

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

UNDERSTANDING BY DESIGN

SEITE 124 – 133

Daniel Bisig, Rolf Pfeifer

ÜBERSETZUNG: Claudia Kotte
REDAKTION: Nora Kempkens
KORREKTORAT: Sabine Rochlitz

From
EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE
TEACHING, DESIGN, RESEARCH

ISSUED BY the Swiss Federal Office of Culture, Urs Staub
EDITED BY Reto Geiser

Birkhäuser
Basel · Boston · Berlin
2008

ISBN 978-3-7643-8921-5



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Federal Office of Culture FOC

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

UNDERSTANDING BY DESIGN:
DER SYNTHETISCHE INTELLIGENZ-ANSATZ

Daniel Bisig, Rolf Pfeifer

Das Entwerfen und Bauen von Systemen für ausgewählte Fähigkeiten ist eine zentrale Forschungstätigkeit der Künstlichen Intelligenz. Was dieses Vorgehen so reizvoll macht, ist vor allem die Tatsache, dass man am Ende nicht nur ein wirkliches System erhält, sondern auf dem Weg dorthin eine Menge über dessen spezielles Phänomen lernt, zum Beispiel über die spontane Entstehung von Strukturen oder das Phänomen der schnellen Lokomotion. Unser synthetischer Intelligenz-Ansatz unterstützt den Einsatz von Entwurf und Entwicklung als Forschungsmethode. Doch im Gegensatz zur klassischen Ingenieurwissenschaft fördert „Understanding by Design“ eine von unten nach oben verlaufende Kurve des Entwerfens („bottom-up“) und basiert auf „design for emergence“.

„Understanding by design“ – Verstehen durch Entwerfen – ist der Name einer speziellen Forschungsmethodik, die in unterschiedlichen Wissenschaften immer häufiger verwandt wird. Diese Methodik stellt die wichtigste Grundlage der verkörperten Künstlichen Intelligenz dar, wie sie im Lehrbuch *Understanding Intelligence*¹ und der populärereren Publikation *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*² umrissen wird.

Kurz zusammengefasst basiert „understanding by design“ auf der Annahme, dass zumindest einige Naturphänomene am besten durch die Konstruktion von Artefakten zu verstehen sind, die eine Auswahl dieser Eigenschaften verkörpern. Der Prozess, dieses Artefakt zu bauen, und seine anschließende Überprüfung im Experiment resultieren in einer konkreten Form der Konzeptualisierung und in überprüfbaren Hypothesen. Darüber hinaus

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

führt dieser Ansatz zu technischen Innovationen mit allgemeinem Anwendungspotential über das spezielle untersuchte Phänomen hinaus.

Die Methodik des „understanding by design“ kombiniert zwei Typen von Ideen, den synthetischen Ansatz und „design for emergence“. Der synthetische Ansatz bezieht die technische Praxis in die wissenschaftliche Forschung mit ein. Entsprechend wird sich speziellen Phänomenen (wie zum Beispiel das Erkennen eines Gesichts in der Menge oder aber Bewegung und Spazierengehen) unter dem Gesichtspunkt der Umsetzung genähert. Der zweite Ansatz, „design for emergence“, versucht, die Voreingenommenheit des Entwerfenden und die vorwegnehmende Definition der entstehenden Eigenschaften des Artefakts so gering wie möglich zu halten. Dieser Ansatz ist in Technik und Wissenschaft neuartige und ungewöhnlich.

Der Begriff „synthetische Methode“ wurde von dem Psychologen Kenneth Craik eingeführt, um den Prozess des Überprüfens von Verhaltenstheorien durch Maschinenmodelle zu beschreiben.³ Der synthetische Ansatz ist nicht als Ersatz, sondern vielmehr als Ergänzung des traditionellen analytischen Ansatzes gedacht. Die analytischen Wissenschaften sind bestens etabliert und haben das menschliche Wissen und die Kontrolle über die natürliche Welt immens erweitert. Dennoch begann die Wissenschaft ab etwa der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, immer mehr natürlichen Phänomenen Beachtung zu schenken, die sich gegen eine Erklärung hartnäckig zu sperren scheinen.

Heute ist klar, dass diese Phänomene einige wesentliche Eigenschaften teilen, die sich größtenteils einem analytischen Ansatz entziehen. Sie beruhen üblicherweise auf einer großen Zahl von Komponenten, die parallel handeln und untereinander sowie mit ihrer Umwelt auf eine Weise interagieren, die durch nicht-lineare mathematische Beziehungen beschrieben werden muss. Außerdem ist uns bewusst geworden, dass diese Phänomene keine Anomalien oder Ausnahmen darstellen, sondern dass sie die große Mehrheit an Systemen ausmachen. Beispiele finden sich reichlich in der rein materiellen Welt (zum Beispiel das Klima, die Entstehung von Sternen und Schneeflocken), in biologischen Organismen und Gesellschaften (Gehirne, Gensteuerung, Körperbewegung, Schwarmverhalten, die Ausbreitung von Krankheiten), sowie in von Menschen geschaffenen sozialen, technischen und sozio-technischen Systemen (zelluläre Automaten wie etwa Conways „Game of Life“, das Internet, die Börse, Städte, Modetrends). Diese Phänomene sind das Ergebnis der einzelnen Eigenschaften ihrer Komponenten (der Neuronen, der „Zellen“ in einem zellulären Automaten oder der Anhänger eines Modetrends), und der komple-

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

nen Interaktionsmuster unter diesen Bestandteilen. Indem man Artefakte in umgekehrter Richtung – von ihren Bestandteilen über Hartstoffkomponents bis hin zum Gesamtsystem – baut, können die synthetischen Wissenschaften die Eigenschaften eines ganzen Systems untersuchen. Sie können so erforschen, wie diese Eigenschaften von den Wechselbeziehungen und Verhaltensweisen der Systemkomponenten abhängen.

Der „design for emergence“-Ansatz ist sogar noch stärker auf die Beziehung zwischen Eigenschaften eines Systems auf hohen und denen auf niedrigen Ebenen fokussiert, als dies bei der synthetischen Methode der Fall ist. Emergenz tritt in unterschiedlichen Gestalten auf.⁴

[a] Das Verhalten eines Individuums ist insofern immer emergent, als es das Ergebnis einer Interaktion des Individuums mit der realen Welt ist. Entsprechend kann Verhalten nicht komplett durch einen internen Kontrollmechanismus bestimmt werden, sondern hängt auch von morphologischen, materiellen und Umweltbedingungen ab.

[b] Es heißt, ein Organismus (oder ein Artefakt im technischen Bereich) gehe aus einem Evolutionsprozess hervor. Wenn dieser Prozess nach Prinzipien der natürlichen Evolution abläuft, dann sind alle Fähigkeiten des Organismus emergente Eigenschaften eines Prozesses, der nur durch den reproduktiven Erfolg des Organismus angetrieben wird.

[c] Eine Sammlung von Teilen oder eine Population von Agenten kann auf der Basis von lokalen Interaktionsregeln Emergenz aufweisen. Zum Beispiel fügen sich Proteine zur Architektur eines Virenkörpers zusammen; eine Gruppe Vögel organisiert sich selbst innerhalb eines Schwarms. Das Gesamtverhalten solcher Systeme ist nicht die Summe der einzelnen Verhaltensweisen seiner Komponenten – es ist sowohl quantitativ als auch qualitativ gänzlich anders. Zum Beispiel können Insektengesellschaften hoch entwickelte Schwarmstrukturen zeigen, obwohl jedes einzelne Insekt nur beschränkte kognitive Fähigkeiten besitzt. Dass das menschliche Gehirn Bewusstsein aufweist, ist ein weiteres bemerkenswertes Beispiel. Diese Fähigkeit ist offenbar nicht in den einzelnen Neuronen des Gehirns vorhanden.

Es ist unmöglich, eine analytische Kausalität zwischen den lokalen und globalen Eigenschaften eines emergenten Systems zu definieren, da sich diese gegenseitig bedingen: Globalstruktur und Globalverhalten sind das Ergebnis der Interaktion der einzelnen Komponenten, welche ihrerseits wiederum von globalen Verhaltensmustern beeinflusst werden. Es scheint, dass viele der bemerkenswerten Fähigkeiten von natürlichen Systemen wie ihre

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

Adaptionsfähigkeit, ihre Robustheit und Fähigkeit zur Selbstreparatur und Reproduktion das Ergebnis von emergenten Prozessen sind. Die Implikationen dieser Erkenntnisse für Wissenschaft und Technik können gar nicht hoch genug bewertet werden. Um die Prinzipien von lebenden und intelligenten Systemen erforschen zu können, muss die Wissenschaft ihren Schwerpunkt (zumindest teilweise) weg von der Ebene, auf der sich diese Phänomene manifestieren – dem globalem Verhaltensmuster – hin zu den unteren Ebenen (das heißt zu den materiellen und morphologischen Eigenschaften und physikalischen Prinzipien) verlagern, auch wenn diese auf den ersten Blick nichts mit der Kernfrage zu tun zu haben scheinen.

Da sich die analytische Behandlung emergenter Phänomene als sehr schwierig herausgestellt hat, haben Wissenschaftler eine empirische Position einnehmen müssen, die auf Beobachtung, Experimentieren und Ausprobieren beruht. Das bedeutet, dass zum Verständnis davon, wie Änderungen in einem emergenten System das Verhalten dieses Systems beeinflussen, Versuchsaufbauten und Szenarios entworfen werden müssen, in denen sich das System im Laufe der Zeit entwickeln kann. Nur innerhalb einer solchen Anordnung kann der Wissenschaftler Hypothesen darüber testen, wovon das Systemverhalten abhängt. Zum Beispiel kann getestet werden, wie die Gestalt eines Schwarms oder einer Herde von den sensorischen Fähigkeiten der einzelnen Agenten abhängt. Oder aber man kann untersuchen, wie sich die Qualität und Vielfalt von evolutionären Anpassungen als Reaktion auf verschiedene Grade an Selektionsdruck verändern. Für diesen Typ von Experiment ist ein Ansatz im Sinne von „trial and error“ gerechtfertigt, da viele dieser Beziehungen nicht vorhergesagt werden können, sondern man zufällig auf sie stößt. Das einfache Ausprobieren kann als Strategie dienlich sein, um ein breites Spektrum potentieller Wechselbeziehungen zu testen. Darüber hinaus trägt dieses Vorgehen zur Überwindung von vorgefassten Meinungen und Voreingenommenheit auf Seiten des Wissenschaftlers bei.

Im Hinblick auf die Technik liegt es auf der Hand, dass viele der oben erwähnten Fähigkeiten natürlicher Systeme wie Autonomie, Robustheit und die Fähigkeit, mit unerwarteten Situationen umzugehen, auch für künstliche Systeme wünschenswert wären (zum Beispiel für Roboter, die mit Menschen interagieren, oder Fahrzeuge zur Erkundung des Extraterrestrischem). Aufgrund der Emergenz-Prinzipien ist es ganz offensichtlich schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, derartige Artefakte mit Hilfe der klassischen Methoden der Ingenieurwissenschaften zu entwerfen (das heißt, indem man von oben

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

nach unten, von vorab festgelegten Anforderungen auf den höchsten Ebenen zu Umsetzungsdetails auf den unteren Ebenen vorgeht). Außerdem ist die Kompetenz und Intuition eines Ingenieurs womöglich nur begrenzt nützlich – oder erweist sich sogar als Hürde –, um die gewünschten Artefakteigenschaften zu erzielen. Zum Beispiel funktionieren Methoden der klassischen Steuerungstechnik nicht gut, wenn sie auf den Bau von Robotern angewendet werden, die mit der realen Welt zu tun haben – dabei sind genau die gleichen Methoden in hochgradig kontrollierten industriellen Umgebungen äußerst erfolgreich. Hinzu kommt, dass sich die reale Welt dynamisch wandelt und nur teilweise vorhersehbar ist, und die Agenten müssen trotz dieser Unsicherheit in ihr agieren. Aus diesem Grund versucht der „design for emergence“-Ansatz, die Voreingenommenheit und vorgefassten Meinungen des menschlichen Entwerfers auf ein Minimum zu reduzieren. Wie nützlich diese Herangehensweise ist und welches innovatives Potential sie besitzt, ist bereits bewiesen worden. Durch Anwendung von Entwurfsprinzipien abgeleitet aus der Biologie und durch das Nutzen von Ideen aus der natürlichen Evolution sind mit minimalem menschlichem Eingriff Artefakte entstanden, die die Fähigkeiten ihrer von Menschen entworfenen Gegenstücke übertreffen.⁵

Wenn ein Wissenschaftler Systeme im Kontext der synthetischen Methodik entwirft, muss er sich gewöhnlich zwischen einer simulationsbasierten oder einer roboterbasierten Umsetzung entscheiden. Da ein rein simulationsbasierter Ansatz zumeist geringeren Kosten- und Zeitaufwand bedeutet, mag es schwierig erscheinen, die Entwicklung von Robotern zu rechtfertigen. Allerdings hängt das Verhalten als emergentes Phänomen entscheidend von physikalisch realistischen Agent-Umwelt-Interaktionen ab. Es ist sehr schwierig, physikalisch realistisches Verhalten in Simulationen zu erzielen. Die unendliche Fülle der realen Welt ist die Hauptantriebskraft hinter den vielfältigen Morphologien und Verhaltensweisen, die wir in biologischen Organismen erleben, und eine Simulation besitzt nur solche Eigenschaften, die man ihr bewusst und absichtlich zugefügt hat. Daher wird jedes simulationsbasierte Experiment durch das Fehlen von Eigenschaften, die nicht implementiert wurden und die sich womöglich als entscheidend für die Manifestation eines emergenten Phänomens herausstellen, erschwert. Nichtsdestoweniger bleiben Simulationen selbstverständlich ein unentbehrliches Werkzeug wissenschaftlicher Forschung. Experimente mit zahlreichen aufeinander einwirkenden Agenten können gewöhnlich nur in Simulationen durchgeführt werden. Dasselbe gilt für Evolutionsabläufe, die Koadaptationen von Morphologie und

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

Kontrolle mit sich bringen. Aus diesem Grund ergänzen sich das roboter- und das simulationsbasierte Experimentieren, und beide werden die zwei Hauptmethoden der synthetischen Methodik bleiben.

Schließlich sollte man beachten, dass das Vermischen von Methoden aus Wissenschaft und Technik die Aussagekraft der Wissenschaften erheblich erweitert hat. Traditionell haben sich die Naturwissenschaften mit der Erforschung von natürlich existierenden Systemen beschäftigt, während die synthetischen Wissenschaften, die aus dem „understanding by design“-Ansatz Kapital schlagen, den Schwerpunkt ihrer Untersuchungen ausgeweitet haben. Diese synthetischen Wissenschaften entwickeln Artefakte als Teil ihres Forschungsprozesses nicht mehr, um natürliche Systeme zu imitieren. Ganz im Gegenteil: Viele der resultierenden Roboter und Simulationen stellen gar keine in der Natur existierenden Organismen dar. Die synthetischen Wissenschaften beschränken sich nicht länger auf die Erforschung natürlicher Systeme. Um mit Christopher Langton, einem der Gründungsväter auf dem Gebiet künstlichen Lebens, zu sprechen, könnte man sagen, dass diese Wissenschaften nicht nur „Leben, wie es ist“, sondern auch „Leben, wie es sein könnte“ untersuchen. Entsprechend ermöglicht der „understanding by design“-Ansatz Wissenschaftlern ein tieferes Verständnis der fundamentalen Aspekte von Leben und Intelligenz, als wenn sie sich in ihrer Forschung allein auf natürliche Systeme konzentrieren würden. „Understanding by design“ hat die Bestrebungen der Naturwissenschaft und Technik in einem Projekt vereint, und dieses Projekt möchte die bloße Bedeutung dessen, was es heißt, lebendig und intelligent zu sein, erklären. Es überschreitet somit die Grenze zur Philosophie.

PROJEKTE

Die Darlegung der folgenden Projekte soll die Anwendung der „understanding by design“-Methode im Kontext der verkörperten Intelligenz konkret machen. Die Beispiele wurden ausgewählt, um die Bedeutung dieser Vorgehensweise für ein breites Spektrum an Projekten und Tätigkeiten hervorzuheben.

ROBOTERHAND

Das Projekt Roboterhand wurde eingesetzt, um die Beziehung zwischen Morphologie, intrinsischer Körperdynamik, der Erzeugung von Informationsstruktur durch sensomotorische Koordination und Lernen zu untersuchen.⁶

Die so genannte Yokoi-Hand besteht zum Teil aus elastischen, flexiblen und verformbaren Materialien. Ihre Betätigung basiert auf einem Muskel-

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

Sehne-System, das von der Anatomie der natürlichen menschlichen Hand inspiriert wurde. Darüber hinaus imitiert die Roboterhand einige der sensorischen Fähigkeiten ihres biologischen Originals. Jeder Finger ist mit Sensoren ausgestattet, um Krümmungen, Rotation und Druck messen zu können. Zusätzliche Drucksensoren befinden sich in der Handfläche und auf dem Handrücken. Um die Roboterhand steuern zu können, wurden durch die Biologie angeregte Lernmechanismen eingesetzt. Sie erlauben es der Hand, ihre eigene Bewegungsfähigkeit zu erforschen. Durch Korrelation des sensorischen Inputs der Hand mit den Outputs des Motors kann die Hand sogar lernen, Objekte zu manipulieren sowie zu greifen. Der ursprüngliche Forschungsschwerpunkt des Projekts Roboterhand wurde erweitert. Momentan wird an der Anwendung des Artefakts als Prothese gearbeitet. Für Prothesen ist wichtig, dass sich die Anwendung der Hand natürlich „anfühlt“. Zum Greifen muss eine Informationsstruktur eingeführt werden, die vielfältiges sensorisches Feedback voraussetzt. Experimente mit fMRI zeigen, dass Patienten, die mit nur minimalem, aber korreliertem sensorischem Feedback ausgestattet wurden (wie etwa elektrische Stimulation der Haut oder mechanische Vibration) ihre Prothese sehr viel schneller in ihr Körperschema integrieren.⁷ Dieses Projekt veranschaulicht, dass die synthetische Methodik und die Begriffe Morphologie und Selbstorganisation von Informationen für funktionierende Systeme dienlich sind und dass sie Hinweise darauf geben können, wie die sensomotorische „Intelligenz“ eines kombinierten Mensch-Maschine-Systems verbessert werden kann.

SELBSTASSEMBLIERUNG BEI ROBOTERN

Ziel dieses Projekts ist die Selbstassemblierung und Selbstreparatur in einem selbstorganisierten Robotersystem, das aus vielen Komponenten besteht.⁸ Selbstassemblierung ist ein Prozess, durch den eine organisierte Struktur sich spontan aus einfachen Teilen bildet. Obwohl dieser entscheidende Prozess in der Natur omnipräsent ist, weiß man wenig über die ihm zugrundeliegenden Mechanismen, und hat sich bislang nur wenig bemüht, Entwurfsprinzipien auf höherer Ebene zu abstrahieren. Inspiriert von Beispielen von Selbstassemblierung aus der Biologie haben wir eine Reihe von modularen Robotersystemen entworfen und gebaut. Diese bestehen aus zentimeterdicken selbständigen Plastikfliesen, die zur Aggregation auf Wasseroberflächen fähig sind. Ein einziges Modul, auch „Tribolon“ genannt, besteht im Wesentlichen aus einer Schaumgummigestalt und einem kleinen Vibrator. Strom erhält der

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

Schwingungserzeuger über eine Antenne, die eine Aluminiumdecke berührt, welche wiederum mit einer Stromquelle verbunden ist. An den Modulen befestigte Magneten sorgen dafür, dass sich die Teile anziehen oder abstoßen. Die Vibration bringt die Module dazu, sich zu bewegen, und je nach Gestalt der Module entstehen unterschiedliche Verhaltensweisen wie Clusterbildung und Rotation. Unter Bezug auf unsere heutige Erfahrung im Entwerfen, Bauen und Steuern von makroskopischen Modularsystemen hoffen wir, dass wir Schlussfolgerungen über den Grad an Autonomie ziehen können, der für Selbstassemblierung notwendig ist. Unser synthetischer Ansatz folgt dem biologischen Prinzip, dass sich Komponenten zu Organismen von unten nach oben selbst aufbauen.

ROBOTERTECHNIK IM UNTERRICHT

Das DREAM-Projekt (Development of a Robot kit for Education, Art, and More – Entwicklung eines Roboter-Baukastens für Bildung, Kunst und mehr) will einen Roboter-Baukasten aus Hardware, Software und pädagogischen Materialien zu Unterrichtszwecken entwickeln. Er soll dazu beitragen, Menschen innerhalb und außerhalb der AI-Kreise konzeptuelle und methodologische Prinzipien der verkörperten künstlichen Intelligenz nahezubringen. Das Set soll kreative und integrative Ansätze durch einen „konstruktionistischen“ Bildungsansatz⁹ fördern, bei dem Schüler und Studierende beim Entwickeln und Bauen von Artefakten lernen.

Das DREAM-Projekt baut auf den zahlreichen Bildungsaktivitäten des AI Lab auf. Wir nehmen zum Beispiel am Roberta-Netzwerk teil, das sich auf die Entwicklung eines Roboter-Bildungsprogramms richtet, welches insbesondere auf die Interessen von Mädchen zielt.¹⁰ AI Lab unterrichtet auch Kurse als Teil des bugnplay.ch Kunst-, Medien- und Technologie-Wettbewerbs, der von Migros Kulturprozent organisiert wird und sich an Jugendliche im Alter von 11 bis 20 Jahren wendet. Diese Aktivitäten beruhen auf unserer Überzeugung, dass die Konzepte der verkörperten KI-Forschung nicht nur für die Wissenschaft innerhalb dieses spezifischen Bereichs relevant sind, sondern dass sie weitreichende Implikationen für die wissenschaftliche Forschung und Technik im Allgemeinen haben. Außerdem haben wir beobachtet, dass sich die synthetische Methode sehr gut für den Unterrichtskontext eignet, denn sie trägt zu einer anhaltend hohen Motivation der Studierenden bei; auch kann sie selbst sehr abstrakte Konzepte auf verständliche und greifbare Weise kommunizieren.¹¹ Im Gegensatz zu bestehenden Roboter-Kits zu Unterrichts-

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

zwecken will der DREAM-Bausatz Prinzipien und Methoden aus der verkörpertten KI-Forschung vermitteln, die für den „understanding by design“-Ansatz zentral sind. Daher betont das Kit den technischen Bau von unten nach oben („bottom-up“) sowie „design for emergence“. Wir glauben, dass diese Konzepte zur Suche nach neuen Strategien zur Problemlösung anregen und dass sie nützlich und inspirierend für all jene sind, die sich mit den komplexen Problemlösung und Entscheidungsfindung in unserer äußerst dynamischen, komplexen und nur teilweise vorhersehbaren Welt beschäftigen.

ROBOTER-KUNSTINSTALLATION

Das Projekt HairMotion ist ein laufendes Kooperationsprojekt zwischen einem der Autoren und der Künstlerin Valerie Bugmann. Ziel des Projekts ist es, eine interaktive Installation zu realisieren, die als experimentelles Umfeld für nonverbale Kommunikation dienen kann. Die Roboter sind stationär, und ihr einziges Ausdrucksmittel sind die Atembewegungen ihrer künstlichen Lungen und ihr pneumatisch bewegtes Haar. In einem Kreis aufgestellt und mit Blick in die Kreismitte, die Besucher betreten können, sind die Roboter in der Lage, die Anwesenheit und die Bewegungen von Besuchern in diesem Innenraum über ein optisches Nachverfolgungssystem wahrzunehmen. Der Grad an Autonomie und Reaktionsfähigkeit der Roboter ändert sich, und entsprechend gehen die Bewegungen der Besucher und die der Roboter in Phasen von Synchronisation, Korrelation und Unabhängigkeit über. Dieses Szenario animiert die Besucher, mit den Robotern in einen Dialog der Bewegungen zu treten, um wiederkehrende Interaktionselemente zu ermitteln. Die Installation schafft somit einen Experimentierraum, der Besuchern erlaubt, syntaktische und semantische Elemente einer bewegungsbasierten, nichtverbalen Sprache zu kreieren und zu überprüfen.

EXPLORATIONS IN ARCHITECTURE

DIDACTICS

-
- 1 Rolf Pfeifer und Christian Scheier, *Understanding Intelligence*, MIT Press, Cambridge, Mass. 1999.
 - 2 Rolf Pfeifer und Josh Bongard, *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*, MIT Press, Cambridge, Mass. 2007.
 - 3 Kenneth J. W. Craik, *The Nature of Explanation*, Cambridge University Press, Cambridge 1943.
 - 4 Pfeifer und Bongard, a. a. O.
 - 5 John R. Koza, Martin A. Keane, Jessen Yu, „Automatic Creation of Human-Competitive Programs and Controllers by Means of Genetic Programming“, in: *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 1, 2000, S. 121–164.
 - 6 Gabriel Gómez, *Adaptive Learning Mechanisms for Autonomous Robots*, PhD Dissertation, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Zürich, 2007. Gabriel Gómez, Alejandro Hernandez-Arieta und Peter Eggenberger Hotz, „An Adaptive Neural Controller for a Tendon Driven Robotic Hand“, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, IOS Press, Tokio 2006, S. 298–307. Gabriel Gómez, Max Lungarella und Danesh Tarapore, „Information-Theoretic Approach to Embodied Category Learning“, in: *Proceedings of the 10th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, Beppu, Japan 2005, S. 332–337.
 - 7 Alejandro Hernandez-Arieta, Konstantinos Dermitzakis, Dana Damian, Max Lungarella und Rolf Pfeifer, „Sensory-motor Coupling in Rehabilitation“, in: *Handbook of Service Robotics*, I-Tech Education and Publishing, Wien 2008.
 - 8 Shuhei Miyashita, Maik Hadorn und Peter Eggenberger Hotz, „Self-Assemble of Water Floating Active Units“, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics*, 2007. Shuhei Myashita, Marco Kessler und Max Lungarella, „How Morphology Affects Self-Assembly in a Stochastic Modular Robot“, in: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2008, S. 3533–3538.
 - 9 Mitchel Resnick, „Distributed Constructionism“, in: *Proceedings of the 1996 International Conference of the Learning Sciences*, Evanston Il 1996, S. 280–284.
 - 10 Ulrike Petersen, Monika Müllerburg und Gabi Theidig, „Girls and Robots: A Promising Alliance“, in: *ERCIM News* 53, April 2003.
 - 11 Ana Paul, Verena Hafner, Josh Bongard, *Teaching New Artificial Intelligence Using Constructionist Edutainment Robots*, Workshop on Edutainment Robots, Sankt Augustin, 2000. Monika Müllerburg, Ulrike Petersen, Gabi Theidig, „Roboter in Bildung und Ausbildung“, in: Marie Calm (Hg.), *FiNUT – 28. Kongress von Frauen in Naturwissenschaft und Technik*, FiT-Verlag, Darmstadt 2002.