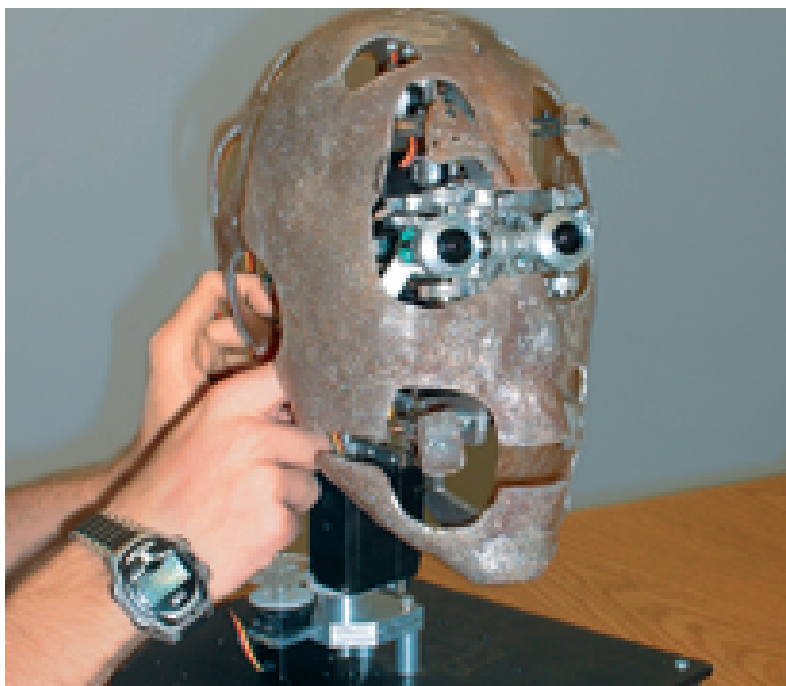
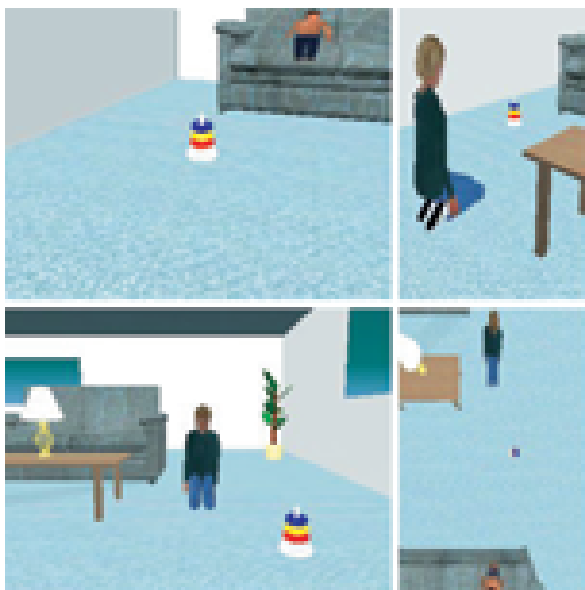


# Der simulierte Säugling

Neuroinformatiker erforschen, wie Babys lernen, Blicke zu verfolgen



1 Werkzeuge der Neuroinformatik und Robotik. Heutige Ansätze zur Modellierung der Entwicklung kognitiver Fähigkeiten benutzen aufwändige Computersimulationen (unten: »Virtual Living Room«) oder antropomorphe Roboter (oben) wie die hier dargestellten Systeme aus unserem Labor an der Universität von Kalifornien in San Diego.



Im Vergleich zu den kognitiven Leistungen des menschlichen Gehirns sind die Fähigkeiten gegenwärtig existierender »Rechen-knechte« – selbst wenn man die schnellsten Supercomputer einsetzt – äußerst begrenzt: Zum Beispiel sind Computer schon bei so alltäglichen Aufgaben wie Gesichtererkennung unter realistischen Bedingungen überfordert. Dagegen kann jedes fünfjährige Kind problemlos eine komplexe visuelle Szene ana-

lyzieren und sämtliche bekannten Personen sowie Objekte darin korrekt benennen, gesprochene Sprache verstehen und zudem überraschend kreative Lösungen für allerdhand Probleme finden. Wie aber funktioniert dies?

Die theoretische Neurowissenschaft oder Neuroinformatik ist eine relativ junge Disziplin, in der Modelle der Informationsverarbeitung in biologischen Nervensystemen entworfen und studiert werden, um einerseits die Arbeitsweise von Gehirnen besser zu verstehen und andererseits schwierige technische Probleme zu lösen, an denen die klassische Künstliche-Intelligenz-Forschung gescheitert ist. Im derzeitigen Stadium ist es sinnvoll, bei der Annäherung an hochkomplexe menschliche Fähigkeiten wie Wahrnehmen, Denken, Planen und Bewusstsein zunächst kognitive Teilfunktionen zu modellieren, die in wohldefinierten und »simpl gehaltenen« Umgebungen erprobt werden können.

## Modelle der kognitiven Entwicklung

Ein besonders spannender Ansatz in der gegenwärtigen Neuroinformatik beschäftigt sich mit der Ent-

wicklung kognitiver Fähigkeiten im Säuglingsalter. Entwicklungspsychologen versuchen seit langem herauszufinden, wie sich kognitive Fähigkeiten nach und nach entwickeln und aufeinander aufbauen. Während wichtige Meilensteine des kognitiven Entwicklungsprozesses recht gut charakterisiert sind, so ist es doch in der Regel unklar, welche physiologischen Mechanismen die Entwicklung letztlich hervorrufen – die Verbindung zur Neurobiologie ist nur wenig entwickelt. Auch auf theoretischer Seite ist unser Verständnis der kognitiven Entwicklung spärlich. Die Entwicklungspsychologie arbeitet in erster Linie deskriptiv, und es fehlen theoretische Modelle, die quantitative Vorhersagen machen können. In den letzten Jahren sind jedoch einige neuronale Netzwerk-Modelle von Lernvorgängen im Säuglings- und Kleinkindalter entwickelt worden, die neue, plausible Erklärungsansätze für klassische Fragen zum Beispiel der Sprachentwicklung geliefert haben.<sup>11</sup> Ein aufregender neuer Trend ist der Einsatz von aufwändigen Simulationsumgebungen oder Robotern zum Studium der frühen kognitiven Entwicklung 1. Diese Roboter haben Namen wie »Babybot« oder »Infanoid«, und ihre Vorbilder sind nicht C3PO, der Terminator oder RoboCop, sondern unsere Säuglinge und Kleinkinder. Neuroinformatiker hoffen, auf diese Weise den Grundprinzipien von Lernen und Entwicklung in autonomen Systemen auf die Spur zu kommen.

## Die autonome mentale Entwicklung verstehen

Die Tatsache, dass menschliche Säuglinge es schaffen, in nur wenigen Monaten aus den vielfältigen Reizen ihrer Umgebung eine hochgeordnete und sinnvolle Welt zu machen und kompetent mit ihr zu interagieren, ist zutiefst beeindruckend – und die Mechanismen sind weitgehend unverstanden. Moderne Simulationsansätze in der Neuroinformatik könnten hier auch zu einem tieferen Verständnis des

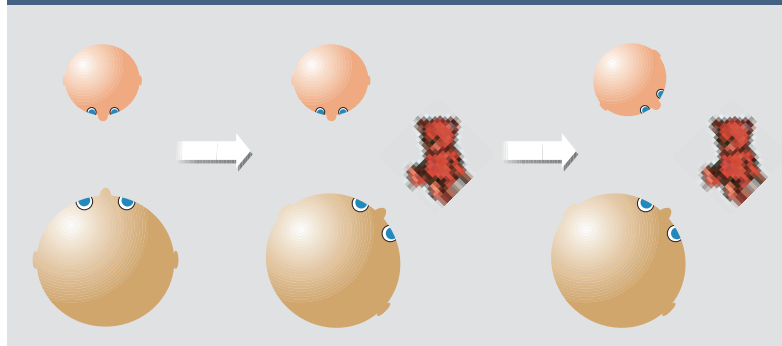
»Nature/Nurture-Problems« (Verhältnis von Vererbtem und Erlerntem) führen: Inwiefern sind kognitive Fähigkeiten vererbt und/oder erlernt? Wie interagieren die durch genetische Anlagen des Organismus produzierten Strukturen und Funktionen (wie Gehirn, Wahrnehmungs- und motorischer Apparat, Lernmechanismen) mit den gegebenen Eigenschaften der Umwelt, um den kognitiven Apparat »in Form« zu bringen? Die enge Zusammenarbeit von Wissenschaftlern aus den Bereichen Neurowissenschaft, Informatik, Robotik und Entwicklungspsychologie lässt auf große Fortschritte im Verständnis der autonomen mentalen Entwicklung hoffen.<sup>12/</sup>

In unserem Labor am Frankfurt Institute of Advanced Studies (FIAS) [siehe auch Anne Hardy »Disziplinen unter einem Dach: Das Frankfurter Institute for Advanced Studies (FIAS)«, Seite 95] studieren wir unter anderem die Entwicklung des Blickverfolgens – der Fähigkeit, seine (visuelle) Aufmerksamkeit auf ein Objekt zu richten, weil es von einem anderen Agenten betrachtet wird. Diese Fertigkeit scheint von fundamentaler Bedeutung für die soziale Entwicklung des Kindes zu sein und spielt beispielsweise eine wichtige Rolle beim Spracherwerb. Sie stellt einen ersten Schritt in einem langen Prozess dar, an dessen Ende der Säugling sich selbst und andere als bewusst wahrnehmende Agenten versteht – der Säugling entwickelt eine »Theorie des Geistes«. Die Fähigkeit, Blicke zu verfolgen, entsteht erst allmählich während der ersten zwei Lebensjahre, doch es ist unklar, was diese Entwicklung verursacht.

### Eine neue Theorie zur Entwicklung des Blickverfolgens

Während früher angenommen wurde, dass ein kognitives Modul für das Blickverfolgen durch genetische Anlagen schon weitgehend festgelegt ist und mehr oder weniger »von allein« zur Funktionstüchtigkeit reift, haben wir kürzlich eine neue Theorie entwickelt, mit der wir versuchen zu erklären, wie die Fähigkeit, Blicke zu folgen, entsteht. Aufbauend auf Arbeiten von Chris Moore<sup>13/</sup> postuliert sie, dass Säuglinge diese Fertigkeit nach und nach durch Lernprozesse er-

Prinzip des Blickverfolgens

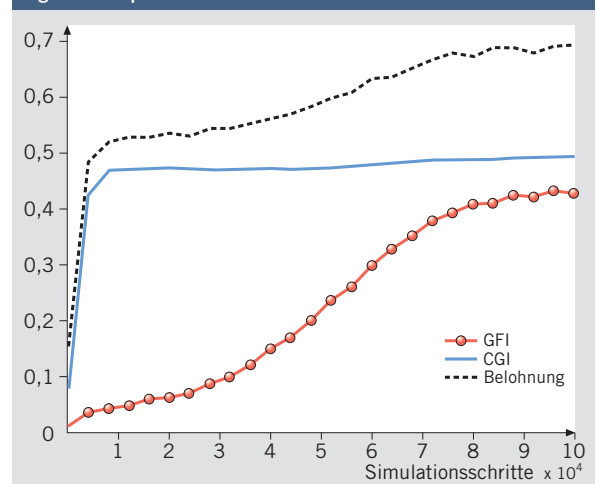


2 Der im Computermodell simulierte Säugling lernt, dass die Änderung seiner Blickrichtung, weg von der Bezugsperson und hin zum Objekt, mit einer »Belohnung« verbunden ist: dem Anblick des attraktiven Teddys.

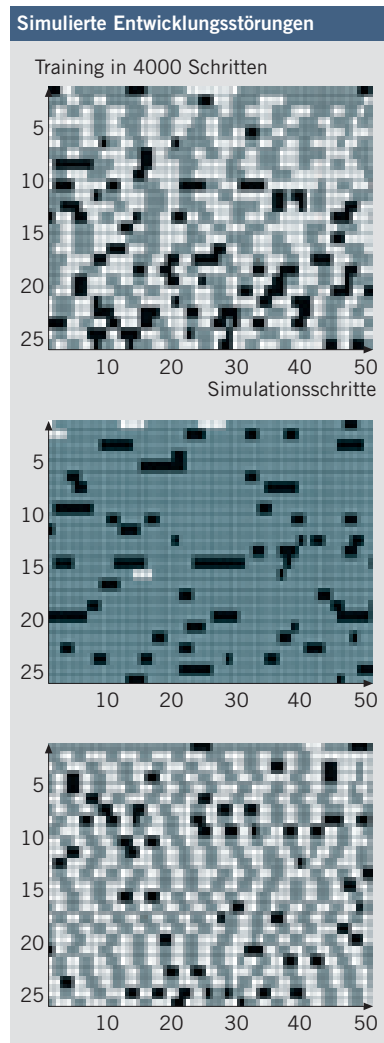
werben, während sie mit ihren Bezugspersonen interagieren. Wir vermuten, dass nur eine kleine Gruppe von Mechanismen – das so genannte »Basic Set« – hinreichend ist, um das Blickverfolgen zu erlernen<sup>14/ 15/</sup>. Ein wichtiges Element dieses Basic Sets ist die Eigenschaft von Säuglingen, bevorzugt »interessante« Dinge anzuschauen: Besonders attraktiv sind etwa bewegte Objekte mit hohem Kontrast oder gesättigten Farben oder auch die Gesichter von Personen. Darüber hinaus ist der Säugling schon sehr früh in der Lage, verschiedene räumliche Orientierungen des Kopfes der Bezugsperson zu unterscheiden. Zweitens verfügt der Säugling über Gewöhnungsmechanismen, die ihn das Interesse an Objekten nach einiger Zeit vorübergehend wieder verlieren lassen, so dass es zu einem Umherschauen zwischen verschiedenen Objekten kommen kann. Drittens spielen hedonistische Lernmechanismen beim Säugling eine Rolle: Er strukturiert sein Verhalten so, dass verstärkt Handlungen mit nachfolgenden positiven Erfahrungen ausgeführt werden; während Handlungen, die negative Erfahrungen nach sich ziehen, künftig vermieden werden. Schließlich vermuten wir eine starke Korrelation zwischen den Dingen, die die Bezugsperson häufig anschaut, und den Objekten, die der Säugling »interessant« findet. Beispielsweise sind häufige Blicke der Bezugsperson auf andere Personen wahrscheinlich, und diese stellen einen interessanten Reiz für Säuglinge dar. Wie aber können all diese Mechanismen des Basic Sets so zusammenwirken, dass der Säugling letztlich das Blickverfolgen lernt? Und was bedeutet dies für seine beginnende Erkenntnis, dass seine Bezugsperson ein intelligentes Wesen ist?

In unserem Modell stellen der Säugling und seine Bezugsperson zunächst häufig Blickkontakt her: Dieses Gesicht ist für den Säugling attraktiv 2. Wenn nun die Bezugsperson ihren Blick auf ein anderes Objekt lenkt, dann kann es passieren, dass eine Blickbewegung des Säuglings folgt. Wenn das Baby dabei in die gleiche Richtung schaut wie seine Bezugsperson, dann besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass es dort etwas Interessantes zu sehen gibt, und diese Wahrscheinlichkeit ist höher, als wenn der Säugling in eine andere Richtung als die Bezugsperson schaut. Der hedonistische Lernmechanismus sorgt nun dafür, dass Blickbewegungen des Säuglings in die Blickrichtung der Bezugsperson immer wahrscheinlicher werden,

Ergebnisbeispiel einer Modellsimulation



3 Die Häufigkeit des Blickverfolgens (englisch: gaze following), gemessen durch den Gaze Following Index (GFI; rote Kurve), die Häufigkeit von Blicke zur Bezugsperson (der Caregiver Index, CGI; blaue Kurve), als Funktion der Zeit. Der Säugling lernt sehr schnell, häufig seine Bezugsperson anzuschauen; das Blickverfolgen entwickelt sich dagegen erst langsam. Die monoton ansteigende Kurve der Belohnung (gestrichelte Linie) bedeutet, dass das Lernen des Blickverfolgens für den Säugling nützlich ist und beschreibt die »Güte« seines Verhaltens.



weil sie öfter den Blick zu einem interessanten Objekt führen. Am Ende dieses Prozesses wird der Säugling häufig den Blickbewegungen seiner Bezugsperson folgen.

Um die Plausibilität dieser neuen Theorie zu testen, haben wir umfangreiche Simulationen mit einem Computermodell dieser Prozesse durchgeführt **3**. Wir konnten dabei demonstrieren, dass die wenigen vorgeschlagenen Mechanismen des Basic Sets tatsächlich hinreichend sind, um die Fähigkeit des Blickverfolgens zu erlernen. Dies wider-

**4** Die Computermodelle simulieren Autismus (Mitte) und Williams-Syndrom (unten), zum Vergleich ist eine normale Entwicklung dargestellt (oben); die Blickbewegungen des Modells werden durch verschiedene Grautöne dargestellt. Weiß: Blick zur Bezugsperson; schwarz: Blick auf interessantes Objekt im Raum; grau: sonstige Blicke. Blickverfolgen tritt auf, wenn einem Blick zur Bezugsperson (weiß) ein Blick auf ein interessantes Objekt (schwarz) folgt. Bei den Modellen, die Autismus und Williams-Syndrom simulieren, tritt dieses Verhalten gar nicht oder nur vermindert auf.

spricht dem gängigen Postulat eines angeborenen »Moduls für Blickverfolgung«.

### Besseres Verständnis von Entwicklungsstörungen

Der Lernprozess, der schließlich zum Blickverfolgen befähigt, scheint somit auf sparsamen Mechanismen aufzubauen. Dies eröffnet eine interessante Perspektive auf bestimmte Entwicklungsstörungen, die durch Defizite beim Blickverfolgen gekennzeichnet sind. Da unsere Modelle nachgewiesen haben, dass die Mechanismen des Basic Sets hinreichend für den Lernerfolg sind, kann aus Defiziten beim Blickverfolgen geschlossen werden, dass einer der Mechanismen oder auch deren Interaktion fehlerhaft ist. Ausgehend von dieser Überlegung haben wir Manipulationen an unserem Modell vorgenommen, mit denen wir gewisse Aspekte von Entwicklungsstörungen wie etwa Autismus oder Williams-Syndrom simulieren können. Wenn dem simulierten Säugling ein vermindertes Interesse an Gesichtern (Autismus) oder ein übersteigertes Interesse (Williams-Syndrom) einprogrammiert wird, verändert sich auch das Verhalten des Modells nachhaltig **4**. Diese Manipulationen (und einige andere) können das Entstehen des Blickverfolgens im Modell tatsächlich stark erschweren oder sogar ganz verhindern. Das Modell vermag also zu erklären, wie Unterschiede bei der Gesichterwahrnehmung in gewissen Entwicklungsstörungen dazu führen,

dass sich die Fähigkeit zum Blickverfolgen nicht normal entwickelt.

Die von uns entwickelten mathematischen Modelle bieten eine einfache und plausible Erklärung für die Entwicklung des Blickverfolgens. Dabei lernt der Säugling allmählich, die Kopforientierung seiner Bezugspersonen mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für interessante Objekte an gewissen Orten zu assoziieren. Um diese Assoziationen zu lernen, bedarf es nur minimaler Voraussetzungen. Wahrscheinlich haben Säuglinge zunächst nur ein sehr geringes Verständnis von ihrer Bezugsperson als ein kognitives Wesen. Wir müssen nicht von einer gut ausgebildeten »Theorie des Geistes« im kognitiven System des Säuglings ausgehen, um das Entstehen des Blickverfolgens zu erklären. Vielmehr ist diese gelernte Fähigkeit ein erster Baustein einer sich ständig erweiternden »Theorie des Geistes«.

Langfristig können solche Modelle der Neuroinformatik hoffentlich zu einem tieferen Verständnis von Entwicklungsstörungen wie Autismus und Williams-Syndrom und deren Konsequenzen beitragen oder sogar Ansatzpunkte für neue Therapieformen liefern. Zugleich können uns die Fortschritte beim Verständnis der kognitiven Kindesentwicklung auch helfen, eine neue Generation intelligenter Roboter zu entwickeln, die ihre kognitiven Fähigkeiten in einem ähnlichen Entwicklungsprozess erlangen werden. Doch der intelligente, sich seiner selbst bewusste Roboter ist derzeit noch pure Vision. ◆

### Literatur:

<sup>1/</sup> Elman, J. L.; Bates, E. A.; Johnson, M. H.; Karmiloff-Smith, A.; Parisi, D. & Plunkett, K. (1996): Rethinking Innateness: A connectionist Perspective on Deve-

lopment; Cambridge (MA), MIT Press

<sup>2/</sup> Weng J.; McClelland, J.; Pentland, A.; Sporns, O.; Stockman, I.; Sur, M. & Thelen, E. (2001): Autonomous mental development by robots and animals,

Science, 291(5504): Seiten 599–600

<sup>3/</sup> Moore, C. & Corkum, V. (1994): Social understanding at the end of the first year of life. Developmental

view, 14: Seiten 349–372

<sup>4/</sup> Carlson, E. & Triesch, J. (2003): A computational model of the emergence of gaze following. In: Bowman, H. & Labiouse, C. (Hrsg.), Progress in Neural Processing;

Hackensack (NJ), World Scientific

<sup>5/</sup> Triesch, J.; Teuscher, C.; Deák, G. & Carlson, E.: Gaze Following: Why (not) learn it? Developmental Science. (erscheint 2006)

### Der Autor

**Prof. Dr. Jochen Triesch**, 35, ist Fellow am Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS). Dort forscht der Physiker auf dem Gebiet der Neuroinformatik. Gleichzeitig ist er Assistant Professor am Department of Cognitive Science der University of California San Diego. Sein besonderes Interesse gilt den Lernprozessen in kognitiven Systemen sowie der Entwicklung des menschlichen Sehsystems. Er entwickelt Computermodelle und führt Wahrnehmungsexperimente durch, um diese Prozesse besser zu verstehen.