

# **Lernen von und mit Robotern oder „Nicht alles ist digital“**

**Rolf Pfeifer - Notizen zu: GDI-Tagung, 29. September 1999**

## **Abstract**

Auch heute noch ist die Ansicht weit verbreitet, dass Intelligenz die abstrakte Fähigkeit zum Denken sei, die sich durch Computerprogramme und abstrakte Symbolmanipulation beschreiben und nachbilden liesse. Aus diesem Grund war bis in die 80er Jahre der digitale Computer das Hauptwerkzeug der Forscher im Bereich der künstlichen Intelligenz. Als man begann, Roboter zu entwickeln, wurde jedoch bald offenbar, dass die wirklich harten Probleme der Intelligenz in der Wahrnehmung und im Handeln bestehen, während abstrakte Fähigkeiten wie Schachspielen oder das Ziehen von logischen Schlüssen vergleichsweise einfach zu modellieren sind. Mit der Zeit reifte die Erkenntnis, dass sich Intelligenz nicht isoliert, sondern nur in der Interaktion mit der Umwelt begreifen lässt, mit anderen Worten, dass Intelligenz einen Körper benötigt — eine Einsicht, für die der Begriff „Embodiment“ geprägt wurde. Es stellt sich heraus, dass unter Berücksichtigung dieses Prinzips für viele Aufgaben wesentlich einfachere Lösungen gefunden werden können. Die Verwendung von Robotern führt nicht nur zu einem völlig neuen Verständnis von Intelligenz, sondern es können dadurch auch allgemeine Einsichten in die Interaktion autonomer Systeme mit der Umwelt gewonnen werden. Dies wird in Zusammenhang mit dem rasant wachsenden Markt der sog. Embedded Systems, d.h. Systemen, die direkt über eigene Sensoren und Effektoren mit der Umwelt interagieren (z.B. Mobilkommunikation, Kameras, Autos, Unterhaltungselektronik, „intelligente“ Räume und Häuser, Sicherheitssysteme) immer grössere Bedeutung erlangen, was eine frühzeitige Auseinandersetzung mit dieser neuartigen Denkweise in der schulischen Ausbildung wünschenswert macht. Wir sind überzeugt, dass Roboter die Ausbildung am Computer optimal ergänzen und haben deshalb — zusammen mit Henrik Lund vom Lego-Forschungslabor in Dänemark und der Firma Lego — auf europäischer Ebene eine Initiative gestartet, Roboter bereits in den Schulen zusätzlich zum Internet-basierten Unterricht zu verwenden. Die Ideen werden anhand von verschiedenen Fallstudien illustriert.

## **Die Bedeutung der Morphologie für Intelligenz**

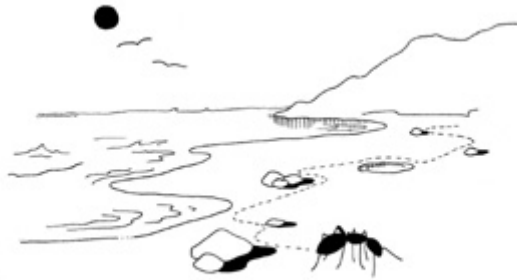
Ein anhaltender Megahype geht um die Welt: Das Internet. Schüler, Rentner, Manager, Hausfrauen, Forscher, Professoren, Sachbearbeiter, Journalisten, Landwirte und Künstler surfen im Netz. Man holt sich alles und jedes vom Netz runter. Für jeden Lebensbereich kann man sich bedienen: Wechselkurse, medizinische Beratung, Reisevorbereitung, Einkaufen, Computerprogramme und Utilities jeder Art, Eigenheimsuche, Banktransaktionen, Computergames, vegetarische Rezepte, Wetterprognose, einfach alles. Und alles kommt auf den Bildschirm. Digital ist wundervoll! Alle sind begeistert, inklusive ich selbst, mit Ausnahme vielleicht einiger besorgter Eltern, Pädagogen oder sonstiger Hinterwäldler, die davor warnen, dass dies möglicherweise auf die Entwicklung der Kinder nicht ausschliesslich positive Auswirkungen haben könnte. (Zu dieser komplexen Frage werde ich in diesem Artikel nicht Stellung beziehen.)

Im Zusammenhang mit dem Internet ist auch die Idee der intelligenten autonomen „Agents“ aufgekommen. Agents sind im wesentlichen Computerprogramme, die für einen Benutzer eine bestimmte Aufgabe erledigen, wie etwas die Vereinbarung eines Meetings mit mehreren Leuten, die Reservation eines Flugtickets, oder das Auffinden einer bestimmten Information. Die Erfahrung mit diesen Agents hat allerdings gezeigt, dass deren Verhalten sehr oft nicht den Bedürfnissen eines Benutzers entspricht. Ein Grund — unter vielen — könnte sein, dass sich diese Agents in einer digitalen Welt befinden und selbst auch rein digital sind, während sich jegliche Form natürlicher Intelligenz nicht in einer digitalen, sondern einer realen, physikalischen Welt bewegt. So hat sich auch den letzten Jahren — allerdings nur langsam — die Einsicht durchgesetzt, dass Intelligenz nicht nur eine Sache des Gehirns ist; Verhalten kann nicht angemessen verstanden werden, wenn man nur das Gehirn studiert. Man muss das sog. Embodiment als zentrale Komponente mit berücksichtigen, also die Tatsache, dass sich intelligente Systeme in einer realen, physikalischen und sozialen Welt zurechtfinden müssen und deshalb einen Körper brauchen, den sie zu ihrem Nutzen einsetzen müssen. Es stellt sich heraus, dass die Morphologie, also die spezifische Form des Körpers, der Sensororgane, deren Positionierung (Augen vorne auf der Seite, hinten, oder vielleicht rund herum, wie bei den Insekten), zentral mitbestimmen was das Gehirn für eine Verarbeitung vornehmen muss und wie erfolgreich diese ist. Will man also das Verhalten natürlich intelligenter Agents verstehen, muss man sich mit Embodiment, Morphologie, und auch mit Physik befassen. Die Fokussierung in der Intelligenzforschung auf das Gehirn und auf abstrakte Symbolmanipulation, also auf die Programmierung, stellt sich als grosse Einschränkung heraus. Wenn man die Funktion des neuronalen Substrats verstehen will, muss man verstehen, wie dieses Substrat an den Organismus gekoppelt ist, sonst kann man die Bedeutung der neuronalen Signale nicht ausmachen. Diese sich relativ abstrakt anhörenden Ideen sollen anhand einiger Beispiele erläutert werden.

## **Simon's ant on the beach**

Figur 1 zeigt eine Ameise am Strand. Sie befindet sich auf dem Weg zurück zum Nest. Da es viele Steinchen, Pfützen, und sonstige Hindernisse hat, beschreibt sie einen komplizierten Zickackpfad. Ein erster Punkt ist, dass man aufgrund der Komplexität des zurückgelegten Pfades nicht auf die Komplexität des neuronalen Mechanismus schliessen kann. Es könnte sein, dass das Gehirn einfache Verhaltensregeln implementiert, die man beschreiben könnte als: Wenn Sensorstimulation (ein Hindernis) links, dann nach rechts drehen (und

umgekehrt). Wenn also die Ameise nach dieser Regel handelt, ist ihr Verhalten durch die Interaktion mit der Umwelt determiniert. Diese Interaktion — und das ist der zweite Punkt — wird durch das Embodiment vermittelt, d.h. dass das Verhalten stark vom Embodiment abhängt. Nehmen wir einmal an — auch wenn das biologisch unrealistisch ist — dass sich die Ameise vergrößert, sagen wir einmal um einen Faktor 1000. Wenn die Riesenameise jetzt am selben Ort startet wie die normale, wird sie vermutlich einen viel geradlinigeren Weg beschreiben. Dies bedeutet, dass sich ihr Verhalten stark ändert, obwohl das Programm, implementiert in den neuronalen Schaltkreisen ihres Gehirns, genau dasselbe ist wie vorher. Die Kenntnis des Programmes alleine genügt also nicht um das Verhalten zu verstehen: Wir müssen zusätzlich wissen, wie das neuronale Substrat in den Organismus eingebettet ist.

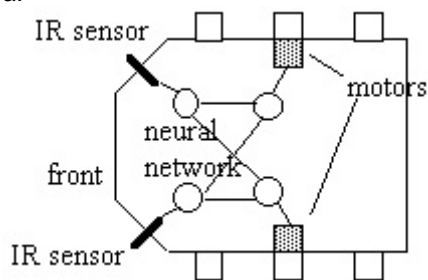


Figur 1: Simon's ant on the beach.

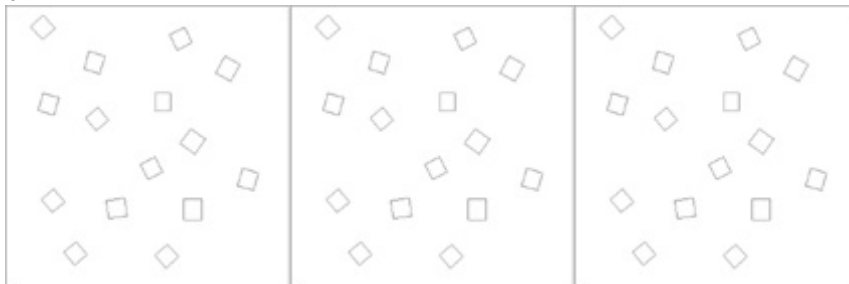
### Die Didabots räumen auf

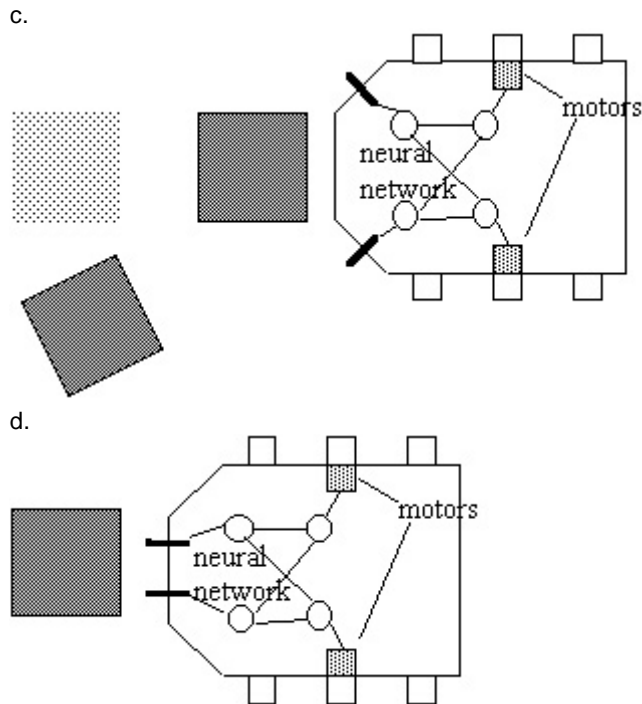
Die Didabots sind einfache mit Infrarotsensoren ausgerüstete Roboter (Figur 2a). Sie werden durch ein einfaches neuronales Netz gesteuert, das die folgende Regel zur Kollisionsvermeidung implementiert: Sensorstimulation links, nach rechts drehen, Sensorstimulation rechts, nach links drehen. Setzt man ein paar Roboter in eine Arena mit Styroporwürfeln, so werden nach einiger Zeit Cluster entstehen und einige Würfel verteilen sich längs den Wänden (Figure 2b). Der Grund ist aus Figur 2c ersichtlich. Normalerweise vermeiden die Robot einfach die Hindernisse (Würfel, Wände, andere Roboter). Wenn Sie zufälligerweise frontal auf einen Würfel stossen, so schieben Sie diesen Würfel vor sich her. Es ist also nicht so, dass sie einen Würfel suchen und ihn dann gezielt schieben, sondern sie schieben den Würfel, weil sie ihn — sozusagen — nicht „sehen.“ Den Würfel schieben sie soweit bis auf einer Seite ein anderer Würfel auftaucht, der dann Sensorstimulation liefert, so dass sich der Roboter wegdreht. Nun sind bereits zwei Würfel beisammen und die Wahrscheinlichkeit, dass noch einer in der Nähe deponiert wird, ist somit grösser, bis mit der Zeit ganze Cluster entstehen. Wenn nun die Position der Infrarotsensoren geändert wird wie in Figur 2d gezeigt, so ändert sich das Verhalten vollständig: Die Roboter bilden keine Cluster mehr.

a.



b.





Figur 2: Illustration der gegenseitigen Abhängigkeit von Morphologie und Steuerung. Die Figur zeigt, wie einfache Roboter Cluster bilden können. (a) Didabot mit zwei Sensoren und einem einfachen neuronalen Netz, welches einen Ausweichreflex implementiert. (b) Der Clustering Prozess (Gesamtdauer ca. 20 Minuten). (c) Erläuterung der Clusterbildung. (d) Didabot mit geänderten Sensorpositionen. Dies führt zu einem vollständig unterschiedlichen Verhalten: Clusterbildung findet nicht mehr statt.

Dieses Beispiel zeigt die Starke Abhängigkeit von Verhalten, Morphologie, und Umwelt (z.B. Blockgrösse). Obwohl in diesem Beispiel offensichtlich, ist es um so erstaunlicher, dass diese Idee normalerweise nicht explizit in Betracht gezogen wird beim Design von Robotern. Natürlich kann man Roboter für Clustering auch auf ganz andere Art und Weise bauen, mit komplexen Kameras: Die Roboter würden dann die Würfel suchen, wenn sie einen gefunden haben, einen nahegelegenen Cluster suchen und den Würfel da hinschieben. Dies scheint eine natürliche Lösung zu sein, aber sie verlangt anspruchsvolle visuelle Verarbeitung und stellt eine sehr teure Lösung dar. Die Variante mit den Didabots ist im Gegensatz dazu billig, weil sie die spezifischen Eigenschaften der aktuellen Situation, der ökologischen Nische, ausnützt und ein wesentlicher Teil der Arbeit von der Morphologie übernommen wird. Diese Lösung funktioniert jedoch nicht mehr, wenn sich die Geometrie der Umgebung, z.B. die Grösse der Würfel ändert, oder die Arena nicht mehr geschlossen ist. Die Morphologie ist nicht eine digitale Grösse: Der Körper, die reale Welt sind alle nicht digital. Die Fokussierung auf die digitale interne Verarbeitung führt dazu, dass man die Interaktion mit der — nicht-digitalen — realen Welt vernachlässigt, was zur Folge hat, dass man die Funktionsweise der Systeme nicht mehr versteht. Morphologie, Form, ist ebenfalls keine digitale Eigenschaft.

Man kann also folgern, dass man die Funktionsweise des neuronalen Netzes nur verstehen kann, wenn man weiss, wie es in den Roboter eingebettet ist, wo die Sensoren positioniert sind und was die Sensoren für physikalische Eigenschaften haben. Ändert sich die Position der Sensoren, also die Morphologie, so ändert sich auch das Verhalten. Übertragen auf natürliche Systeme — Tiere, Menschen — bedeutet dies, dass man die Funktion des Gehirns nur verstehen kann, wenn man seine Einbettung in den gesamten Organismus mit einbezieht. Das Studium des neuronalen Substrats alleine ist nicht genügend.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei diesem Clustering-Verhalten um einen Vorgang der Selbstorganisation handelt: Das Clustering ergibt sich aus der Interaktion der Roboter mit ihrer Umwelt — Clustering ist nirgends in Form eines Programmes in den Robotern repräsentiert. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Emergenz: Das Clustering-Verhalten in diesem Fall ist emergent. In der oben beschriebenen Implementation mit der Videokamera wäre Clustering nicht emergent, da es vorprogrammiert ist.

An diesem Beispiel sieht man, dass es — gegeben eine bestimmte Umgebung und bestimmte Aufgaben — eine Art Balance gibt zwischen der Morphologie und der neuronalen Verarbeitung: Hat man die richtige Morphologie, ist die Verarbeitung, das Programm, u.U. viel einfacher. Bei einer Fokussierung auf das Programm wird die Lösung in der Regel viel zu kompliziert.

### Evolution der Morphologie eines Insektenauges auf einem Roboter

Explorieren wir die Idee der Balance zwischen Morphologie und neuronalem Substrat noch etwas weiter anhand von Insektenaugen. Insektenaugen haben die Eigenschaft, dass die einzelnen Fazetten nicht homogen über das Auge verteilt, sondern dass sie vorne dichter als auf der Seite angeordnet sind. Dies hat einen tieferen Grund. Stark vereinfacht gesagt, liegt er in der sog. Bewegungsparallaxe.

Bewegungsparallaxe ist ein Phänomen, das uns allen bekannt ist. Wenn wir im Zug fahren und nach vorne in Fahrtrichtung des Zuges aus dem Fenster blicken, bewegt sich ein Baum oder ein Haus das noch weit weg ist langsam über das Gesichtsfeld. Je näher man kommt und je mehr sich dieses Objekt auf die Seite zubewegt, desto schneller bewegt es sich über das Gesichtsfeld. Wenn nun eine Fliege mit konstanter Geschwindigkeit und mit konstantem seitlichen Abstand zum Objekt (Haus, Baum) fliegt, so ist die Zeit, die dieses Objekt braucht um sich von einer Fazette zur nächsten zu bewegen, in etwa konstant, unabhängig davon, ob das Objekt noch weit vorne oder auf der Seite ist. Dies rührt davon her, dass eben die Fazetten vorne dichter sind als auf der Seite. Dies bedeutet aber, dass für die Bewegungsmessung sowohl vorne, wie auf der Seite dieselben neuronalen Schaltkreise verwendet werden können (Franceschini et al., 1992 hat dies die „Elementary Motion Detectors“ genannt). Dies bedeutet auch, dass die neuronale Verarbeitung sehr einfach wird.

Diese Ideen haben wir nun wie folgt angewandt (Details, siehe Lichtensteiger und Eggenberger, 1999). Der Roboter ist ausgerüstet mit stangenförmigen Fazetten, die hinten einen lichtempfindlichen Sensor haben (Figur 3a). Die Facetten sind individuell durch Elektromotoren verstellbar. Die Elektromotoren können von einem Computerprogramm gesteuert werden. Ein einfaches neuronales Netz für Bewegungsdetektion wurde fest programmiert und nicht mehr verändert. Dann wurde dem Roboter die Aufgabe gestellt, einen konstanten seitlichen Abstand von einer senkrechten Lichtröhre einzuhalten. Die Stellung der Fazetten wurde mit Hilfe eines evolutionären Algorithmus angepasst, wann immer der Roboter seine seitliche Distanz zum Objekt nicht halten konnte. Mit der Zeit verändert sich die Position der Fazetten nicht mehr und bleibt stabil. In allen Fällen hat sich eine Verteilung ergeben, die vorne dichter ist als auf der Seite (Figur 3b): Die Morphologie hat „gelernt“ die Bewegungsparallaxe zu kompensieren! Der grosse Vorteil dieser Lösung ist, dass ein Teil der Arbeit des Gehirns durch die Form übernommen wird. Dies ist insbesondere deshalb von Bedeutung, wenn man bedenkt, dass die Fliege ja sehr schnell reagieren muss. Je mehr also von der Geometrie und der Physik, was ja nicht nur schnell, sondern auch „gratis“ ist, übernommen wird, desto besser für die Geschwindigkeit. Der Nachteil ist, dass die Form, wenn Sie mal „in hardware gegossen“ ist, nicht mehr verändert werden kann.

a.



b.



Figur 3: Evolution der Morphologie eines Insektenauges auf einem Roboter. (a) Ansicht des Roboters. (b) Resultierende Verteilungen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen.

Wiederum ist zu erwähnen, dass es sich bei dieser Adaptation um einen Prozess der Selbstorganisation handelt: Im Verlaufe der Evolution pendelt sich die für diese Aufgabe und diese Umwelt optimale Verteilung ein, ohne dass dies ein Ziel des Systems gewesen wäre.

## **Folgerungen**

Was bedeuteten diese Überlegungen nun für den künftigen Umgang mit dem Computer im Bereich des Lernens? Ein erster Punkt betrifft die Interaktion mit der Umwelt. Bisher ist die Interaktion der Computer mit ihrer Umwelt primitiv: Eingabe ist in den meisten Fällen über Tastatur und Maus, Ausgabe ist der Bildschirm. Die gesamte Interaktion mit der Umwelt wird vom Anwender übernommen. Dass manchmal auch raffiniertere Ein- und Ausgabe wie gesprochene Sprache verwendet wird, ändert das Bild nicht grundsätzlich. Zweitens ist der PC in einem gewissen Sinne „formlos“, in dem seine Form für seine Funktion überhaupt keine Rolle spielt. Und drittens, der PC ist in einem gewissen Sinne universell: Alles, was sich in Form eines formalisierten Verfahrens darstellen lässt, kann mit einem PC durchgeführt werden. Aber eben, nur was formal — digital — repräsentierbar ist. Immer mehr Geräte — die Embedded Systems — interagieren bis zu einem gewissen Grade selbsttätig, autonom, mit ihrer Umwelt, ohne dass menschliche Interpretation notwendig wäre, wie z.B. Fotoapparate (Distanz und Belichtungseinstellung), Videokameras (Jitter-Suppression), Unterhaltungselektronik (Wahl des besten Senders, Rauschunterdrückung, Lautstärkenschutz, Shock Protection, etc.), Waschmaschinen (Waschmitteldosierung, Temperatur, Dauer), Automobile (Brennstoffdosierung, Bremssteuerung), Kopiergeräte (Kontrasteinstellung, Tonerdosierung), Lichtsteuerung und Überwachung in Räumen (durch Bewegungsdetektoren, Lichtdetektoren; gezielte Übermittlung von Kamerabildern), etc. Überall ist heute Mikroelektronik drin. Wir verstehen jedoch die Interaktion dieser Systeme mit der realen Welt bisher relativ schlecht. Ein besseres Verständnis wird uns unwahrscheinliche Bereiche eröffnen. So könnten z.B. viele Einrichtungen und Appliances mit Lernfunktionen ausgestattet werden. Wichtig dabei ist, dass in der direkten Kopplung an die Umwelt immer die spezifische Morphologie eine zentrale Rolle spielt, da diese letztlich, via die Physik, bestimmt was dann digital verarbeitet werden kann und soll.

Der starke Fokus auf das Digitale, auf das Programm, führt zu einer Einschränkung des Denkens und der Kreativität. Es fällt uns schwer, über den PC hinaus Funktionalität und Adaptivität zu sehen. Das Zusammenspiel des Digitalen mit dem Nicht-digitalen der realen Welt und des Embodiment, ist der zentrale Punkt um intelligentes Verhalten zu verstehen und um Design von intelligenten Systemen selbst kreieren zu können. Der fast ausschliessliche Fokus auf die Programmierung führt sehr oft zu Lösungen, die viel zu kompliziert sind. Ein Beispiel dazu ist Computer Vision, wo man sehr viel Aufwand für die Bilderkennung betreibt. Die hochkomplexen Algorithmen funktionieren in der Regel nur in sehr beschränkten Umgebungen und sind trotz ihrer Komplexität nicht allgemein anwendbar. Würde man die Interaktion mit der Umwelt mit einbeziehen, die Tatsache, dass man mit der — nicht-digitalen — Welt interagieren und diese ausnützen kann, die Objekte z.B. anfassen und drehen kann, vereinfacht die Objekterkennungsalgorithmen um Größenordnungen. Die Message wäre also die engen Grenzen der PC Welt — die Welt des Digitalen — zu sprengen und die Fühler in die reale Welt hinaus zu strecken.

Um das komplexe Zusammenspiel der digitalen Welt der Programme mit der nicht-digitalen realen Welt zu verstehen und spielerisch ins Denken einbeziehen zu können sind nun Roboter hervorragend geeignete Instrumente (z.B. Pfeifer, 1997). Die Erfahrung mit Studierenden verschiedenster Disziplinen hat gezeigt, dass diese Art der Überlegungen als ausserordentlich fruchtbar und inspirierend erlebt werden, was vielen eine völlig neue Welt eröffnet hat. Um diese neue Art des Denkens zu stimulieren, sind wir z.Zt. daran auf europäischer Ebene eine Initiative zu starten, die Robotik frühzeitig in die Schulen bringen soll. Eine Zusammenarbeit mit der Firma Lego und dem Lego Research Laboratory von Henrik Lund ist vorgesehen. Wieso gerade Lego? Der Hauptgrund liegt in der Veränderbarkeit der Morphologie die, wie wir gesehen haben, zentral ist für das Verhalten. Obwohl sich schon der Einsatz von Robotern mit einer fixen Morphologie im Unterricht äusserst positiv auswirkt, eröffnet die Möglichkeit zur Veränderung der Morphologie spielerisch eine völlig neue Welt. Das MIT Media Lab hat in diesem Bereich erstklassige Vorarbeit geleistet. Die Anregung wäre also, das äusserst erfolgreiche Internet-basierte Lernen durch Lernen an Robotern zu komplementieren, damit das Denken und die Fantasie auch die reale Welt mit einschliesst und nicht auf die digitale beschränkt bleibt.

## **Acknowledgment**

Ich bedanke mich bei Dominik Landwehr für die Einladung zu dieser spannenden Tagung über Digitale Lernwelten und für viele anregende Diskussionen über dieses Thema.

## **Referenzen**

- Franceschini, N., Pichon, J.M., and Blanes, C. (1992). From insect vision to robot vision. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 337, 283-294.
- Lichtensteiger, L., and Eggenberger, P. (1999). Evolving the morphology of a compound eye on a robot. To appear in *Proc. of Eurobot'99*.
- Maris, M., and de Boerhorst, R. (1996). Exploiting physical constraints: heap formation through behavioral error in a group of robots. In *Proc. IROS'96, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1655—1660.
- Norman, D.A. (1997). *The invisible computer*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Pfeifer, R. (1997). Teaching powerful ideas with autonomous mobile robots. *Journal of Computer Science Education*, 7, 161-186.
- Pfeifer, R. (1999). Dynamics, morphology, and materials in the emergence of cognition. In W. Burgard, T. Christaller, and A.B. Cremers (eds.). *KI-99: Advances in Artificial Intelligence. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1701*. Berlin: Springer, 27-44.
- Pfeifer, R., and Scheier, C. (1999). *Understanding intelligence*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Rolf Pfeifer  
Artificial Intelligence Laboratory, Department of Information Technology, University of Zurich Winterthurerstrasse  
190, CH-8057 Zurich, Switzerland  
[pfeifer@ifi.unizh.ch](mailto:pfeifer@ifi.unizh.ch), phone: +41 1 63 5 4320/4331, fax: +41 1 63 5 6809,  
<http://www.ifi.unizh.ch/staff/pfeifer.html>