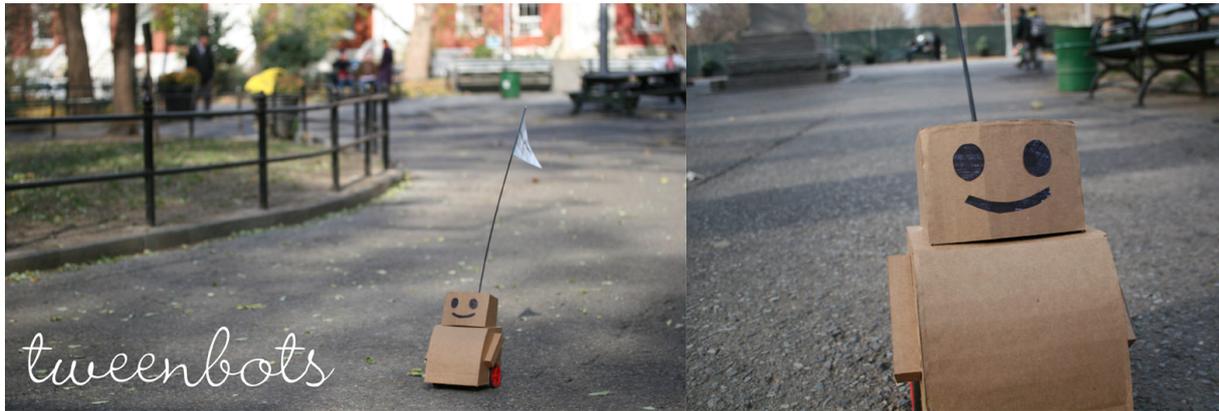


Abb.: Kacie Kinzer, *Tweenbots* (2008)

Der unbeholfene Roboter. Je unbeholfener ein Roboter sich bewegt, desto weniger wird er als Bedrohung wahrgenommen. Wir lachen über ihn, oder reagieren mitfühlend und hilfsbereit. (Wobei die Bezeichnung *mit-fühlend* irreführend ist: der Roboter fühlt ja nicht; wir fühlen. Und projizieren dieses Fühlen auf ihn.)

Kacie Kinzer hat mit ihrem Projekt *Tweenbots* dieses Verhalten erforscht: Ihre hilflosen Roboter sind mit einem Fähnchen ausgestattet, auf dem „Help me!“ steht und ein Fahrtziel angegeben ist. Sie können nur geradeaus fahren und sind auf Passanten angewiesen, die sie in die richtige Richtung drehen. Nur mit menschlicher Hilfe können sich die Tweenbots in der Stadt zurechtfinden. Die Künstlerin hat mehrere ihrer Objekte in New York ausgesetzt und die Reaktionen und das Verhalten der Fußgänger beobachtet. Die Leute waren erstaunlich fürsorglich zu den Robotern, sie achteten darauf, dass diese sich nicht in gefährliche Situationen begaben; einer sprach sogar laut mit dem Tweenbot. Während der mehreren

Monate, in denen das Experiment lief, erreichten alle Tweenbots ihr Ziel, keiner ging kaputt oder gar verloren.⁵

Solche Roboter lösen bei Menschen spontan die Reaktion „süß!“ aus. Doch das Kindchenschema funktioniert selbst bei nackten Maschinen ohne Fell oder ein aufgemaltes Gesicht: Mein erster Prototyp, ein Kabel- und Bauteilewust auf Rädern, löste bei allen Betrachtern Schutzinstinkte aus. Der nur halbfunktionierende Antrieb wurde als „unsicher“ und „tastend“ bezeichnet. Sogar Gefühle wurden der simplen Maschine zugesprochen: „Guck mal, er hat Angst!“

Noch einen Schritt weiter als Kacie Kinzer geht Norman White in der Thematisierung des sozialen Verhältnisses zwischen Mensch und Maschine mit seinem *Helpless Robot*: Seine Maschine benutzt den Menschen. Die interaktive Installation „wurde zwischen 1987 und 1996 entwickelt und besteht aus einem unförmigen Holzkasten, der auf ein drehbares Gestell montiert ist. Wenn sich

5. vgl. <http://www.tweenbots.com/>

Das Uncanny Valley nach Masahiro Mori

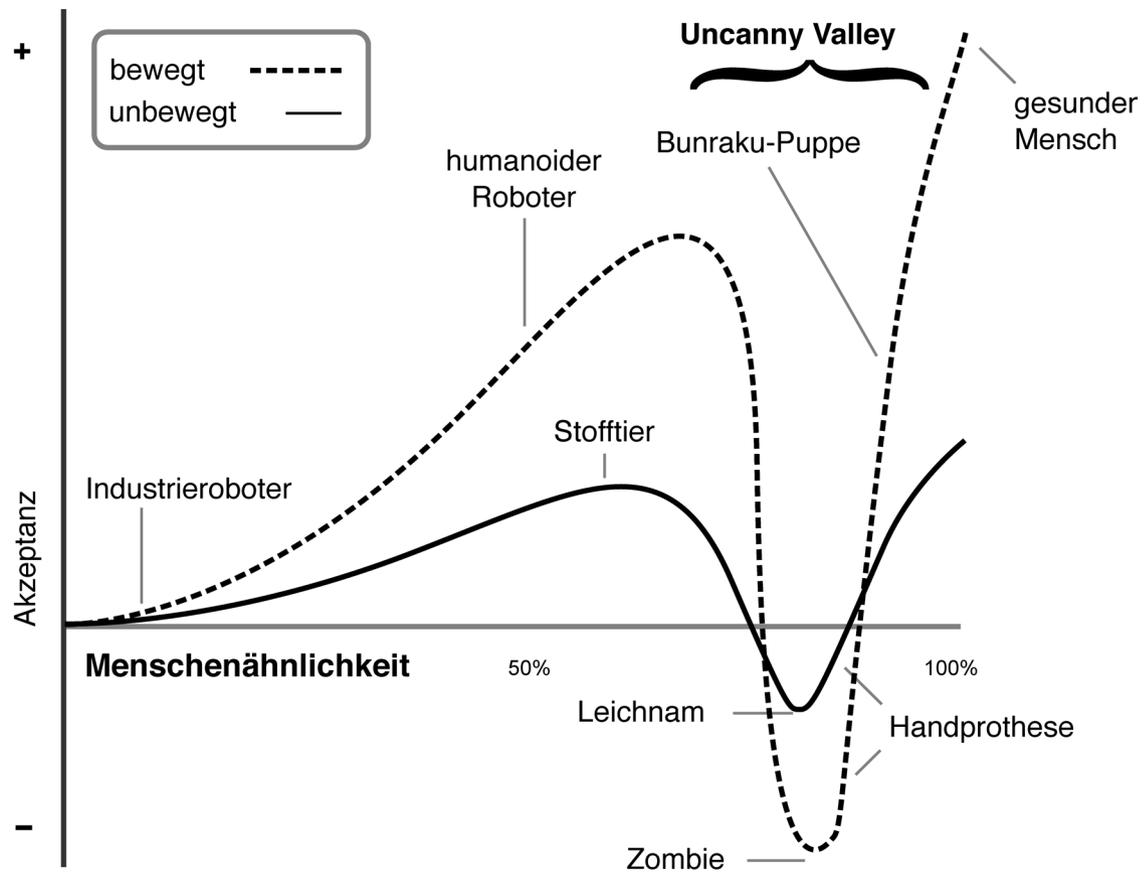




Abb.: Norman White, *Helpless Robot* (1987-1996)

der Besucher dem Objekt nähert, vernimmt er die höfliche Frage: »Entschuldigen Sie, haben Sie einen Moment Zeit?« Dann folgt: «Können Sie mich bitte nach rechts drehen?« Wenn der Besucher willens ist, mitzumachen, erhält er als Reaktion eine Beschwerde. Im weiteren Verlauf entwickelt sich ein Wechselspiel, in dem der Helpless Robot zuerst immer fordernder und zum Schluss diktatorisch wird.“⁶

[Anm. Es folgt nicht immer sofort eine Beschwerde. Nach Auskunft der Galeristin im DAM Berlin verfügte der Roboter über ein Repertoire von 500 Sätzen, so dass die Wahrscheinlichkeit hoch sei, bei jeder Interaktion unterschiedliche Reaktionen zu bekommen. Die Stimme des Roboters sei weiblich und anfangs ausgesprochen süßlich, sie schnurre sogar manchmal voller Wohlbehagen, wenn der Besucher sie drehe. Besuch im DAM, 17.10.2009]

In einer Studie am Georgia Institute of Technology stellte sich heraus, dass die Besitzer eines *Roomba* eine tiefe Zuneigung zu ihrem Staubsaugerroboter entwickeln.⁷ Sie verziehen es, wenn

der Staubsauger nicht richtig funktionierte und waren sogar bereit, ihre Wohnungen vorzusäubern oder neue Teppiche und Möbel zu kaufen, damit der Roboter leichter darunter saugen konnte.

„If we can design things that are somewhat emotionally engaging, it doesn't have to be as reliable.“⁷

Vielleicht sollte die Robotik also ihren Ehrgeiz nicht mehr in die Entwicklung von menschenähnlicheren, sondern sympathischeren Robotern legen – besonders, wenn wir in Zukunft mit ihnen zusammenleben sollen.

6. Wolf Lieser: *Digital Art*. Hamburg: Ullmann, 2009. S.234ff.
7. vgl. Ja-Young Sung et al.: „*My Roomba is Rambo*“. *Intimate Home Appliances*. In: *UbiComp 2007. Ubiquitous Computing*. Berlin / Heidelberg: Springer, 2007. S.145. Vorschau online

unter http://books.google.de/books?id=J-IORLNph_4C&printsec=frontcover&dq=UbiComp+2007#
7. Zitat: Beki Grinter. Vgl. <http://www.foxnews.com/story/0,2933,299022,00.html>



Abb.: Zombiefekt. Humanoide Roboter des Wissenschaftlers Hiroshi Ishiguro

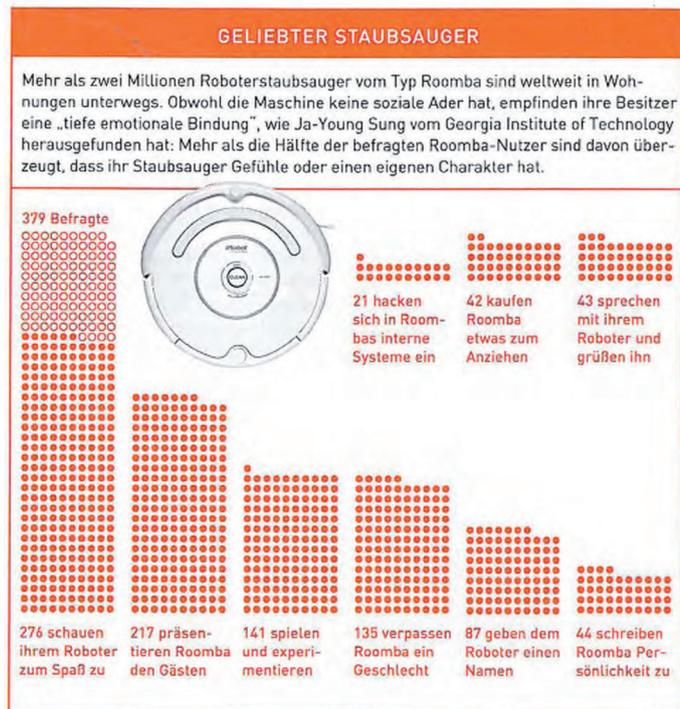


Abb.:Staubsauger Roomba



Grafik: SZ Wissen

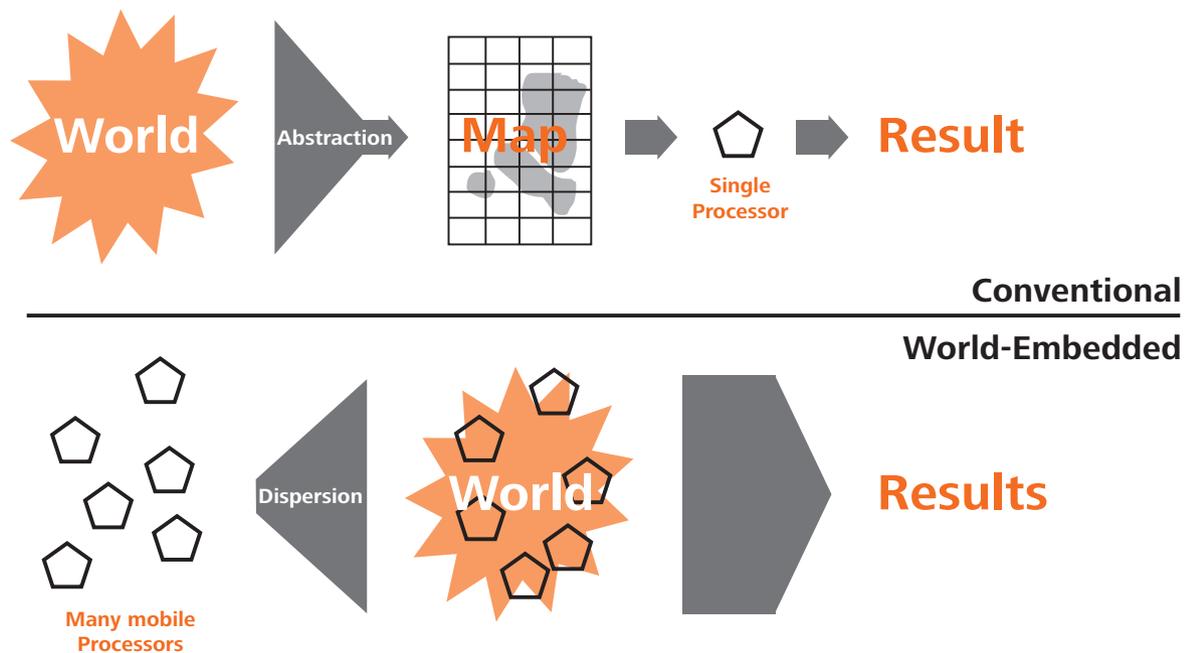


Abb.: Integration statt Abstraktion: Statt eine einzige abstrakte Karte in einem Zentralcomputer zu erstellen, werden viele kleine Computer in der Welt verteilt (integriert). Da die Computer vernetzt sind, entsteht ein gemeinsames Weltbild, das exakt genauso groß ist wie die physische Verteilung der Roboter: Die Welt als ihre eigene Karte.

Schwarmroboter als Interface

Bisher werden Roboterschwärme hauptsächlich als Forschungsinstrument verwendet. Doch wenn Schwarmroboter in der Zukunft allgemein verfügbar werden, stellt sich eine neue Frage: Wie interagiert man mit einem Schwarm?

Schwarmroboter als World-Embedded Display

Eine Gruppe von Wissenschaftlern an den HRL Laboratories veröffentlichte 2004 ein Konzept, in dem sie Schwarmroboter als *augmented-reality* Display benutzen, um den User durch eine fremde Umgebung zu lotsen. In ihrem Zukunftsszenario setzt ein Rettungsteam einen Schwarm aus tausenden mikroskopisch kleiner Roboter aus. Die Roboter verteilen sich im Gebäude auf der Suche nach Überlebenden. Entdeckt ein Roboter einen Überlebenden, teilt er das den anderen im Schwarm sofort mit. Eine Pheromonspuren-inspirierte Wegoptimierung zeigt nun den Rettern den kürzesten Weg zum Opfer an, wobei die Schwarmroboter selbst als verteiltes Display fungieren. Die Roboter agieren ohne zentrale Steuerung. Entsprechend wird auch keine Karte

der Umgebung erstellt; vielmehr werden durch die Roboter sowohl Computer als auch Display *in die Welt integriert*.¹



Abb.: Roboterschwarm mit PDAs als Display und Controller

Schwarmroboter als Haustiere. Auf der Fachkonferenz SIGGRAPH 2007 wurden die *Glowbots* vorgestellt, die auf dem an der EPFL entwickelten *e-Puck* basieren.² *Glowbots* sind kleine leuchtende Schwarmroboter, die blinkende, rotierende farbige Formen auf ihren LED-Displays zeigen. Durch die Interaktion mit einem *Glowbot* (schütteln)

1. vgl. David Payton, Regina Estkowski, Mike Howard: *Pheromone Robotics and the Logic of Virtual Pheromones*. In: Erol Sahin, William M. Spears (Hrsg.): *Swarm Robotics*. WS 2004, LNCS 3342. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. S.45-57.

2. http://www.e-puck.org/index.php?option=com_content&task=view&id=54&Itemid=2

kann der Roboter angeregt werden, die Form auf seinem Display auf einen *Glowbot* in seiner Nähe zu übertragen. Benachbarte Roboter kommunizieren ihre Muster, mischen sie oder einigen sich auf ein gemeinsames. Alle *Glowbots* haben zwar dieselbe Programmierung, sind aber „Individuen“, deswegen kann man ihr Verhalten nicht voraussagen. Die *Glowbots* sind als eine Art Haustier gedacht, das man stundenlang beobachten kann. Sie dienen nur zur Freude und Unterhaltung.³

Die beiden Beispiele machen deutlich, dass wir uns Gedanken über die Übertragung von Information innerhalb des Schwarms machen müssen, wenn wir mit einem Roboterschwarm interagieren wollen. Es genügt nicht, nur das Interface zwischen dem Mensch und dem einzelnen Roboter zu gestalten. Man muss auch die Interaktion der Roboter untereinander gestalten, damit der gesamte Schwarm reagiert.

3. vgl. Mattias Jacobsson auf der SIGGRAPH 2007. <http://www.sics.se/fall/projects/glowbots/media.html>





Ist Intelligenz an Körperlichkeit gebunden?

Bis in die 80er Jahre war ein abstraktes Intelligenzverständnis vorherrschend. *„Es beruht auf der Vorstellung, dass Intelligenz letztlich auf bestimmte Algorithmen reduziert werden könnte. In dieser Vorstellung spielt die effektive Realisierung keine Rolle: die Algorithmen können im Hirn, in einem Computer oder auch in einem Stück Emmentaler Käse berechnet werden, um ein Bild des Philosophen Hillary Putnam zu brauchen. (...) Diese Vorstellung geht davon aus, dass auch der Mensch letztlich eine informationsverarbeitende Maschine ist.“*¹

Heutzutage spielen Computer besser Schach als Menschen und können schneller rechnen – sind sie deswegen intelligenter? Die beste Anwendung für die traditionelle Auffassung von künstlicher Intelligenz ist der Schachcomputer. *„Schach ist ein formales Spiel. Jede Position im Spiel lässt sich mit formalen Regeln eindeutig beschreiben. Es findet keine Interaktion mit der Umwelt statt oder sie ist trivial und besteht aus dem Verschieben von Figuren.“*²

Die Intelligenz des Schachcomputers ist eine

Inselbegabung. Das Schachprogramm kann nur Schach spielen und sonst gar nichts. Auch wenn man Jahrzehnte wartet, es wird nie von alleine etwas anderes tun.

Der Mensch fühlt sich auch in Teilbereichen nicht gerne unterlegen, daher wurde kurzerhand ein neuer Intelligenzbegriff geprägt: Die *Embodiment-These*. *„Der Körper ist eine notwendige Bedingung für die Intelligenz.“*³ Wahrnehmung und Bewusstsein sind Produkt einer Wechselbeziehung zwischen Körper und Umwelt.⁴ Hinzu kommt, dass Intelligenz nicht nur durch Denken entsteht, sondern auch eng mit Erfahrungen und Lernen zusammenhängt. Um Erfahrungen sammeln zu können, benötigt man Sensoren. Sensoren bedeuten Körperlichkeit.

Erkenntnisproblem: Gibt es natürliche Intelligenz ohne Körper? Technikproblem: Gibt es Computer-Intelligenz ohne Körper?

Die traditionelle Trennung von Körper und Geist erweist sich bei näherer Betrachtung als sinnlos. Geist in Reinform existiert nicht, beziehungs-

1. Rolf Pfeifer in: *Das Geheimnis der Intelligenz liegt nicht im Gehirn* von Dominik Landwehr. Artikel in *Telepolis*, 27.01.2000. <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/6/6596/1.html>

2. Ebenda.

3. Ebenda.

4. Martin Hubert: *Körper im Kopf*. Beitrag im *Deutschlandfunk*, 20.01.2008. <http://www.dradio.de/dlf/sendungen/wib/722397/>



Abb.: Der biologisch inspirierte amphibische *Salamandra Robotica* mit Sensor-Motor-Kopplung in Form von künstlichem Rückenmark

weise nur als Idee. Auch die Unterscheidung von Hardware und Software ist insofern nur ein Konzept, das bei der Konstruktion und Fehlerbehebung helfen soll, als das eine ohne das andere wertlos ist. *„Intelligentes Verhalten hat nichts mit Symbolverarbeitung zu tun. Um dies zu erforschen, brauchen wir reale Körper. Der Körper ist eine notwendige Bedingung für die Intelligenz, und Körper heißt in unserem Fall Roboter. (...) Roboter sind Forschungsinstrumente. Wir sind gezwungen, Roboter zu verwenden.“*⁵

Rationales Denken und rationales Verhalten sind nicht dasselbe. *„Das zeigt ein Blick auf das Verhalten der Ameisen: Sie verhalten sich zweckdienlich und optimieren den kürzesten Weg zur Futterquelle. Aber sie machen das nicht analytisch-deduktiv. Sie benutzen Pheromonspuren, die mit der Zeit verdunsten. Dann findet ein Prozess der Selbstorganisation statt. Der Beobachter stellt dann fest, dass die Ameise den optimalen Weg gefunden, aber dass sie kein Bewusstsein davon hat.“*⁶

Aus dieser Beobachtung ist der Forschungszweig *biologically inspired robotics* entstanden. Statt auf massive Rechenleistung zu setzen, statten die Wissenschaftler die Roboter mit vielen Sensoren aus. Sensor-Aktor-Kupplungen erlauben schnelle Reaktionen, da die lokale Verarbeitung eines Reizes anders als bei der zeitraubenden zentralen Datenverarbeitung direkt geschieht. Sogenannte *Rekurrente Neuronale Netze* (also Feedback Loops) ermöglichen es den Robotern, durch Versuche und das Sammeln von Erfahrungen zu lernen. Durch *Evolutionäre Algorithmen* können die Verhaltensregeln des Roboters in einem *trial-and-error*-Verfahren optimiert werden. Die Forscher hoffen, dass dadurch langfristig erwünschtes Verhalten emergiert.⁷

5. Rolf Pfeifer in: *Das Geheimnis der Intelligenz liegt nicht im Gehirn.*

6. Ebenda.

7. Aus dem Vortrag von Prof. Dr. Burkhard an der TU Berlin am 05.05.09.

Braitenberg-Vehikel und das Bezugsrahmenproblem

Braitenberg-Vehikel sind einfache Sensor-Motor-Kopplungen, die der Kybernetiker Valentino Braitenberg in seinem Buch *Vehicles*, erstmals erschienen 1984, als theoretische Konzepte vorstellt.¹ „Grundlegend im Zusammenhang mit diesen Vehikeln ist die Idee, Synthese statt Analyse zu betreiben.“² Im Folgenden zitiere ich aus der exzellenten Zusammenfassung *Braitenberg Vehikel* von Kathrin Balderer aus dem Seminar „Natürliche und Künstliche Intelligenz“ an der Universität Zürich, 2000.

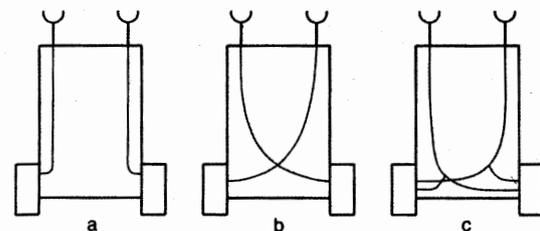
Vehikel 1

„Vehikel 1 ist das einfachste Braitenberg Vehikel. Es ist nur mit einem Sensor und einem Motor ausgestattet. Je stärker der Sensor stimuliert wird, desto schneller dreht sich der Motor. Der Sensor könnte beispielsweise Konzentrationen von Chemikalien, Lichtintensität oder Temperatur messen. Das Vehikel bewegt sich geradeaus und variiert seine Geschwindigkeit der Sensorstimulation entsprechend. Wenn man Störfaktoren wie Reibung oder Strömungen berücksichtigt, wird das Verhalten des

Vehikels bereits interessanter. Diese Einflüsse können das Vehikel von seinem geradlinigen Kurs abbringen und für einen Beobachter ist es bereits schwierig das Verhalten genau vorauszusagen.“

Vehikel 2

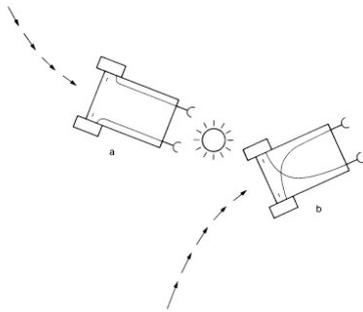
„Dieses Vehikel besitzt zwei Motoren und zwei Sensoren, wobei die Motoren bei höherer Intensität der Sensorstimulation wiederum schneller drehen. Abbildung 1 zeigt die drei möglichen Verknüpfungen, wobei das Modell c analog zu Vehikel 1 funktioniert.“



Falls sich eine Quelle gerade vor einem Vehikel befindet, steuert dieses direkt auf sie zu. Befindet

1. Valentino Braitenberg: *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1984.

2. Kathrin Balderer: *Braitenberg Vehikel*. Universität Zürich, 2000. www.ifi.uzh.ch/groups/ailab/teaching/semi2000/Braitenberg.pdf



sich die Quelle auf der linken oder rechten Seite des Vehikels, dreht sich Vehikel 2a von ihr weg (da der Motor auf der Seite der Quelle stärker aktiviert wird) während Vehikel 2b sich zu ihr hin dreht. Je näher das Gefährt der Quelle kommt, desto höher wird seine Geschwindigkeit.“

Vehikel 3

„Die Vehikel vom Typ 3 sind mit denselben Sensoren und Motoren ausgestattet wie diejenigen vom Typ 2. Allerdings sind die Verbindungen bei diesem Modell negativ, d.h. bei erhöhter Sensorstimulation nimmt die Geschwindigkeit des zugehörigen Motors ab. Deshalb nähern sich die Vehikel der Quelle und kommen schliesslich in ihrer Nähe zur Ruhe. Die Vehikel vom Typ 3a blicken die Quelle an, während die Vehikel vom Typ 3b in die entgegengesetzte Richtung schauen.

Vehikel vom Typ 3c entstehen, indem in einem Vehikel mehrere Sensoren eingebaut werden, welche unterschiedliche Qualitäten messen. Dabei können einige mit positiven, andere mit negativen Verbindungen versehen werden. Das Verhalten dieser

Vehikel ist schon sehr komplex, und als Beobachter ist es schwierig die Reaktion mit der Umwelt genau vorauszusagen.“

Vehikel 4

„Bis jetzt haben monoton fallende bzw. wachsende Funktionen die Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Motoren von der Intensität der Sensorstimulation beschrieben. Bei den Vehikeln vom Typ 4 werden jetzt etwas kompliziertere Funktionen eingeführt.

Zum Beispiel könnte man sich ein Vehikel vorstellen, bei dem zunehmende Sensoraktivität einen zugehörigen Motor zuerst immer schneller laufen lässt, aber nur bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit. Wenn die Sensoren danach weiter stimuliert werden, nimmt die Geschwindigkeit wieder ab. Es bereitet einem Beobachter bereits Mühe, das Verhalten eines solchen Gefährtes genau zu verstehen, oder es sogar vorauszusagen.

Ein noch erstaunlicheres Verhalten wird erzeugt, wenn man die Aktivität der Motoren durch eine sprungstetige Funktion reguliert. Ein solches Ge-

fährt würde sich beispielsweise über längere Zeit gar nicht bewegen, dann aber plötzlich mit maximaler Geschwindigkeit davonfahren.“

Vehikel 5

„Die Vehikel vom Typ 5 will Braitenberg mit einem einfachen Gedächtnis versehen. Dies erreicht er, indem er neuronale Netze in die Vehikel einbaut.“

Vehikel 6

Bei Vehikel 6 führt Braitenberg eine Art künstlicher Evolution ein.

Frame-of-Reference-Problem / Uphill Analysis and Downhill Invention

„Die Braitenberg Vehikel sind ein gutes Beispiel für das Frame of Reference Problem (*Bezugsrahmenproblem, Anm. d. Verf.*). Während die Vehikel nur auf Sensorstimulationen reagieren, begründet ein Beobachter ihr Verhalten mit Emotionen.

Wir versuchen das Verhalten dieser Agenten mit unserem eigenen Verhalten zu erklären. Dadurch überschätzen wird die Komplexität ihrer Mechanis-

men. Weil ihr Verhalten unserem eigenen ähnlich ist, vermuten wir sofort, dass auch die zugrundeliegenden Mechanismen ähnlich funktionieren.

Braitenberg macht darauf aufmerksam, dass man als Analytiker dazu neigt, die Komplexität einer Situation oder eines Verhaltens zu überschätzen. Deshalb schlägt er das Gesetz der „uphill analysis and downhill invention“ vor. Dies widerspricht ein Stück weit unserer Intuition. Intuitiv würden wir nämlich sagen, dass es einfacher sei, etwas Gegebenes zu analysieren, als selber etwas Neues zu bauen. Braitenberg hat aber einfache Vehikel gebaut und festgestellt, dass wir ihr Verhalten nur schwer verstehen können. Sogar mit dem Wissen über die interne Struktur dieser Vehikel ist es uns nicht möglich, deren Verhalten vorauszusagen.“

Sensory-Motor Coupling and Brains

„Machen wir ein Gedankenexperiment, indem wir uns überlegen, was passieren würde, wenn man in Vehikel 1 ein mächtiges Gehirn einbauen würde. Was könnte man damit erreichen? Es wird rasch klar, dass es in diesem System gar keine Aufgabe

für ein solches Gehirn gibt. Bei einem einfachen System von einem Sensor und einem Motor bringt ein leistungsfähiges Gehirn nur etwas, wenn auch die Sensoren und Motoren angepasst werden. In der klassischen künstlichen Intelligenzforschung wurde das Schwergewicht sehr stark auf das Gehirn gelegt. Dieses Beispiel illustriert aber, wieso auch ein leistungsfähiges Gehirn nichts nützt, wenn es nicht in der Lage ist, mit seiner Umwelt zu interagieren. Aus der heutigen Sicht der künstlichen Intelligenz ist es deshalb sinnvoll, von einfachen Systemen von Sensoren und Motoren mit nur wenig interner Verarbeitung auszugehen.“

Segmentierung des Verhaltens

„Betrachtet man beispielsweise ein Vehikel vom Typ 3, so stellt man fest, dass keine interne Verarbeitung stattfindet. Es gibt nur einfache Verbindungen zwischen den Sensoren und den Motoren. Man kann also nicht explizit auflisten, welche Aktionen der Agent bei einem bestimmten Verhalten gerade durchführt. Deshalb ist eine Segmentierung des Verhaltens rein subjektiv und kann nur von

einem Beobachter durchgeführt werden. Da die Wahrnehmung eines Vorgangs typischerweise von Beobachter zu Beobachter unterschiedlich ist, ist es schwierig eine allgemeingültige Lösung zu finden. Die Schwierigkeit Verhalten zu segmentieren, tritt auch in natürlichen Systemen oft auf. Die Braitenberg Vehikel sind also ein gutes Modell um dieses Problem zu demonstrieren.“



Nachwort

Was bedeutet das für unsere Zukunft?

Rolf Pfeifer: „Das ist eine interessante Frage: Wir haben keine Probleme, die Organisation der Ameisen als emergente Organisationsweise zu erklären. Sobald wir diese Erklärungen aber auf menschliches Verhalten anwenden, schrecken wir zurück. Diese Erklärungsmuster laufen unserem Weltbild zuwider, in dem wir selber im Mittelpunkt stehen und alles kontrollieren. Es fällt uns schwer zu akzeptieren, dass sich viele Strukturen selber ergeben und nicht das Resultat unseres analytischen Denkens sind.“¹

Traditionelle lineare und kausale Denkweisen bringen uns in einer sich rasant verändernden, globalisierten Welt nicht weiter. Nur eine systemische Sicht macht intelligente und nachhaltige Planung möglich. Das Wissen über komplexe und emergente Systeme kann uns helfen, die zugrundeliegenden Mechanismen zu verstehen und auf diese Weise langfristig zu beeinflussen. Wissenschaftler wie Dr. Fritz Reusswig vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung erforschen beispielsweise, welche Bedingungen erfüllt sein

müssen, damit sich Werte wie Umweltschutz in einer Gesellschaft durchsetzen. Einem solchen gesellschaftlichen Wandel liegen einige wenige, einfache Regeln zugrunde. Erst durch ihr komplexes Zusammenspiel entstehen größere Bewegungen, die nicht mehr einfach zu durchschauen sind.

1. Rolf Pfeifer in: *Das Geheimnis der Intelligenz liegt nicht im Gehirn*. <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/6/6596/1.html>

Literatur und Quellen

(Bücher)

Steven Johnson: *Emergence. The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*. New York (NY): Scribner, 2001.

Erol Sahin, William M. Spears (Hrsg.): *Swarm Robotics*. WS 2004. LNCS 3342. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.

Erol Sahin, William M. Spears, Alan F.T. Winfield (Hrsg.): *Swarm Robotics. Second SAB 2006 international workshop*. LNCS 4433. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.

Philip W. Anderson: *Die wichtigsten Erfindungen der letzten 2000 Jahre*. Berlin: Ullstein, 2000. S.178.

James Kennedy, Russell C. Eberhart: *Swarm Intelligence*. San Francisco: Academic Press, 2001. S.102.

Wolf Lieser: *Digital Art*. Hamburg: Ullmann, 2009.

Valentino Braitenberg: *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1984.

(Wissenschaftliche Veröffentlichungen)

Andre Nathan, Valmir C. Barbosa: *V-like formations in flocks of artificial birds*. In: *Artificial Life*. MIT Press, 2008. Vol. 14, Nr. 2, S.179-188.

Christopher M. Cianci et al.: *Communication in a Swarm of Miniature Robots: The e-Puck as an Educational Tool for Swarm Robotics*. In: Erol Sahin, William M. Spears (Hrsg.): *Swarm Robotics*. WS 2004. LNCS 3342. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. S.103-115.

Sjriek Alers, Jun Hu: *AdMoVeo: A Robotic Platform for Teaching Creative Programming to Designers*. In: *Learning by Playing. Game-based Education System Design and*

Development. LNCS 5670. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. S.410-421.

Ja-Young Sung et al.: „My Roomba is Rambo“. *Intimate Home Appliances*. In: *UbiComp 2007. Ubiquitous Computing*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2007. S.145. Vorschau online unter http://books.google.de/books?id=J-IORLNph_4C&printsec=frontcover&dq=UbiComp+2007#

David Payton, Regina Estkowski, Mike Howard: *Pheromone Robotics and the Logic of Virtual Pheromones*. In: Erol Sahin, William M. Spears (Hrsg.): *Swarm Robotics*. WS 2004, LNCS 3342. Berlin Heidelberg: Springer, 2005. S.45-57.

(Zeitschriftenartikel)

Jürgen Bischoff, *Motoren des Lebens*. GEO Magazin, Ausgabe 07/2009, S.46-61. Text online unter <http://www.geo.de/GEO/technik/61196.html?q=schw%E4rme>

Werner Pluta, *Grips aus dem Gewimmel*. Bild der Wissenschaft, Ausgabe 4/2009, S. 92. http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/index2.php?object_id=31820944

(Webseiten)

(Roboter und Schwarmroboter)
<http://www.symbion.eu>
<http://www.swarmrobot.org>
<http://www.e-puck.org>
<http://www.tweenbots.com/>

(Telepolis)
<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/16/16312/1.html>
<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/13/13715/1.html>
<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/6/6596/1.html>

(Wikipedia)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Superorganismus>

(Version vom 29.05.2009)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Emergenz>

(Version vom 15.09.2009)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Nanobot>

(Version vom 07.09.2009)

<http://de.wikipedia.org/wiki/Selbstorganisation>

(Version vom 04.10.2009)

(sonstige)

<http://www.red3d.com/cwr/booids/>

<http://www.scienceticker.info/2008/01/29/wie-stare-kontakt-halten/>

http://www.wdr.de/tv/quarks/sendungsbeitraege/2007/0410/002_schwarm.jsp

http://www.art-report.com/de/artists/Julius_Popp/2298

<http://www.lego.com/eng/info/default.asp?page=timeline1>

<http://web.media.mit.edu/~mres/>

<http://llk.media.mit.edu/projects.php?id=1942>

<http://www.androidscience.com/theuncannyvalley/proceedings2005/uncannyvalley.html>

<http://www.foxnews.com/story/0,2933,299022,00.html>

(Dokumentationsfilme)

Jakob Kneser, *Schwärme – Die Intelligenz der Massen* (D, 2009). Arte-Dokumentation.

Tobias Mory, *The next social revolution* (D, 2006). Diplomarbeit an der Fachhochschule Potsdam.

(Online-Videos)

Mattias Jacobsson präsentiert die Glowbots auf der SIGGRAPH 2007. <http://www.sics.se/fal/projects/glowbots/media.html>

Robots with a mind of their own. <http://www.youtube.com/watch?v=SkvpEfAPXn4>

(Vorträge)

Prof. Dr. Hans-Dieter Burkhard, Institut für Informatik, HU Berlin in einem Vortrag an der TU Berlin am 05.05.09. Präsentationsmaterial unter <http://files.getdropbox.com/u/563992/RoboCup-Schwarm-kurz.pdf>

Vortrag von Prof. Dr. Ingo Rechenberg (Bionik und Evolutionstechnik) an der TU Berlin am 21.04.09. Präsentationsmaterial unter http://files.getdropbox.com/u/563992/schwarmlabor_bionik.pdf

(sonstige Online-Veröffentlichungen)

Johannes Otto Först: *Schwarmverhalten*. In: Kollegstufe Biologie: Verhaltensbiologie: Angeborene Verhaltensteile. Quelle: <http://digitale-schule-bayern.de/dsdaten/218/23.pdf>

Kathrin Balderer: Braitenberg Vehikel. Universität Zürich, 2000. www.ifi.uzh.ch/groups/lailab/teaching/semi2000/Braitenberg.pdf

Mitchel Resnick, Stephen Ocko: *LEGO/Logo: Learning Through and About Design*. <http://llk.media.mit.edu/papers/ll.html>

Dominik Landwehr: *Das Geheimnis der Intelligenz liegt nicht im Gehirn*. Artikel in Telepolis, 27.01.2000. <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/6/6596/1.html>

Martin Hubert: *Körper im Kopf*. Beitrag im Deutschlandfunk, 20.01.2008. <http://www.dradio.de/df/sendungen/wib/722397/>

Abbildungsverzeichnis

S.6 Quelle: <http://www.flickr.com/photos/mccord/41614967/sizes/o/>

S.10 Abb.: MediaMarkt Alexa Erstürmung. Foto via Flickr von User wiseguy71. Quelle: <http://www.flickr.com/photos/wiseguy71/1371270495/> Lizenz: creative commons

S.14 Matt Britt, Internet Map (2005-2006). Quelle: Wikimedia Commons. Lizenz: creative commons

S.16 oben: Quelle: http://farm1.static.flickr.com/175/448065754_26a91032bb_o.jpg
Mitte: Quelle: http://www.kramliczek.de/wp-content/uploads/2009/05/bkr_3868.jpg
unten: Quelle: <http://www.flickr.com/photos/mcdemou-ra/3081529586/sizes/o/>

S.17 oben links: Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0d/Deutsche-boerse-parkett-ffm001.jpg>
oben rechts: Social Networks. Quelle: http://massistenz.files.wordpress.com/2009/09/social_networks.jpg
unten links: Quelle: Deutscher Wetterdienst. <http://www.dwd.de/>
unten rechts: Quelle: Deutscher Wetterdienst

S.20 Quelle: http://users.ecs.soton.ac.uk/kpz/tmp/robotswarm/ecs_robotSwarm.jpg

S.22 links: http://api.ning.com/files/Ao6IMoaQTLsmvTGO*-kGXMttGFHt-5h9QLKofCKD4k-stUPX*1kIRUMgz5nfZWZX3ndsbUnHTNSADx61mjdJzhiqTFkQO9R9/280999671.jpeg
rechts: i-Swarm Roboter. Quelle: http://ec.europa.eu/information_society/events/ict4ee/2009/docs/files/projects/projects/ProjectBooth_No17_Lampetra_Symbriion/SYMBRION_ISWARM/ROBOT_1.JPG

S.23 oben: e-Puck Schwarm. Quelle: http://asl.epfl.ch/gallery2/v/lepuck/IMG_2318.JPG.html?g2_imageViewsIndex=1
unten: s-Bots. Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/21/Sbot_mobile_robot_passing_gap.jpeg

S.24 Quelle: <http://www.flickr.com/photos/stephenr/2754875756/sizes/o/>

S.26 <http://www.sciencedaily.com/images/2009/03/090327124423-large.jpg>

S.28 oben: Les Arcs 091B, via Flickr. User: Jeffrey Quelle: <http://www.flickr.com/photos/jeoffrey/130042811/>
Lizenz: creative commons.
links: <http://www.flickr.com/photos/ewarwoowar/1343987734/sizes/o/>

Mitte rechts: Getty Images, Quelle: http://images.businessweek.com/ss/08/07/0711_energy_costs/3.htm
rechts unten: „Whale in the sky“ von Gail Johnson via Flickr. Lizenz: Creative Commons. Quelle: <http://www.flickr.com/photos/68259253@N00/2312417148/>

S.32 oben: Quelle: www.flickr.com/photos/berg-radler/2483734627/sizes/o/
unten: Quelle: <http://www.flickr.com/photos/hyperspace/214368780/sizes//http://>

S.33 Grafik nach starfish.ch/Zeichnung/illustrationen/Schwarmverhalten.gif

S.34 Generatives Bild des Künstlers C.E.B. Reas (Ausschnitt). Quelle: http://florica.files.wordpress.com/2009/10/casey_reas.jpg

S.35, S.36, S.37 Aus dem Vortragsmaterial von Prof. Dr. Ingo Rechenberg. Quelle: http://files.getdropbox.com/u/563992/schwamlabor_bionik.pdf

S.38 oben, unten: Julius Popp, *micro.spheres*. Quellen: http://images.artnet.com/artwork_images_424680917_282303_julius-popp.jpg
<http://www.interactivearchitecture.org/wp-content/imagebank/microsphere.jpg>

S.39 C.E.B. Reas, *Process 6 (Image 4)*. Quelle: <http://>

reas.com/liperimage.php?section=bitforms05&work=p6_images2_p&id=0

S.41 Quelle: <http://www.flickr.com/photos/trevino/2547735504/sizes/o/>

S.44 links: *LEGO Mindstorms*. Quellen: <http://www.bachmann-lehrmittel.ch/Lego/Images/NXT6.jpg>
<http://www.bachmann-lehrmittel.ch/Lego/Images/NXT7.jpg>
rechts: *PICO Cricket*. <http://www.picocricket.com/>

S.45 *e-Puck*. Quelle: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:E-puck-mobile-robot-photo.jpg>

S.46 Bettelroboter, aufgenommen auf dem Fusion-Festival 2006. Bildquelle: <http://www.flickr.com/photos/stinkal/181509977/sizes/o/>

S.48 Kacie Kincer, *Tweenbots*. Quelle: <http://www.tweenbots.com>

S.49 Grafik nach: <http://www.androidscience.com/theuncannyvalley/proceedings2005/uncannyvalley.html>

S.50 Norman White, *Helpless Robot*. Bildquelle: http://pan1.fotovista.com/dev/118/00865281/u_00865281.jpg

S.51 oben links: *Germinoid* von Hiroshi Ishiguro. Quelle: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-451016/What-happen-robots-turned-us.html>

oben Mitte: http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2008/10/08/article-1073609-02F11C3D00000578-931_468x352.jpg

oben rechts: <http://www.androidworld.com/RepR1.jpg>

unten links: Staubsaugerroboter *Roomba*. Bildquelle: <http://www.engagingthevirtual.com/images/white/whiteROBOT.jpg>

unten rechts: Grafik: *SZ Wissen*, Juli/August 2008. „Mensch, Maschine!“ S.74. http://www.grip-online.com/content/pdfs/SZ_Wissen_2008_06_07.pdf

S.52 Grafik nach: Fig.5. S.51, David Payton, Regina Estkowski,

Mike Howard: *Pheromone Robotics and the Logic of Virtual Pheromones*. In: Erol Sahin, William M. Spears (Hrsg.): *Swarm Robotics. WS 2004*, LNCS 3342. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.

S.51, S.53 Quelle: <http://www.freewebs.com/pherobot/22802.05.05.jpg>

S.55 *Glowbots*. Bild via Flickr. <http://www.flickr.com/photos/jennylic/1089472580/sizes/o/>

S.56 Quelle: <http://www.flickr.com/photos/dpup/3537301643/sizes/o/>

S.58 Quelle: <http://birg.epfl.ch/page65446.html>

S.59, S.60 Bilder aus Valentino Braitenberg: *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1984.

S.64 Quelle: <http://www.flickr.com/photos/uwekoch/4052827067/sizes/o/>

Alle übrigen Abbildungen: Mey Lean Kronemann.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass die vorliegende Bachelorarbeit von mir selbständig verfasst wurde und ich keine anderen Quellen, Hilfsmittel und Zitate als die angeführten verwendet habe.

Berlin, 20.11.2009

Mey Lean Kronemann