

## FORSCHUNGSBERICHTE DER DIREKTION SOZIAL- UND GEMEINDEPSYCHIATRIE



Wolfgang Tschacher & Christian Scheier

**DER ANSATZ DER EMBODIED COGNITIVE SCIENCE**

Nr. 99-1



# **DER ANSATZ DER EMBODIED COGNITIVE SCIENCE:**

## **KONZEPTE, METHODEN UND IMPLIKATIONEN FÜR DIE PSYCHOLOGIE**

Wolfgang Tschacher und Christian Scheier

Wolfgang Tschacher  
Universität Bern  
Universitäre Psychiatrische Dienste  
Laupenstrasse 49  
CH-3010 Bern, Schweiz  
tschacher@spk.unibe.ch

Christian Scheier  
California Institute of Technology  
Biology Division 139-74  
CA 91125, Pasadena, USA  
scheier@its.caltech.edu

# **Der Ansatz der Embodied Cognitive Science: Konzepte, Methoden und Implikationen für die Psychologie**

Wolfgang Tschacher und Christian Scheier

## **Zusammenfassung**

Seit der kognitiven Wende besteht eine enge Verbindung der Psychologie mit den Fortschritten der Computertechnologie, insbesondere mit der Forschung zur künstlichen Intelligenz (KI). Der "computationalistische" Ansatz der Symbolverarbeitung dominiert hier wie dort die Kognitionsforschung. Kognition besteht danach in einer sequentiellen Abfolge von Verarbeitungsschritten. Zwischen Wahrnehmung und Handlung werden Umweltreize durch höhere kognitive Prozesse wie Kategorisierung, Gedächtnis und Planung verarbeitet. Der Fokus der vom symbolischen Informationsverarbeitungsparadigma dominierten Kognitionsforschung liegt auf diesen höheren kognitiven Funktionen, die als relativ eigenständige Module ohne direkte Schnittstelle zur Umwelt gedacht werden. Dieser Ansatz wird wegen der ihm inhärenten fundamentalen Probleme kontrovers diskutiert. Alternative Forschungsprogramme wie die embodied cognitive science fordern eine Hinwendung zur Verkörperung von Kognition: Kognition wird auf der Grundlage von sensomotorischen Schleifen definiert, und kann daher nicht computationalistisch, also unabhängig von der Umwelt und dem Verhalten eines Agenten verstanden werden. Bevorzugte Methode dieser "neuen KI" sind Roboter bzw. autonome Agenten. Konsequenzen für die Psychologie werden herausgearbeitet. Eine theoretische Konzeptualisierung autonomer Agenten auf der Basis der Theorie dynamischer Systeme und der Synergetik wird umrissen. Darin wird das kognitive System als ein komplexes System vieler sensomotorischer Schleifen konzipiert; kohärente und adaptive Wahrnehmungs-Handlungsprozesse werden durch das Einwirken von Affordanzen hervorgerufen. Anhand von Beispielen aus der angewandten Psychologie wird gezeigt, dass diese Perspektive zu neuen Forschungsfragen und Erklärungsansätzen für empirische Befunde führt.

## 1. Einleitung: Probleme der "klassischen" Künstlichen-Intelligenz-Forschung

Seit Anbeginn der "kognitiven Wende" in der Psychologie vor vier Jahrzehnten (z.B. Miller, Galanter und Pribram, 1960) dominiert der symbolische Informationsverarbeitungsansatz die Kognitionsforschung und wesentliche weitere Teilgebiete der Psychologie. Als Alternative zum Behaviorismus formuliert, erlaubt dieser Ansatz die Konzeptualisierung und Erforschung höherer kognitiver Prozesse wie Denken, Schlussfolgern, Planen oder Gedächtnis.

Diese höheren kognitiven Funktionen werden dabei als relativ eigenständige Module ohne direkte Schnittstelle zur Umwelt gedacht. Analog zum (von Neumann-) Computer verarbeiten diese Module Symbole, deren Bedeutung relativ zu anderen Symbolen definiert ist. Wie bei einem Softwareprogramm, das unabhängig von der spezifischen Hardware, in der es implementiert ist, charakterisiert werden kann, kann daher auch das menschliche Symbolsystem unabhängig vom biologischen Substrat charakterisiert werden (Newell, 1980). Die physische Realisierung der Symbole (also ihre "Verkörperung") ist irrelevant, solange die syntaktische Beziehung zu anderen Symbolen invariant bleibt. Da die computationale bzw. kognitive Funktion solcher Symbole eigenständig gegenüber ihrer physikalischen Realisierung gesehen wird, wird dieser Informationsverarbeitungsansatz auch als Computationalismus bzw. Kognitivismus bezeichnet.

Im Laufe der vergangenen Jahrzehnte haben sich jedoch zunehmend Probleme dieser Sicht auf intelligentes Verhalten erwiesen (Dreyfus, 1972; Kolars & Smythe, 1984; Winograd & Flores, 1986). Da sich diese Probleme am klarsten in der Forschung zur künstlichen Intelligenz (KI) herauskristallisiert haben, wollen wir, bevor wir auf die Implikationen für die (kognitiv orientierte) Psychologie eingehen, in diesem Abschnitt die Problematik des "klassischen" symbolischen Informationsverarbeitungsansatzes aus dieser Perspektive beleuchten.

In der KI zeigte sich zunehmend, dass Aufgaben, die Menschen problemlos bewältigen (z.B. Wahrnehmen, Laufen, Abwaschen) für Maschinen besonders schwierig sind, und umgekehrt, Probleme, die für Menschen schwierig erscheinen (z.B. logisches Schlussfolgern, Schach), für Maschinen häufig einfach zu lösen sind. Auffällig ist, dass sich der Grossteil der für Maschinen schwierigen Probleme auf die Schnittstelle zur realen Welt<sup>1</sup> bezieht. Entsprechend traten die Probleme des klassischen Ansatzes der KI erst dann richtig zu Tage, als die Systeme mit ihrer Umwelt z.B. über Kameras und Greifarme verbunden werden sollten, also als die informationsverarbeitenden Systeme mit Körpern versehen ("embodied") wurden. Der tiefere Grund für diese Probleme - und der Hauptgrund für die fundamentalen Probleme der klassischen KI im Allgemeinen - ist in der Vernachlässigung der Charakteristika der realen Welt und der Interaktion zwischen Kognition, Körper und Welt zu suchen. Die Mehrzahl der Arbeiten im Bereich der klassischen KI beziehen sich stattdessen auf abstrakte, virtuelle Welten mit klar definierten Zuständen und Operationen.

---

<sup>1</sup> "Reale" Welt ist hier - gewissermassen epistemologisch naiv - zu verstehen als Gegensatz zur virtuellen (also innerhalb des Computers realisierten) Umwelt eines symbolverarbeitenden Programmes

Ein illustratives Beispiel ist Schach. Schach ist ein formales Spiel in einer virtuellen Welt mit diskreten, präzise definierten Zuständen, den Positionen auf dem Schachbrett, und Operationen, den zulässigen Spielzügen. Bei einer gegebenen Brettposition sind zudem alle zulässigen Züge klar definiert. Obwohl ein Spieler in der Regel den nächsten Zug des Gegners nur ahnen kann, weiss er, dass der Gegner nur einen der legitimen Züge machen wird, sonst würde er nicht mehr Schach spielen. Schach ist ferner statisch in dem Sinne, dass sich nichts an der momentanen Spielsituation ändert, wenn keiner der Spieler einen Zug macht.

Im Gegensatz dazu vergegenwärtige man sich ein anderes Spiel: Fussball. Fussball ist ein nicht-formales Spiel, das sich in der realen Welt abspielt. Entsprechend gibt es keine diskret definierten Zustände, sondern die Welt des Fussballs ist kontinuierlich. Eine zentrale Implikation ist, dass es keine zwei identischen Situationen geben kann. Die Information, die ein Spieler über das momentane Spielgeschehen hat, ist zudem notwendigerweise partiell. Ein Fussballspieler kann nicht gleichzeitig über alle Aktivitäten aller anderen Spieler Bescheid wissen. Vollständige Information kann es in der realen Welt nicht geben, eine solche existiert nur in formalen, abgeschlossenen Welten wie beim Schach. Verkörperung ("embodiment") impliziert darüber hinaus eine stets nur begrenzte Sicht auf die Umwelt, da die Spannweite der Sensoren begrenzt ist, und zudem Sensorik und Motorik Zeit benötigen, um zu funktionieren. Daher gibt es Zeitdruck: im Gegensatz zu Schach geschehen die Dinge auch ohne unser eigenes Zutun. Schliesslich sind Sensorik und Motorik nie optimal: es muss immer mit Stochastik und deterministischem Chaos gerechnet werden. Diese Eigenschaften der realen Welt implizieren, dass sie nur partiell bekannt und daher nur teilweise und innerhalb eines begrenzten Zeithorizonts vorhersagbar ist. Zusammenfassend zeigt sich, dass sich das Verhalten in der realen Welt qualitativ von dem in formalen oder virtuellen Welten unterscheiden muss. Die Erfahrung der letzten Dekade ergibt u.E., dass die Probleme der klassischen KI wesentlich auch in der Vernachlässigung dieser Unterschiede begründet liegen.

Es folgten in der KI zahlreiche Versuche, diese Problematik konzeptuell zu fassen (Franklin, 1996; Hendriks-Jansen, 1996; Pfeifer & Scheier, 1999). Wir wollen drei Problembereiche skizzieren, die in der neueren Literatur angesprochen wurden.

(1) Harnad (1990) isolierte als besonders virulentes Problem das sogenannte *symbol grounding problem*, das die Beziehung eines realen Objektes zu dem es repräsentierenden, im System intern gespeicherten Symbol thematisiert. Harnad stellte die Frage, "How can the meanings of the meaningless symbol tokens, manipulated solely on the basis of their (arbitrary) shapes, be grounded in anything but other meaningless symbols?" (Harnad, 1990, S. 335). In der klassischen KI - und im Computationalismus im Allgemeinen - ist die Bedeutung von Symbolen tatsächlich rein syntaktisch definiert, also durch die Art, wie sich Symbole auf andere Symbole beziehen, und wie sie durch einen Interpretier verarbeitet werden (Newell, 1990). Die Beziehung der Symbole zur realen Welt oder zu einem menschlichen Beobachter wird kaum expliziert. Solche Systeme operieren (wie Schachcomputer) in abgeschlossenen virtuellen Welten. Dies ist in der Informatik, z.B. in Datenbankanwendungen oder Expertensystemen, unproblematisch,

solange ein Mensch - als aussenstehender Beobachter - die Symbole interpretiert, also den Bezug der Symbole zur Aussenwelt herstellt. Ausser in Echtzeitanwendungen wird hier die Beziehung der Symbole zur realen Welt selten diskutiert; es wird angenommen, dass der Beobachter weiss, was die Symbole bedeuten. Die Bedeutung des Symbols in der realen Welt ist somit in der Erfahrung des Beobachters und *seiner* Interaktion mit der Welt gegründet ("grounded"). Die Symbole haben für den Beobachter (und den Designer des Programms) Bedeutung, nicht aber für das System selbst. Wenn nun aber - wie z.B. in der maschinellen Objekterkennung (computer vision) der Fall - der die Symbole interpretierende Mensch fehlt, muss das System selbst die Beziehung der Symbole zur Aussenwelt herstellen, so dass das symbol grounding-Problem offenkundig wird. Tatsächlich ist die maschinelle Erkennung von realen Objekten ein hochgradig nicht-triviales, und bislang nur unbefriedigend gelöstes Problem (z.B. Ullman, 1996). Symbol grounding kann nur über die *Interaktion* des Systems mit der realen Welt erfolgen, was wiederum einen Körper erfordert. Die Untersuchung des symbol grounding-Problems ergibt also, dass eine Lösung allein im Rahmen des Computationalismus nicht gelingen kann (Bickhard & Terveen, 1995; Barsalou, im Druck).

(2) Das "*frame of reference*"-Problem (Clancey, 1991) thematisiert den System-Umwelt-Bezug in allgemeinerer Weise. Es wird auf die Bedeutung des gewählten Bezugspunktes bei der Beschreibung und Erklärung von Verhalten hingewiesen. Dabei ergeben sich die folgenden Aspekte:

Erst- und Drittpersonen-Perspektive: aus welcher Perspektive betrachten wir ein System? Die Beschreibung des Systemverhaltens durch einen Beobachter (Drittpersonen-Perspektive) oder die Beschreibung des dem beschriebenen Verhalten zugrundeliegenden Mechanismus (Erstperson-Perspektive, Sicht aus der Perspektive des Systems) ist prinzipiell möglich (vgl. Atmanspacher & Dalenoort, 1994). Beschreibung und Mechanismus müssen streng auseinandergelassen werden. Eine genauere Betrachtung der Literatur zeigt jedoch, dass dies in vielen Fällen, gerade in der KI und kognitiven Psychologie, nicht der Fall ist. Man ist oft versucht, ein Verhalten als zielorientiert zu beschreiben, ohne dass dem Verhalten explizite Ziele zugrundeliegen müssen. Es stellt sich beispielsweise heraus, dass schon einfache kybernetische Mechanismen, wie sie in Braitenbergs Vehikeln (s. unten) implementiert sind, Verhalten generieren können, das auch geübte Beobachter mit relativ komplexen Konstrukten wie Ziel, Intention oder Plan beschreiben oder - fälschlicherweise - erklären.

Dennoch lässt sich Verhalten nicht auf interne Mechanismen reduzieren, da es sich aus der System-Umwelt-Interaktion entwickelt, also "situert" ist (Greeno, 1989; zur Diskussion von "situated action" s. Vera & Simon (1993) sowie die daraus entstandene Debatte in der Zeitschrift *Cognitive Science*). Kategorisierung zum Beispiel kann nicht - wie in den meisten kognitivistischen Theorien der Fall - auf die Abbildung eines Stimulus auf eine interne Repräsentation reduziert werden, sondern umfasst kritisch auch den Agenten <sup>2</sup> und seine Interaktion mit dem

---

<sup>2</sup> Agent" wurde von Minsky (1985) als eine isolierbare kognitive Fähigkeit definiert, z.B. "lege einen Stein auf einen anderen". Komplexes Verhalten ist aufgebaut aus dem Zusammenspiel vieler Agenten in einer "society of

Objekt. Wenn Verhalten aus der System-Umwelt-Interaktion emergiert, kann auch ein Agent Kategorien bilden und sich danach verhalten, ohne dass die Kategorien explizit im Agenten repräsentiert zu sein brauchen.

Komplexität des Verhaltens versus Komplexität des generierenden Mechanismus: Die Aussage hier ist, dass komplexes Verhalten nicht komplexer interner Mechanismen bedarf, weil ein Grossteil der Komplexität eines Verhaltens - aus Beobachterperspektive - aus der Interaktion des Systems mit der Umwelt resultiert. So kann zum Beispiel die detaillierte Analyse einer Trajektorie einer Ameise, die einen Kiesstrand durchquert, zeigen, dass der zurückgelegte Pfad äusserst komplex ist, während die Ameise selbst dabei aber nur eine Regel anwendet: Wenn etwas auf der einen Seite zu nahe kommt, dann drehe auf die andere Seite. Diese Regel reicht nun nicht, das Verhalten zu erklären (siehe oben). Ebenso wenig kann man das Verhalten nur auf die Komplexität der Umwelt reduzieren, denn würde die Ameise um einen Faktor 100 vergrössert, würde sich die vorher komplexe Trajektorie auf eine gerade Linie reduzieren. Die Komplexität von Verhalten entsteht also durch die Interaktion von Mechanismus und Umwelt, mediiert durch den Körper des jeweiligen Agenten.

(3) Ein weiteres Problemfeld ist das *Problem der Stabilität*, dem symbolische Repräsentation und Informationsverarbeitung in KI-Applikationen unterworfen ist (Tschacher & Dauwalder, 1999). Der Zusammenhang wird in der KI als "frame problem" bezeichnet (Dennett, 1984; Pylyshyn, 1987). Er besteht in Folgendem: Wenn die Welt eines kognitiven Systems komplex ist, muss auch ihre symbolische Repräsentation entsprechend komplex und umfangreich sein. Dies scheint zunächst ein rein quantitatives bzw. Speicherproblem zu sein, entwickelt jedoch eine

hohe Brisanz im Zusammenhang mit Änderungen der Umwelt oder der Position des Systems in dieser Umwelt. Jede Änderung oder Bewegung, jede Dynamik macht es nämlich erforderlich, die Repräsentation in Echtzeit entsprechend zu ändern, eine Aufgabe, die sehr rasch in eine kombinatorische Explosion hineinführt. Die Explosion der Rechenanforderungen entsteht dadurch, dass die Implikationen aus einer Änderung in allen (oder zumindest doch weiten) Bereichen des repräsentierten Weltmodells ermittelt werden müssen, da das System nicht a priori wissen kann, welche der Änderungen irrelevant und welche überlebenswichtig sind. Im ersteren Fall einer irrelevanten Veränderung ist das kognitive Modell stabil zu halten (Assimilation), im zweiten Fall ist eine flexible Anpassung an die veränderte Welt erforderlich (Akkomodation). In symbolischen Systemen (die in der Regel auf Propositionen beruhen) ist die kontinuierliche Berücksichtigung dieses Stabilitäts-Flexibilitäts-Dilemmas wegen des exponentiell wachsenden Verarbeitungsaufwands nicht bewältigbar. Das rasche und anstrengungslose Lösen des Dilemmas in Echtzeit ist jedoch ein Charakteristikum kognizierender und lernender Lebewesen - die Ratte im Labyrinth sitzt nicht gedankenverloren an jeder neuen Verzweigung, um das "update" ihrer Wissensbasis abzuwarten (ein berechtigtes Argument, das in der

Psychologiegeschichte bereits Tolmans Konzept der kognitiven Landkarte gegenüber angeführt wurde).

Wir wollen damit unseren kurzen Abriss der aktuellen Problematik, der sich die KI bei der Verfolgung ihrer Ziele gegenüber sieht, beenden. Wir haben uns wohlgerne nicht auf die unrealistischen Erwartungen bezogen, die während der sechziger bis in die achtziger Jahre bezüglich der Entstehung menschähnlicher künstlicher Intelligenz propagiert wurden. Die derzeit vorgebrachte Kritik ist tatsächlich weit grundsätzlicher; sie hat zum Vorschlag geführt, sich doch zunächst einmal den Problemen auch nur der Intelligenz auf Insektenniveau zuzuwenden (Brooks, 1991).

Die genannten Probleme sind auch nicht auf symbolische Systeme (im Gegensatz zu sogenannten subsymbolischen, konnektionistischen Architekturen) beschränkt. Konnektionistische Systeme (neuronalen Netze) mögen eine teilweise Lösung bezüglich der unter Punkt (3) aufgeführten Probleme ermöglichen (Strube, 1990; Caspar, Rothenfluh & Segal, 1992). Man beachte jedoch, dass konnektionistische Systeme im Wesentlichen als kognitive Module (z.B. als assoziative Speicher) ohne direkte Schnittstelle zur Umwelt untersucht werden. Konnektionistische Systeme erhalten einen Input, verarbeiten diesen, und produzieren einen Output. Die Limitation in konnektionistischen Systemen ist daher bislang in der Regel dieselbe, indem zum einen der Input des Systems vom Designer vor- und aufbereitet wird, und zum anderen der Output des Systems nicht zum nächsten Input führt, sondern vom Designer interpretiert werden muss. Sie stehen ebenso wie klassische, z.B. regelbasierte Systeme, nicht für sich selbst, d.h. es gibt in allen bisher realisierten Applikationen einen medienvermittelnden Beobachter. Wenn also solche Systeme als Modelle zur psychologischen Kognitionsforschung dienen sollen, muss stets die Tatsache dieses "Beobachters in der Schleife" beachtet werden; andernfalls besteht die Gefahr einer Pseudoerklärung mittels eines Homunkulus.

## 2. Autonome Agenten: ein neuer Ansatz in der Kognitionswissenschaft

Die genannten Kritikpunkte am klassischen KI-Ansatz betrafen das Wechselspiel zwischen internem Mechanismus, dessen Einbettung in den Körper des Agenten, sowie die daraus resultierende Interaktion des Agenten mit seiner Umwelt. Die Einsicht, dass der Körper für das Verständnis von Intelligenz und Kognition von zentraler Bedeutung ist, hat inzwischen zu einer neuen, die KI transzendierenden Disziplin geführt, der sogenannten *embodied cognitive science* (Pfeifer & Scheier, 1999; Varela, Thompson & Rosch, 1991). Eine wichtige Methode dieses Gebietes ist die Untersuchung von kognitiven Prozessen mit Hilfe von autonomen, mobilen Robotern. Wie wir im Folgenden noch genauer zeigen werden, wird dieser synthetische (auf dem Bau von materiellen Modellierungen basierende) Ansatz durch eine Reihe neuer empirischer Resultate bestärkt, die die zentrale Bedeutung des Körpers für intelligentes Verhalten verdeutlichen.

Entsprechend liegt die Grundvoraussetzung der sogenannten Neuen Künstlichen Intelligenz ("New AI", "Behavior-Based AI", "Nouvelle AI") darin begründet, die Systeme mit einer Schnittstelle zur realen Welt zu versehen. Diese Schnittstelle stellt der Körper dar, der über Sen-



sorik und Motorik in die reale Welt eingebettet ist und es dem System so ermöglicht, sein Wissen autonom aufzubauen, ohne auf einen interpretierenden Beobachter angewiesen zu sein. Das System ist damit "komplett". Die synthetische Methodologie der KI wird also durch den neuen Ansatz dahingehend erweitert, dass sie nicht nur - wie in der symbolischen KI und im subsymbolischen konnektionistischen Paradigma - Computersimulationen umfasst, sondern physische Systeme, die sich in natürlichen Umwelten verhalten. Diese Systeme sind *autonome Agenten*.

Das empirische Paradigma der autonomen Agenten ist jedoch nicht auf die spezifische Modellierungsmethodologie, den Bau mobiler Roboter, beschränkt, sondern eröffnet zusätzlich eine theoretische Perspektive auf Intelligenz und Kognition. Viele der zentralen Ideen wurden schon 1961 von Masanao Toda, einem damals in Harvard lehrenden Psychologen, formuliert (Toda, 1962). Toda schlug vor, als Alternative zur traditionellen Experimentalpsychologie sogenannte "Fungus Eaters" zu untersuchen. Seine Grundidee war, anstatt isolierte Module der Kognition anhand eingeschränkter Aufgaben zu untersuchen, komplette - wenn auch einfache - Systeme zu erforschen. "Komplett" meint, dass die Systeme sich verhalten können sollen, ohne durch einen Beobachter gesteuert oder beeinflusst zu werden. Solche Systeme müssen unter anderem über die Fähigkeit der Wahrnehmung, Kategorisierung, Lernen, Navigation, Gedächtnis und Handlungsauswahl verfügen. Die Integration dieser Kompetenzen in einem System, das sich autonom in einer Umwelt verhalten kann, so Todas Argument, würde zu neuen Einsichten über Intelligenz und Kognition führen.

Todas "Solitary Fungus Eater" ist eine Kreatur - in der heutigen Terminologie ein autonomer Agent - die auf einen weit entfernten Planeten geschickt wird, um Uran zu sammeln. Die Belohnung, die der Agent erhält, ist proportional zur Menge gesammelten Urans. Der Agent ernährt sich von einer speziellen Pilzart ("Fungus"), die auf dem Planeten wächst. Er hat zudem eine geeignete Sensorik, um seine Umgebung wahrnehmen zu können, sowie eine Motorik, die es ihm erlaubt, Uran einzusammeln und an eine Basisstation zu bringen. Diesem Szenario zufolge muss der komplette Agent *autonom* sein, da der Planet zu weit entfernt ist, um den Agenten fernsteuern zu können. Er muss zudem *situiert* sein, d.h. die Welt aus seiner eigenen Perspektive wahrnehmen, da die einzige verfügbare Information über die Welt von seinen eigenen Sensoren stammt. Der Agent muss ferner über einen *Körper* verfügen, da er sonst kein Uran einsammeln könnte. Schliesslich muss er *adaptiv* sein, da die Planetenlandschaft nur partiell bekannt ist, und er auch lernen muss, zwischen Uran, Pilzen und Hindernissen zu unterscheiden. Diese Konzepte - Autonomie, Situativität, Verkörperung ("embodiment"), und Adaptivität - sind von grundlegender Bedeutung für die embodied cognitive science. Todas Ziel war entsprechend, über komplette Systeme, die sich selbstständig in einer Umgebung verhalten, neue Einsichten in Prinzipien der Intelligenz zu gewinnen.

Historisch ist ein weiteres Buch von zentraler Bedeutung für den neuen Ansatz: Valentino Braitenbergs "Vehicles - Experiments in Synthetic Psychology" (1984). In einer Reihe von Gedankenexperimenten beschreibt Braitenberg 14 "Vehikel" (d.h. autonome Agenten) von zunehmender Komplexität. Es ergibt sich, dass schon sehr einfache Systeme zu sehr komplexem Ver-

halten führen können. Das einfachste Vehikel verfügt nur über einen Sensor und einen Motor. In Abhängigkeit von der Verdrahtung zwischen Sensor und Motor zeigt ein solches System qualitativ unterschiedliche Verhaltensweisen. Wird der Sensor, z.B. ein Lichtsensor, durch ein positives Gewicht mit dem Motor verknüpft, wird sich das Vehikel mit zunehmender Geschwindigkeit zur Lichtquelle hinbewegen. Wird der gleiche Sensor durch ein negatives Gewicht mit dem Motor verknüpft, wird es sich von der Lichtquelle wegbewegen. Ersteres Verhalten kann von aussen als "aggressiv", das letztere als "ängstlich" beschrieben werden. Braitenbergs weitere Vehikel zeichnen sich durch immer komplexere Verknüpfungen von mehreren Sensoren mit einem oder zwei Motoren aus.

Im Unterschied zu herkömmlichen Modellierungsansätzen - wie z.B. dem Konnektionismus - zeichnen sich autonome Agenten also dadurch aus, dass Beobachter (Designer) aus der Schleife zwischen Output und Input herausfallen. Mit anderen Worten, die Schleife von Input-Output-Input wird geschlossen ("komplett"), was eine Anzahl fundamentaler *Anforderungen für das Design* solcher Agenten mit sich bringt, von denen wir hier nur die wichtigsten herausstreichen können (vgl. Scheier & Pfeifer, 1999).

(1) Das System erhält den Input aus seiner Umwelt durch seine Sensoren. Im Unterschied zu konnektionistischen Modellen, die *jedes* Inputmuster verarbeiten und lernen, muss ein solches System deshalb in der Lage sein festzustellen, welche Teile des (typischerweise) kontinuierlich ändernden und hochdimensionalen Inputraums überhaupt relevant sind. So muss es z.B. Rauschen von Signalen trennen, und die Signale in solche, die für die momentane Aufgabe von Relevanz sind, und andere, irrelevante, Signale aufteilen (das oben genannte Stabilitätsproblem). Mit anderen Worten, ein solches System muss in der Regel über Figur-Grund-Unterscheidungen und *Aufmerksamkeitsprozesse* verfügen.

(2) Es gibt keine klare Unterscheidung zwischen Lern- und Testphase, wie sie in Untersuchungen zu konnektionistischen Systemen üblich ist. Vielmehr muss ein autonomer Agent immer lernen (sog. *inkrementelles Lernen*), wenn er wirklich adaptiv sein soll. Dies führt zu wesentlich neuen Anforderungen an die Lerntheorie und Modellierung. So müssen in autonomen Agenten eingesetzte neuronale Netze in der Lage sein, kontinuierlich neue Dinge zu lernen, ohne jedoch zu saturieren. Entsprechend kommt dem Vergessen eine zentrale Rolle zu, wobei sich wiederum die Frage stellt, welche Dinge vergessen werden sollen (ein Stabilitäts-Flexibilitäts-Dilemma). Hier sind also *Gedächtnismodelle* gefragt, die eine solche Dynamik in einem autonomen Agenten gewährleisten können. Anders als in der Mehrzahl der konnektionistischen Applikationen kann das Lernen nicht supervidiert sein, da der Agent selbstständig lernen muss, um adaptiv und situiert zu sein.

(3) Der Output des Systems sind konkrete motorische Aktionen mittels der Aktoren des Systems (z.B. Greifarme oder Finger). Die zentrale Anforderung ist es ja, ein komplettes System, das von der Sensorik bis hin zur Motorik reicht, zu entwerfen. Es stellt sich also die fundamentale Frage, wie perzeptive und kognitive Prozesse auf motorische Prozesse abgebildet werden sollen. Das Problem lässt sich wiederum mittels konnektionistischer Modelle verdeutlichen. In diesen gilt

beispielsweise der Kategorisierungsvorgang als abgeschlossen, wenn das neuronale Netz einen Knoten der Ausgabeschicht, die die Kategorien repräsentiert, aktiviert. Das Netz antwortet also auf einen Stimulus durch die Aktivierung eines solchen Knotens, die dann vom Designer interpretiert werden muss: das Netz generiert kein eigenes Verhalten. Dies lässt sich im Falle der autonomen Agenten nicht mehr praktizieren, da diese ohne die Hilfe des Designers auskommen müssen. Die fundamentale Frage ist dann, wie Kategorien und Handlung repräsentiert werden sollen, damit kohärentes Verhalten resultiert. Konkret muss der Kategorisierungsmechanismus in die Gesamtarchitektur des Agenten eingebettet werden.

(4) Der Output des Systems bestimmt zu einem grossen Teil den nächsten Input. Dies hat zur Folge, dass das System bezüglich seines eigenen Outputs konsistent sein muss, da einmal begangene Fehler in Fehler beim nächsten Input münden, und längerfristig zu sinnlosem Verhalten führen können. Wegen dieser *Rekursivität* ist es also nicht beliebig, ob und welche Art von Fehler ein Agent in seinem Verhalten macht. Dies folgt wieder aus der Tatsache, dass autonome Agenten komplette Systeme sind. Es zeigte sich jedoch beim Bau solcher Agenten, dass diese Anforderung gewinnbringend für das Lernen ausgenutzt werden kann. Anstatt die Inputdaten rein passiv registrieren zu müssen, kann ein autonomer Agent seinen eigenen sensorischen Input generieren. Dies kann bei angemessenen Strategien zu einer dramatischen Vereinfachung des Wahrnehmungs- und Lernproblems führen.

Zusammengefasst führt die agentenbasierte Modellierung und Theoriebildung zu einer Reihe von neuen Fragestellungen, die sich mit verschiedenen Teilgebieten der Psychologie überschneiden. Angesprochen wurden Prozesse der Aufmerksamkeit, des inkrementellen Lernens und Vergessens, neue Gedächtnismodelle, Kategorisierung und die Schnittstellen zu Sensorik und Motorik. Diese Liste ist nur ein Ausschnitt der möglichen Bezüge zur Psychologie. Autonome Agenten können somit - abgesehen von den industriell-praktischen Möglichkeiten der Robotik - als Modelle für psychologische Systeme eingesetzt werden.

### 3. Handlung und Selbstorganisation: Konzeptualisierung eines kognitiven Systems

Bisher haben wir untersucht, in welcher Weise die embodied cognitive science sich vom - vor allem auch in der Psychologie - vorherrschenden Symbolverarbeitungsansatz abhebt. Die Problematik des symbol grounding, des gewählten Bezugssystems und der kombinatorischen Explosion verdeutlichen Schwachpunkte des klassischen Ansatzes. Wie aber kann die Schleife zwischen Kognition und Umwelt geschlossen werden, wie muss ein komplettes System, das keinen mediierenden Homunkulus mehr enthält, konzeptuell gefasst werden? Offensichtlich ist es mit der Feststellung, dass die Umwelteinbettung und die Körperlichkeit von handelnden Agenten mehr zu beachten seien, nicht getan. Eine solche Forderung wäre auch in der Psychologie keineswegs neu oder originell. Die Frage ist vielmehr, *wie* eine solche Umwelteinbettung theoretisch aussehen kann.

Zunächst versuchen wir das Verhältnis von kognitivem System und Umwelt so zu bestimmen, dass die in Abschnitt 1 genannten Probleme nicht auftreten. Wie können Adaptivität und ziel-

gerichtetes Verhalten entstehen, *ohne* dass beides im Sinne einer "intentional stance" (Dennett, 1987) als gegeben bereits vorausgesetzt wird? Eine solche intentionalistische Terminologie wäre ja für die synthetische Psychologie, also für das Design autonomer Agenten, nicht ausreichend. Entsprechendes gilt für die Handlungspsychologie: das Konzept der Handlung enthält bereits in seiner Definition, was sich als schwierigster Teil eines synthetischen Vorgehens erwiesen hat, nämlich Autonomie und Adaptivität zu implementieren. Diese beiden Eigenschaften, die intelligente autonome Agenten (z.B. Tiere) kennzeichnen, fehlen den bisherigen Artefakten der Künstlichen-Intelligenz-Forschung weitgehend.

Unsere Frage ist damit die folgende: Unter welchen Bedingungen zeigen Systeme allgemein die geforderten Eigenschaften der Autonomie und Adaptivität? Die Beantwortung dieser Frage sollte unserer Meinung nach Hinweise auf eine Methode ergeben, mit deren Hilfe dann das Design künstlicher Kognition in autonomen Agenten angegangen werden kann (Tschacher & Scheier, 1996). Zugleich wäre auf diese Weise das Fundament für eine erklärende, über die intentional stance hinausgehende Theorie der Kognition gelegt, was für die allgemeine Psychologie bedeutsam werden kann.

Autonomie: Die Eigenschaft, spontan und autonom Muster zu generieren, ist eine mittlerweile gut untersuchte Eigenschaft komplexer dynamischer Systeme (Haken, 1990). Interdisziplinäre Forschungsprogramme wie die Synergetik nennen als Voraussetzungen für die Erzeugung emergenter Ordnung (Selbstorganisation) insbesondere ein spezielles Verhältnis der Systeme zu ihrer Umwelt: sie sind umweltoffen, werden etwa ständig durch Ströme von Energie "angetrieben". Dieser Energiedurchsatz durch ein dynamisches System wird mittels sogenannter Kontrollparameter quantifiziert. Hierbei ist jedoch das Verhältnis des Systems zu den Kontrollparametern nicht eines der "Kontrolle" im engeren Sinn, vielmehr stellen diese Parameter lediglich unspezifische Randbedingungen dar, unter deren Einfluss das komplexe System eigenaktiv (also autonom, und wenn man so will: kreativ) geordnete Muster zu erzeugen beginnt. Das Schema eines solchen synergetischen Systems ist in Abb. 1 dargestellt.

Intensiv erforschte Beispiele für selbstorganisierte Muster in komplexen Systemen sind etwa der Laser in der Optik oder die geordneten Konvektionsmuster (Bènard-Konvektion), die in Flüssigkeiten oder atmosphärischen Luftschichten bei Energiezufuhr auftreten. Als Beispiele mit direktem Bezug zur Psychologie sind die Bildung von Gestalten in der Wahrnehmung (Kruse & Stadler, 1995; Kriz, 1997) und die Etablierung von motorischen Mustern (Kelso, 1995; Leist, 1999) zu nennen. Letztere wurden von Haken, Kelso & Bunz (1985) am einfachen Paradigma der gleichzeitigen Bewegung der Zeigefinger beider Hände einer Person mathematisch modelliert. Es zeigt sich, dass die beiden Finger nur synchron, im Takt miteinander hin- und herbewegt werden können, und dies entweder parallel oder anti-parallel. Wenn man die Frequenz der Bewegungen - den Kontrollparameter des Systems - verändert, indem man etwa ein Metronom schneller schlagen lässt, ergeben sich charakteristische Übergänge zwischen dem parallelen und anti-parallelen Bewegungsmuster. Diese beiden Bewegungsmuster sind als die Ordner des Systems anzusehen; sie sind stabil gegen Störeinflüsse und weisen die

charakteristischen Eigenschaften nichtlinearer Systeme auf (Hysterese, "kritisches Langsamerwerden").

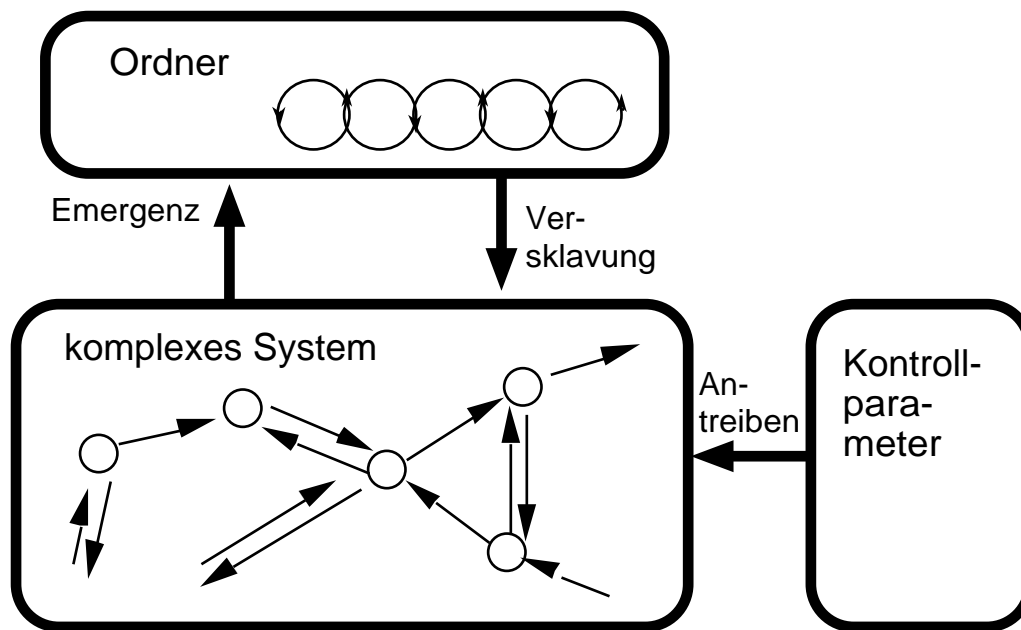


Abb. 1. Schema eines synergetischen Systems

(2) Adaptivität: Das eben dargestellte Phänomen der Selbstorganisation beschreibt, dass unter bestimmten Umständen komplexe Systeme gegenüber ihrer Umwelt autonom werden, indem sie spontan geordnete und stabile Muster erzeugen. Diese Muster sind damit emergente Eigenschaften dieser Systeme; die naturwissenschaftliche Systemtheorie hat hier gezeigt, dass Emergenz kein esoterischer Begriff ist, sondern eine ubiquitäre Eigenschaft physikalischer und biologischer komplexer Systeme.

Das Verhältnis des Systems zu seiner Umwelt wäre allerdings zu kurz bestimmt, würde man lediglich die Tatsache betrachten, dass irgendeine Form von selbstorganisierter Musterbildung stattfindet. Ein wesentlicher Aspekt ist der durch die Musterbildung *systematisch veränderte* Bezug zur Umwelt des Systems, d.h. zu den Kontrollparametern. Die Musterbildung erfolgt dabei nämlich stets in der Weise, dass die für dissipative Systeme charakteristische Ferne vom thermodynamischen Gleichgewicht maximal reduziert wird. Übersetzt man "Ferne vom thermodynamischen Gleichgewicht" mit der Metapher "Spannung", so bilden sich stets diejenigen Muster, die der Spannungsreduktion dienen. Das anti-parallele Bewegungsmuster der Finger genügt den Anforderungen der höheren Taktfrequenz besser (ist auch subjektiv weniger anstrengend), entsprechend wie etwa auch Galopp das ökonomischere Muster bei mit hoher Geschwindigkeit laufenden Vierbeinern ist. Selbstorganisation (Musterbildung, autonome Ordnungsproduktion) folgt also zusätzlich einem Optimalitätsprinzip (Tschacher, 1997). Swenson & Turvey (1991) leiten dieses Optimalitätsprinzip der (lokalen) Ordnungsproduktion aus allgemeinen thermodynamischen Überlegungen ab: Selbstorganisierte Muster entstehen "(...) because order produces entropy faster than disorder." (S. 345). Sie sehen dieses Prinzip als Grundlage der Darwinschen Evolutionstheorie: „The world is in the order production business, including the business of pro-

ducing living things and their perception and action capacities (...).“ Dieses Optimalitätsprinzip ist gemeint, wenn selbstorganisierende Systeme als "adaptiv" gekennzeichnet werden.

An dieser Stelle zeichnet sich für unsere Fragestellung ab, dass durch die Selbstorganisationsperspektive eine alternative Grundlagentheorie auch für Kognitionsprozesse entsteht. Dieser Ansatz wird in der aktuellen Diskussion der Kognitionswissenschaft auch als "dynamical systems explanation" bezeichnet (Clark, 1997a). Der Vorteil der Theorie dynamischer Systeme ist nicht nur allgemein, dass sie eine interdisziplinäre Theorie grosser Reichweite ist, sondern auch speziell, dass sie prüfbare Vorhersagen im Bereich von Verhalten und Kognition erlaubt (z.B. Haken et al., 1985). Wir können deshalb mit Haken (1988) die These aufstellen, dass Selbstorganisation auch bei der Informationsverarbeitung biologischer Systeme eine hervorragende Rolle spielt. Der Begriff Informationsverarbeitung bekommt dabei eine radikal neue Grundlegung, die sich deutlich vom herkömmlichen, repräsentations- und regelbasierten Ansatz unterscheidet.

Durch diese Zugangsweise werden ausserdem Anknüpfungspunkte an in der Psychologie bereits entwickelte Ansätze wie die ökologische Wahrnehmungstheorie (Gibson, 1979; vgl. Reed, 1997) und die Gestalttheorie (Lewin, 1936; vgl. Tschacher, 1997) hergestellt. Der Bezug zur Gibsonschen Theorie der "direkten Wahrnehmung" kann folgendermassen verdeutlicht werden: als Kontrollparameter fungieren charakteristische, invariante Merkmale der Umwelt, die bei Gibson (1979) Affordanz genannt werden (Affordanz ist abgeleitet von "to afford", da gewisse Umwelteigenschaften Verhalten direkt "anbieten"; die Begriffsgeschichte geht zurück auf das Konzept "Aufforderungscharakter" bei Lewin, dort später synonym mit "Valenz"). Affordanz werden nach Gibson direkt aus der Umwelt aufgelesen ("direct pick-up of information"); es ist daher keine Zwischeninstanz für irgendeine Form der Repräsentation notwendig, ganz wie auch die Kontrollparameter eines selbstorganisierenden Systems nicht an irgendeiner Stelle in einen systeminternen Code übersetzt werden müssen: sie wirken einfach direkt ein. Dieser Ansatz ist in Zusammenhang mit der aktuellen Diskussion in der Kognitionstheorie bestechend, denn er vermeidet die Probleme, die mit dem Konzept einer internen Repräsentation wie zugleich auch dem konkurrierenden Konzept einer Konstruktion von Umwelt einhergehen. Die Welt ist ihr eigenes bestes Modell (Brooks, 1991).

Brooks vertritt in seinem Subsumptionsansatz für das Design kognitiver autonomer Agenten, dass das Fundament der Intelligenz aus multiplen solchen repräsentationsfreien sensomotorischen Schleifen ("layers") besteht. Jeder layer spricht auf eine oder wenige spezifische Affordanz an und führt ein spezifisches einfaches Verhalten durch (diese Konzeption entspricht im Übrigen weitgehend der Definition von "agent" bei Minsky, 1985). Clark (1997a, S. 32) wendet in seiner Diskussion des Subsumptionsansatzes ein, dass ein Kohärenzproblem dann auftauche, wenn das System durch sehr viele Schleifen komplex werde: wie kann das Verhalten koordiniert werden, wenn sehr viele Subsysteme zusammenwirken, und ein weitgefächertes Verhalten des Gesamtsystems möglich und angesichts einer vielgestaltigen Umwelt mit vielen Affordanz auch erforderlich ist? Die Versuchung sei dann gross, die ursprüngliche Vision des

Zusammenspiels vieler direkt wahrnehmender und handelnder Subsysteme der herkömmlichen Vorstellung eines zentralen symbolischen Kontroll- und Planungssystems zu opfern. U.E. kann jedoch diese Kohärenz durch die oben diskutierten Prinzipien der Selbstorganisation von kooperierenden oder auch konkurrierenden Schleifen oder "Verhaltenskernen" (Tschacher, 1997) bereitgestellt werden. Adaptives "zielgerichtetes" Verhalten entsteht dann aus dem synergetischen Zusammenspiel vieler solcher Schleifen oder der Selektion der zur Reduktion der Affordanzen geeignetsten Schleifen (Abb. 2).

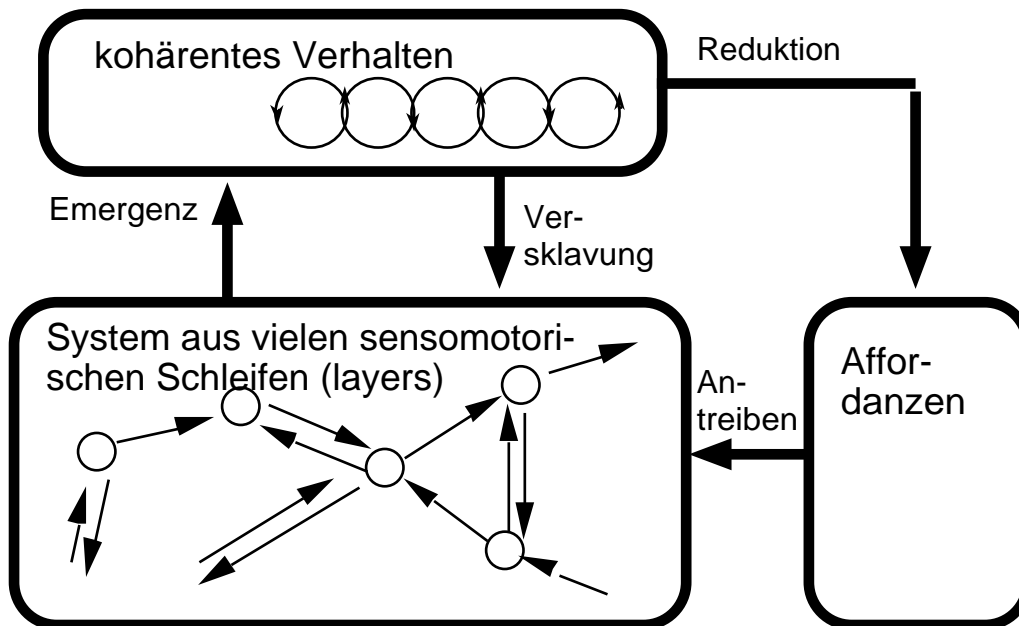


Abb. 2. Schema eines kognitiven Systems aus der Sicht der embodied cognitive science.

Bei komplexerem, z.B. menschlichem Verhalten wird diese Kohärenz zusätzlich gefördert durch die sozial und kulturell strukturierte Umwelt und insbesondere durch die evolutionär folgenreiche "Erfindung" der Sprache. Sprache erlaubt eine Art der symbolischen Repräsentation dadurch, dass sensomotorische Schleifen nicht tatsächlich ausgeführt werden müssen, sondern "emuliert" werden können. Wir können jedoch hier auf die Konzeption von Sprache innerhalb einer embodied cognitive science nicht weiter eingehen.

#### 4. Implikationen für die Psychologie

Für die Psychologie war in den 60er Jahren von Belang, sich aus der Sterilität des Behaviorismus zu einer Theorie zu emanzipieren, die eine wissenschaftliche Behandlung des Mentalen zuließ. Der Informationsverarbeitungsansatz in Gestalt der physical symbol systems hypothesis (Newell & Simon, 1972) schien dafür ideal geschaffen, denn er erlaubte die Modellierung kognitiver Prozesse unabhängig von der Maschinerie, in der diese Prozesse implementiert sein sollten. Wenn "Kognition" auf einem Computer "laufen" konnte, konnte kaum mehr von Seiten der Behavio-

risten argumentiert werden, die Vorstellung, hierzu analoge kognitive Prozesse könnten in einem Gehirn stattfinden, sei mentalistisch und unwissenschaftlich. Über diesem eingängigen Argument wurde lange die für die Psychologie zentrale Bedeutung der *Autonomie* der Informationsverarbeitung vernachlässigt. Während es nämlich für viele Applikationen der klassischen KI (stillschweigend) klar ist, dass die Ergebnisse der Datenverarbeitung durch einen menschlichen Benutzer noch interpretiert werden müssen, beseitigt dies doch den erklärenden Wert als psychologische Grundlagenannahme weitgehend. Mit anderen Worten, wenn der Beobachter nicht aus der Schleife wegfallen kann, wenn "symbol grounding" nur durch seine Interpretation erfolgen kann, bleibt die Informationsverarbeitungspsychologie insgesamt auf einen Homunkulus angewiesen<sup>3</sup>.

Der ausgeführte, auf der Theorie dynamischer Systeme beruhende Ansatz der embodied cognitive science hat weitgehende Implikationen für Anwendungen der Kognitionswissenschaft. Wir wollen hier davon absehen, dass dieser Ansatz eine grundlegende Neuorientierung im Gebiet der KI bewirkt hat und vermutlich weiterhin bewirken wird; dies ist in den ersten Abschnitten bereits angeklungen. Stattdessen wollen wir hier abschliessend darauf eingehen, welche Implikationen für psychologische Anwendungsfelder entstehen.

Zunächst stellen wir fest, dass nur gerade die ersten Vorboten der beschriebenen Neuorientierung in der kognitiven Psychologie angekommen sind. Die Macht der computationalistischen Metapher der Informationsverarbeitung ist bislang fast ungebrochen (Opwis & Lüer, 1996; Pinker, 1997). Wenn in der Kognitionswissenschaft von der "dynamical challenge" gesprochen wird (Clark, 1997b), ist in der Psychologie nach wie vor lediglich in einigen vor allem klinischen Anwendungsgebieten von einem zudem kaum wissenschaftlich-empirisch ausgeführten "systemischen Denken" die Rede.

Ein wesentlicher Teil der Diskussion, zu der die embodied cognitive science veranlasst hat, findet im Bereich der Konzeptualisierung von "kognitiver Repräsentation" und "Wissen" statt. Reinmann-Rothmeier & Mandl (1996) geben einen Überblick zu den verschiedenen Theorien, unter denen Wissen und Handeln in der Psychologie derzeit gesehen wird. Sie unterscheiden im Wesentlichen zwischen einer intentional-handlungstheoretischen (z.B. Heckhausen, Gollwitzer & Weinert, 1987) und einer (wohlgemerkt im Sinne des Computationalismus) systemtheoretischen Perspektive (Anderson, 1983). Beiden Perspektiven ist gemein, dass sie fast vollständig auf unterschiedlichen Konzepten der *internen* Repräsentation beruhen; Kognition ist entsprechend Manipulation eines "innen" abgebildeten Weltmodells. Daran ändert im übrigen auch die derzeitig verbreitete Hinwendung zu einer konstruktivistischen Sichtweise nichts. Im Gegenteil verschärft sich im Konstruktivismus die Problematik des "symbol grounding" dadurch, dass das Handeln in einer realen Welt aufgrund einer vom Handelnden intern konstruierten (statt repräsentierten) "Wirklichkeit" verstanden werden soll.

---

<sup>3</sup> Interessanterweise wurde die Problematik eines Homunkulus oder "Zwangsordners" bei psychologischen Erklärungen bereits durch die Gestaltpsychologie wiederholt thematisiert (Köhler, 1947).



Der hier vertretene kognitionspsychologische Ansatz baut dagegen auf das oben beschriebene Affordanzkonzept. Als kognitiver Grundeinheit geht dieser Ansatz stets von situierten kognitiven Entitäten aus, die als komplette sensomotorische Schleifen oder "sensomotorische Koordinationen" (Clancey, 1998) konzeptualisiert werden können. Die Interaktion eines Agenten mit seiner Umwelt ist unhintergebar. Entsprechend ist auch Wissen nicht eigentlich im Kopf vorhanden, sondern liegt in Form einer Kopplung zwischen Wahrnehmung und Handlung in der Umwelt des Agenten vor (diese Umwelt ist zusätzlich noch durch den Agenten selbst strukturiert). Diese strukturierte Umwelt spielt ebenso wie der Körper (als der Arena sensomotorischer Schleifen) eine entscheidende Rolle: die Umwelt ist zu verstehen als ökologische Nische, die durch vorangegangene Kopplungen entstanden ist (Reed, 1997).

Diese Sicht führt zu Vorhersagen, die sich empirisch prüfen lassen. Eine betrifft das in der KI-Diskussion sogenannte "externe Gedächtnis": da autonome Agenten keine expliziten Weltmodelle aufbauen (müssen), müssen sie durch spezifische Interaktionen mit der Umwelt die Welt selbst als externen "Speicher" benutzen. Diese Vorhersage auch für menschliche Kognition wird durch verschiedene neuere Studien gestützt.

In einer Reihe von Untersuchungen haben Dana Ballard und Kollegen die Verwaltung von Gedächtnisressourcen bei bestimmten Aufgaben untersucht (Ballard, Hayhö & Pelz, 1995). Die Versuchspersonen mussten dabei eine Vorlage aus verschiedenfarbigen Klötzen nachbauen. Es interessierte die Frage, wie häufig sie dabei auf die Vorlage (mit Augenbewegungen) referenzierten. Wie sich zeigte, schauten die Versuchspersonen deutlich häufiger auf die Vorlage, als vor dem Hintergrund eines internen Speichers erwartet werden könnte. Anstatt die Vorlage intern zu repräsentieren, benutzten sie sie direkt. Mit anderen Worten, sie benutzten die Welt als externen Speicher.

Ein weiteres Phänomen, das darauf schliessen lässt, dass Menschen sich häufig auf interaktionelle Mechanismen abstützen, ist "change blindness" (z.B. Simons & Levin, 1998). "Change blindness" meint die Unfähigkeit, Veränderungen eines Objektes oder einer Szene zu erkennen. Das Ziel dieses Forschungszweiges ist es, die Eigenschaften von Repräsentationen besser zu verstehen. Experimente mit verschiedensten Methoden und Reizkonfigurationen haben dabei zu konvergenten Resultaten geführt, nämlich dass erstaunlich wenig visuelle Information von einem Moment zum nächsten repräsentiert wird. Mit anderen Worten, die Erinnerung an Eigenschaften und Merkmale von Objekten in visuellen Szenen ist relativ transient. Die Schlussfolgerungen von Simons und Levin sind dabei konsistent mit der Annahme eines externen Gedächtnisses für visuelle Informationen. Die Autoren vertreten, dass Menschen keine detaillierten Repräsentationen ihrer visuellen Umwelt aufbauen. Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass primär die Essenz, die "Zuhandenheit" einer Situation (also die vorliegenden Affordanzen) wahrgenommen wird. So können unzuverlässige, transiente Objekteigenschaften problemlos gefiltert werden, und trotzdem die Hauptcharakteristika einer Situation wahrgenommen werden.

Eine analoge Schlussfolgerung ziehen auch Horowitz & Wolfe (1998) aus ihren Experimenten zur Rolle des Gedächtnisses in visuellen Suchaufgaben ("visual search"): "Our results show that

the visual system does not accumulate information about object identity over time during a search episode. Instead, the visual system seems to exist in a sort of eternal present.(...) The structure of the world makes it unnecessary to build fully elaborated visual representations in the head." (S. 577). Theorien der visuellen Suche gehen in der Regel davon aus, dass Menschen auf der Suche nach einem Zielobjekt schon wahrgenommene, irrelevante Objekte erinnern. Diese Strategie macht intuitiv Sinn, da die Aufmerksamkeit nicht mehr auf Orte mit irrelevanten Objekten gerichtet werden muss. Wie sich jedoch in den Experimenten von Horowitz und Wolfe zeigt, verändert sich die Leistung der Versuchspersonen nicht, wenn die Objekte des Suchraumes alle 100 Millisekunden an zufällige Orte verschoben werden. Mit anderen Worten, würde die Leistung von Erinnerungen an schon betrachtete Objekte abhängen, müssten sich drastische Leistungseinbußen in Aufgaben mit verschobenen Objekten zeigen. Es erweist sich jedoch, dass die Leistung für statische und dynamische Suchaufgaben identisch ist. Die zufällige Verschiebung aller Objekte hat keinen Einfluss auf die Suchzeiten, was wiederum darauf schliessen lässt, dass hier interaktionelle statt repräsentationale Mechanismen am Werk sind.

Auch in der Entwicklungspsychologie lassen sich die aufgeführten Gedanken und Konzepte fruchtbar machen, wie eine Reihe von Studien von Esther Thelen und Kollegen zeigen (Smith et al., 1999; Thelen et al., im Druck). Im Mittelpunkt stand dabei die klassische A-not-B-Aufgabe, die ursprünglich von Jean Piaget eingeführt wurde, seither jedoch in unzähligen Studien weiteruntersucht wurde. Die Versuchsanordnung besteht aus einer Schachtel mit zwei identischen Löchern ("A" und "B"). Der Experimentator versteckt vor den Augen des Kindes ein Spielzeug in Loch A, verdeckt das Loch, und schiebt - mit einer gewissen Verzögerung (typischerweise drei Sekunden) - die Schachtel in Greifweite zum Kind, das in der Regel nach dem Spielzeug greift. Dieses Prozedere wird zwei- bis viermal wiederholt, wonach das Spielzeug im Loch B versteckt wird (ansonsten bleibt jedoch alles identisch). Der überraschende und äusserst robuste Effekt ist nun, dass Kinder im Alter von ca. 7-10 Monaten das Spielzeug im Loch A suchen, obwohl sie gesehen haben, dass es im Loch B versteckt wurde. Piaget glaubte, dass dieser "Fehler" mit einer mangelnden Fähigkeit zur Objektrepräsentation in Zusammenhang steht. Ohne hier auf die Details der weitergehenden Untersuchungen eingehen zu wollen, sei angemerkt, dass der Grossteil dieser Studien bislang ebenfalls davon ausging, dass dieser Fehler mit mangelndem Wissen oder fehlender Handlungskompetenz zu erklären ist. Esther Thelen hat nun einen anderen Weg eingeschlagen, um dieses Phänomen zu erklären. Im Wesentlichen beruht ihr Ansatz auf Konzepten der embodied cognitive science und der Theorie dynamischer Systeme. Anstatt den Fehler als mangelnde Fähigkeit zur Informationsverarbeitung zu konzeptualisieren, fokussierte sie auf das Verhalten der Kinder. Wie sie zeigen konnte, ergibt sich der Fehler auch ohne dass ein Spielzeug versteckt wird, also ohne ein Objekt, das es zu repräsentieren gäbe. Vielmehr zeigte sich, dass die zentrale Variable die Anzahl der Greifbewegungen des Kindes ist. Je häufiger das Kind nach A griff, desto grösser die Wahrscheinlichkeit, dass es den A-not-B-Fehler zeigte. Zudem verschwand der Fehler, wenn man die Postur des Kindes vor dem Greifen nach dem Loch B änderte, es zum Beispiel auf die Beine stellte. Der Fehler ist also abhängig von der konkreten Körperposition des Kindes. Diese und andere Resultate wurden kürzlich in ein Modell

integriert, das im Wesentlichen die Methoden des dynamischen Ansatzes der embodied cognitive science benutzt (Thelen et al., im Druck).

Ingesamt zeigt sich, dass einige der zentralen Implikationen der embodied cognitive science, zum Beispiel die Hypothese eines externen Gedächtnisses, empirische Unterstützung finden. Es sind allerdings noch weitere Studien nötig, um diese Konzepte empirisch zu fundieren. Ferner eröffnen sich neue Möglichkeiten durch die Nutzung des Instruments der autonomen Agenten in der psychologischen Modellbildung. Hierdurch können Verhalten und zugrundeliegende Mechanismen auf mehreren Ebenen gleichzeitig zu studieren. So zeigen z.B. Almassy, Sporns & Edelman (1998), wie man Roboter gewinnbringend für die neuropsychologische Forschung einsetzen kann. Sie fanden unter anderem, dass in ihrem Modell gewisse Charakteristika visueller Neuronen (z.B. bestimmte Invarianzen) nur dann entstehen, wenn sie in ein aktives System eingebettet sind.

Die Implikationen der hier vorgestellten Sichtweise gehen über die Grundlagenforschung hinaus, und reichen in verschiedene psychologische Anwendungsgebiete hinein. Dies soll abschliessend an zwei Beispielen psychologischer Anwendung umrissen werden: Pädagogik und Psychotherapie.

**Pädagogik:** In der Pädagogik ist der Erwerb, die Anwendung und die Korrektur von Wissen zentral. Ein wesentliches praktisches Problem besteht im Wissenstransfer: wie kann die erwiesenermassen mangelhafte Übertragung von kognitivem "Schulwissen" in die Alltags- oder Berufswelt verbessert werden (Renkl, 1996)? Eine Neufassung dessen, was als "Wissen" definiert wird, muss daher weitgehende Folgen für pädagogische Fragen nach sich ziehen, insbesondere dann, wenn pädagogische Interventionen von einem kognitionspsychologischen Standpunkt her konzeptualisiert werden.

Aus der Perspektive der embodied cognitive science wird schnell ersichtlich, weshalb Wissenstransfer nicht "automatisch" vonstatten gehen kann. Die Situation "Schule" und die Situation "Alltag" bezeichnen deutlich unterschiedliche ökologische Nischen für einen lernenden oder anwendenden Agenten; die Affordanzen beider Situationen sind nicht deckungsgleich - nur eine computationale Sichtweise, die sich des Problems des "symbol grounding" nicht bewusst ist, kann erwarten lassen, dass schulisches Wissen in nichtschulischen Situationen mühelos reproduzierbar wäre. Für die didaktische und die Anwendungssituation müssen unterschiedliche sensorimotorische Schleifen ausgebildet werden.

Die Folgerungen für die Didaktik und die pädagogische Vermittlungssituation sind naheliegend. Die didaktische Situation muss sich an die *Anwendungssituation bezüglich der Affordanzen* annähern. Das bedeutet, dass es nicht genügt, wie in mathematischen Textaufgaben abstrakte Platzhalter (x,y,z) durch linguistische Symbole (Äpfel, Birnen, Dollar) zu ersetzen; stattdessen ist es für den Wissenstransfer erforderlich, die motivationale Situation selbst umzugestalten. Dies

geschieht etwa im Konzept des Lernens in der Beziehung des Lehrlings zum Meister ("cognitive apprenticeship": Collins, Brown & Newman, 1989) und im Projektunterricht.

U. E. ist diese Angleichung der Affordanzen nicht notwendig nur einseitig, insofern als die Ausbildungssituation die beruflichen und sozialen Affordanzen stets nur nachzubilden hätte. Es kann durchaus ein (gesellschafts-)pädagogisches Ziel sein, die Alltags- und Berufsnischen nach und nach durch Erziehung, Fort- und Weiterbildung zu reformieren.

**Psychotherapie:** Das Problem des Wissenstransfers stellt sich auch in der klinischen Psychologie und Psychotherapieforschung. Es hat hier zumindest zwei Aspekte: Wie gelangt die behandlungswürdige Problematik in die therapeutische Situation; sowie: Wie können Therapieergebnisse in die Lebenswelt des Klienten transferiert werden? Der zweite Aspekt des Wissenstransfers ist dabei analog zu der oben aufgeworfenen pädagogischen Problematik. Dieses Transferproblem wird auch in der kognitiven Psychotherapie diskutiert (Kanfer, Reinecker & Schmelzer, 1996).

Innerhalb einer "Allgemeinen Theorie der Psychotherapie" (Orlinsky & Howard, 1987; Ambühl, 1993) werden verschiedene Dimensionen eines angenommenen schulenübergreifenden therapeutischen Wirkmechanismus unterschieden. Grawe (1997) nennt als solche grundlegenden Dimensionen Problembewältigung, Klärung, Problemaktualisierung und Ressourcenaktivierung.

Wenn man diese allgemeinen "Ingredienzien" erfolgreicher Psychotherapie auf dem Hintergrund der embodied cognitive science betrachtet, wird deutlich, dass lediglich die Dimension der Klärung sich vorwiegend auf *intern* repräsentierte kognitive Strukturen bezieht. Die Mehrzahl der therapeutischen Wirkdimensionen dagegen verweist auf den aktiven verhaltensmässigen Transfer in den Alltag (Problembewältigung), die konkrete Manifestation eines zu behandelnden Konflikts im therapeutischen Setting (Problemaktualisierung) sowie die Aufdeckung neuer relevanter Affordanzen bzw. Eröffnung und Erweiterung von Nischen des Verhaltens (Ressourcenaktivierung). Sogar die Klärungsdimension hat - neben der Veränderung von Repräsentationen im deklarativen Gedächtnis - zusätzlich bedeutsame Anteile einer *motivationalen* Klärung auf Seiten des Klienten, so dass auch innerhalb dieses Konzepts Prozesse angesprochen sind, die rein computationale Strukturen zugunsten der Thematisierung und Bearbeitung von Affordanzen überschreiten.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Einarbeitung der in Abschnitt 3 entwickelten Konzepte in die Psychotherapieforschung liegt in der Konsistenz bzw. Ordnung der im therapeutischen Kontext relevanten sozialen und kognitiven Systeme. Empirisch wurde gefunden (Tschacher, Scheier & Grawe, 1998), dass Psychotherapien unterschiedlicher Art eine Ordnungszunahme im Verlauf des Therapieprozesses aufweisen, deren Ausmass zudem mit dem Outcome positiv korreliert ist. Auf der Basis eines allgemeinspsychologischen Ansatzes (man denke etwa an die Fülle der Studien zur kognitiven Dissonanz) entwickelte Grawe (1998) einen theoretischen Rahmen, der die Inkonsistenzreduktion in Psychotherapie berücksichtigt. Hier wird deutlich, wie die oben

dargestellte Konzeptualisierung des kognitiven Systems als selbstorganisierendes System zum einen die klinische Theoriebildung beeinflusst (Inkonsistenzspannung bildet Störungsattraktoren aus), woraus wiederum eine Vielzahl neuer empirischer Fragen erwachsen (etwa zum Zusammenhang der Prozessvariable Konsistenz mit dem Therapieergebnis, zum konkreten therapeutischen Umgang mit Inkonsistenz).

Mit anderen Worten, die innerhalb der allgemeinen Theorie der Psychotherapie versuchte Integration der empirischen Ergebnisse der Psychotherapieforschung legt eine Sichtweise nahe, die sich klar von der Symbolverarbeitungsmetapher abhebt. Gerade diejenigen kognitiven Prozesse, die für die auf dieser konventionellen Metapher basierten Kognitionspsychologie am problematischsten sind, sind für erfolgreiche Psychotherapie offenbar am bedeutsamsten. Unsere Folgerung hieraus ist, dass erst eine Theorie situierter und "verkörperter" Kognition einen geeigneten Rahmen zur Weiterentwicklung der kognitiven Psychotherapie anbietet.

## 5. Diskussion

In dieser Arbeit wurde der Ansatz der embodied cognitive science vorgestellt, und einige Implikationen dieser Sicht auf Intelligenz für die psychologische Forschung und Anwendung herausgearbeitet. Im Gegensatz zur Symbolverarbeitungshypothese nimmt die embodied cognitive science an, dass der Körper und die Interaktion mit der Umwelt für Intelligenz entscheidend sind. Entsprechend benutzt sie als methodisches Hilfsmittel zur Modellierung von kognitiven Prozessen autonome Agenten wie etwa mobile Roboter. Autonome Agenten unterscheiden sich in wesentlichen Merkmalen von konnektionistischen Modellen, konnektionistische neuronale Netze können jedoch mit Gewinn in autonome Agenten integriert werden.

Obwohl wir an mehreren Stellen auf empirische Literatur hingewiesen haben, die mit den Grundannahmen der embodied cognitive science konsistent ist, bleibt als zur Zeit grösstes Hindernis für eine breite Akzeptanz in der Psychologie die noch in den Anfängen befindliche empirische Fundierung der oben diskutierten Konzepte. Die hier angedeutete neue theoretische Perspektive könnte dabei zu Experimenten führen, die den interaktionellen Aspekt von kognitiven Leistungen in den Vordergrund stellen. Im Bereich der visuellen Wahrnehmung haben Milner & Goodale (1995) argumentiert, dass das "theoretical commitment to vision qua perception" die Methodologie der Wahrnehmungsforschung entscheidend geprägt hat. Anstatt den Zusammenhang zwischen motorischem Output und visuellem Input zu untersuchen (also interaktionelle Prozesse), hat die Grosszahl der Studien auf Varianten der visuellen Diskrimination fokussiert. Nach diesem Paradigma wird angenommen, dass die motorischen Handlungen der Versuchspersonen für die Aufgabe irrelevant sind. In Tierversuchen ist es danach irrelevant, ob ein Tier pickt, springt, rennt, einen Knopf drückt usw. Entscheidend ist einzig, dass die Versuchsperson oder das Versuchstier zwischen den einzelnen visuellen Stimuli unterscheiden kann. Solche künstlich beschränkten Versuchsanordnungen werden jedoch dem situierten Charakter vieler kognitiver Prozesse wenig gerecht. Aus der Perspektive der embodied cognitive science läge es vielmehr

nahe, den Fokus auf die dynamischen Schleifen zwischen sensorischen, kognitiven und motorischen Prozessen zu legen.

Im Bereich der Gedächtnisforschung hat Glenberg (1997) die Frage gestellt, wozu Menschen Gedächtnis besitzen. Er schlägt vor, dass die Antwort im Bereich der Mensch-Umwelt-Interaktion zu suchen ist. Gedächtnis habe sich entwickelt, damit der Mensch erfolgreich und adaptiv mit seiner Umwelt interagieren kann. Entsprechend müsste sich der Fokus der empirischen Studien auf interaktionelle Aspekte hin verschieben. Einen ersten Ansatz hierzu stellen die schon erwähnten Studien von Ballard und Kollegen (1995) dar.

Insbesondere auch in den pädagogischen und klinisch-psychologischen Anwendungen zeigt es sich, dass die embodied cognitive science zu relevanten Fragen anregt. Mindestens ebenso wichtig wie der Erwerb von deklarativem Wissen ist der Transfer von Gelerntem in die Lebenswelt. Im Transferproblem ("symbol grounding") liegt gewissermassen der blinde Fleck der computationalen Sichtweise, der die weitere Forschung dazu motivieren sollte, Lern-Lernstrategien auf der Basis eines situierten (embodied) Ansatzes zu entwickeln und zu optimieren (Mandl, 1997). Entsprechendes gilt unserer Meinung nach für die klinische Psychologie: die Aufgabe psychologisch fundierter (kognitiver) Therapie ist nicht allein und nicht einmal hauptsächlich die Diagnose und Veränderung dysfunktionaler Kognitionen, wie dies noch in der "klassischen" kognitiven Verhaltenstherapie gesehen wurde. Wesentlich ist stattdessen die Aktualisierung der Störung im therapeutischen Setting, d.h. die körperliche und emotionale Aktivierung der problematischen sensomotorischen Muster. Diese aus unserer Sicht geforderte Situietheit ist etwa in expositionstherapeutischen Verfahren besonders deutlich verwirklicht. Wir vermuten, dass es auch bei anderen Interventionsmethoden nützlich sein wird, situative und interaktionelle Aspekte stärker zu gewichten. Der Denkansatz der embodied cognitive science bietet hier Hypothesen an, die ohne Weiteres einer empirischen Prüfung zugänglich sind.

Ob sich die An- und Einsichten der embodied cognitive science auch in die Psychologie hineinentwickeln werden, wird die Zukunft zeigen. Da man aus der Geschichte der Psychologie ihre Neigung kennt, den Entwicklungen der kybernetischen und Computer-Technologie mit Verspätung nachzufolgen, erscheint dies nicht unwahrscheinlich. Der grössere Nutzen könnte freilich entstehen, fände die Psychologie zu einer Rolle als impulsgebender Grundlagenwissenschaft für kognitive Modellierung und kognitive Technologie zurück.

## Literaturverzeichnis

- Almassy, N., Sporns, O. & Edelman, G. (1998). Behavioral Constraints in the Development of Neuronal Properties: A Cortical Model Embedded in a Real-World Device. *Cerebral Cortex*, 8, 346-361.
- Ambühl, H. (1993). Was ist therapeutisch an Psychotherapie? Eine empirische Überprüfung der Annahmen im "Generic Model of Psychotherapy". *Zeitschrift für Klinische Psychologie, Psychopathologie und Psychotherapie*, 36, 308-327.
- Anderson, J.R. (1983). *The Architecture of Cognition*. Cambridge: Harvard University Press.
- Atmanspacher, H. & Dalenoort, G.J. (Hrsg.)(1994). *Inside Versus Outside*. Berlin: Springer.
- Ballard, D.H., Hayhoe, M.M. & Pelz, J.B. (1995). Memory Representations in Natural Tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7, 66-80.
- Barsalou, L.D. (im Druck). Perceptual Symbol Systems. *Behavioral and Brain Sciences*. (s. WWW preprint archive).
- Bickhard, M.H. & Terveen, L. (1995). *Foundational Issues in Artificial Intelligence and Cognitive Science*. Amsterdam: North-Holland.
- Braitenberg, V. (1984). *Vehicles - Experiments in Synthetic Psychology*. Cambridge: MIT Press.
- Brooks, R.A. (1991). Intelligence without Representation. *Artificial Intelligence*, 47, 139-159.
- Caspar, F., Rothenfluh, T. & Segal, Z. (1992). The Appeal of Connectionism for Clinical Psychology. *Clinical Psychology Review*, 12, 719-762.
- Clancey, W.J. (1991). The Frame-of-Reference Problem in the Design of Intelligent Machines. In K. VanLehn (Hrsg.), *Architectures for Intelligence*, (357-423). Hillsdale: Erlbaum.
- Clancey, W.J. (1998). *Situated Cognition*. Oxford: Oxford University Press.
- Clark, A. (1997a). *Being There: Putting Brain, Body, and World Together Again*. Cambridge: MIT Press.
- Clark, A. (1997b). The Dynamical Challenge. *Cognitive Science*, 21, 461-481.
- Collins, A., Brown, J.S. & Newman, S.E. (1989). Cognitive Apprenticeship: Teaching the Crafts of Reading, Writing, and Mathematics. In L.B. Resnick (Hrsg.), *Knowing, Learning, and Instruction: Essays in Honor of Robert Glaser*, (453-494). Hillsdale: Erlbaum.
- Dennett, D.C. (1984). Cognitive Wheels: The Frame Problem of AI. In C. Hookway (Hrsg.) *Minds, Machines and Evolution*, (129-151). Cambridge: Cambridge University Press.
- Dennett, D.C. (1987). *The Intentional Stance*. Cambridge: MIT Press.
- Dreyfus, H.L. (1972). *What Computers Can't Do: A Critique of Artificial Reason*. New York: Harper & Row.
- Franklin, S. (1996). *Artificial Minds*. Cambridge: MIT Press.
- Gibson, J.J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glenberg, A.M. (1997). What Memory is for. *Behavioral and Brain Sciences*, 20, 1-19.
- Grawe, K. (1997). Research-informed Psychotherapy. *Psychotherapy Research*, 7, 1-19.
- Grawe, K. (1998). *Psychologische Therapie*. Göttingen: Hogrefe.
- Greeno, J.G. (1989). A Perspective on Thinking. *American Psychologist*, 44, 134-141.
- Haken, H. (1988). *Information and Self-Organization (A Macroscopic Approach to Complex Systems)*. Berlin: Springer.

- Haken, H. (1990). *Synergetik - eine Einführung. (Nichtgleichgewichts-Phasenübergänge und Selbstorganisation in Physik, Chemie und Biologie)*. Berlin: Springer. (2. Auflage).
- Haken, H., Kelso, J.A.S. & Bunz, H. (1985). A Theoretical Model of Phase Transitions in Human Hand Movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Harnad, S. (1990). The Symbol Grounding Problem. *Physica D*, 42, 335-346.
- Heckhausen, H., Gollwitzer, P.M. & Weinert, F.E. (Hrsg.)(1987). *Jenseits des Rubikon: Der Wille in den Humanwissenschaften*. Berlin: Springer.
- Hendriks-Jansen, H. (1996). *Catching Ourselves in the Act: Situated Activity, Emergence, Evolution, and Human Thought*. Cambridge: MIT Press.
- Horowitz, T.S. & Wolfe, J.M. (1998). Visual Search has no Memory. *Nature*, 394, 575-577.
- Kanfer, F.H., Reinecker, H. & Schmelzer, D. (1996). *Selbstmanagement-Therapie*. Berlin: Springer.
- Kelso, J.A.S. (1995). *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge: MIT Press.
- Köhler, W. (1947). *Gestalt Psychology: An Introduction to New Concepts in Modern Psychology*. New York: Liveright.
- Kolers, P.A. & Smythe, W.E. (1984). Symbol Manipulation: Alternatives to the Computational View of Mind. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 23, 289-314.
- Kriz, J. (1997). *Systemtheorie. Eine Einführung für Psychotherapeuten, Psychologen und Mediziner*. Wien: Facultas.
- Kruse, P. & Stadler, M. (Hrsg.) (1995). *Ambiguity in Mind and Nature. Multistable Cognitive Phenomena*. Berlin: Springer
- Leist, K.-H. (1999) Synergetische Lehr-Lern-Prozesse des Bewegungssystems. In K. Mainzer (Hrsg.) *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft* (207-220). Berlin: Springer.
- Lewin, K. (1936). *Principles of Topological Psychology*. New York: McGraw-Hill. Deutsche Ausgabe: Grundzüge der topologischen Psychologie. Bern: Huber (1969).
- Mandl, H. (1997). Wissen und Handeln: Eine theoretische Standortbestimmung. In H. Mandl (Hrsg.), Schwerpunktthema Wissen und Handeln: Bericht über den 40. Kongreß der Deutschen Gesellschaft für Psychologie in München 1996, (3-13). Göttingen: Hogrefe.
- Miller, G.A., Galanter, E. & Pribram, K.H. (1960). *Plans and the Structure of Behavior*. New York: Holt, Rinehart, and Winston.
- Milner, G. & Goodale, N. (1995). *The Visual Brain in Action*. Oxford: Oxford University Press.
- Minsky, M. (1985). *Society of Mind*. New York: Simon & Schuster.
- Newell, A. (1980). Physical Symbol Systems. *Cognitive Science*, 4, 135-183.
- Newell, A. (1990). *Unified Theories of Cognition*. Cambridge: Harvard University Press.
- Newell, A. & Simon, H.A. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Opwis, K. & Lüer, G. (1996). Modelle der Repräsentation von Wissen. In D. Albert & K.H. Stapf (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C: Theorie und Forschung, Serie II: Kognition* Vol. 4, (337-431). Göttingen: Hogrefe.
- Orlinsky, D.E. & Howard, K.I. (1987). A Generic Model of Psychotherapy. *Journal of Integrative and Eclectic Psychotherapy*, 6, 6-27.
- Pfeifer, R. & Scheier, C. (1999). *Understanding Intelligence*. Cambridge: MIT press.



- Pinker, S. (1997). *How the Mind Works*. New York: Norton.
- Pylyshyn, Z.W. (Hrsg.)(1987). *The Robot's Dilemma. The Frame Problem in Artificial Intelligence*. Norwood: Ablex.
- Reed, E.S. (1997). *Encountering the World: Toward an Ecological Psychology*. Oxford: Oxford University Press.
- Reinmann-Rothmeier, G. & Mandl, H. (1996). *Wissen und Handeln: Eine theoretische Standortbestimmung*. Institut für Empirische Pädagogik und Pädagogische Psychologie, Universität München: Forschungsbericht Nr. 70.
- Renkl, A. (1996). Träges Wissen. Wenn Erlerntes nicht genutzt wird. *Psychologische Rundschau*, 47, 78-92.
- Scheier, C. & Pfeifer, R. (1999). The Embodied Cognitive Science Approach. In W. Tschacher & J.-P. Dauwalder (Hrsg.), *Dynamics, Synergetics, Autonomous Agents — Nonlinear Systems Approaches to Cognitive Psychology and Cognitive Science*, (159-179). Singapore: World Scientific.
- Simons, D.J. & Levin, D.T. (1997). Failure to detect changes to people during a real-world interaction. *Psychonomic Bulletin and Review*, 5, 644-649.
- Smith, L.B., Thelen, E., Titzer, R. & McLin, D. (1999). Knowing in the Context of Acting: The Task Dynamics of the A-not-B Error. *Psychological Review*, 106, 235-260.
- Strube, G. (1990). Neokonnektionismus: Eine neue Basis für die Theorie und Modellierung menschlicher Kognition? *Psychologische Rundschau*, 41, 129-143.
- Swenson, R. & Turvey, M.T. (1991). Thermodynamic Reasons for Perception-Action Cycles. *Ecological Psychology*, 3, 317-348.
- Thelen, E., Schöner, G., Scheier, C. & Smith, L.B. (im Druck). The Dynamics of Embodiment: A Field Theory of Infant Perserverative Reaching. *Behavioral and Brain Sciences*.
- Toda, M. (1962). The Design of a Fungus-Eater: A Model of Human Behavior in an Unsophisticated Environment. *Behavioral Science*, 7, 164-183.
- Tschacher, W. (1997). *Prozessgestalten - Die Anwendung der Selbstorganisationstheorie und der Theorie dynamischer Systeme auf Probleme der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Tschacher, W. & Scheier, C. (1996). The Perspective of Situated and Self-Organizing Cognition in Cognitive Psychology. *Communication and Cognition - Artificial Intelligence*, 13, 161-188.
- Tschacher, W., Scheier, C. & Grawe, K. (1998). Order and Pattern Formation in Psychotherapy. *Nonlinear Dynamics, Psychology and Life Sciences*, 2, 195-215.
- Tschacher, W. & Dauwalder, J.-P. (1999). Situated Cognition, Ecological Perception, and Synergetics: A Novel Perspective for Cognitive Psychology? In W. Tschacher & J.-P. Dauwalder (Hrsg.), *Dynamics, Synergetics, Autonomous Agents*, (83-104). Singapore: World Scientific.
- Ullman, S. (1996). *High-Level Vision*. Cambridge: MIT Press.
- Varela, F., Thompson, E. & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind*. Cambridge: MIT Press.
- Vera, A.H. & Simon, H.A. (1993). Situated Action: A Symbolic Interpretation. *Cognitive Science*, 17, 7-48.
- Winograd, T. & Flores, F. (1986). *Understanding Computers and Cognition. A New Foundation for Design*. Norwood: Ablex.

## Verzeichnis bisher erschienener Titel

- 95-1: W. Tschacher. *The Dynamics of Psychosocial Crises*
- 95-2: W. Tschacher & O. E. Rössler. *The Self: a Processual Gestalt*
- 95-3: H. Hoffmann. *Schnittstellen der Gemeindepsychiatrie*
- 95-4: Z. Kupper & H. Hoffmann. *Modeling the Dynamics of Psychosis  
by Kinetic Logic*
- 96-1: W. Tschacher & N. Baur. *Wirkungsgefüge von Psychosen*
- 96-2: H. Hoffmann & Z. Kupper. *PASS - Ein integratives Programm zur  
beruflichen Wiedereingliederung chronisch psychisch Kranker*
- 96-3: W. Tschacher, C. Scheier & K. Grawe. *Order and Pattern  
Formation in Psychotherapy*
- 97-1: H. D. Brenner & W. Helbling. *Die Bedeutung der Gemeinde- psychiatrie bei  
der Implementierung qualitätssichernder Massnahmen*
- 97-2: H. Hoffmann. *Junge chronische Patienten: Wer ist hier eigentlich  
schwierig?*
- 97-3: N. Baur. *Vom Blick in den Spiegel zum Schielen auf die Waage*
- 98-1: H. Hoffmann. *Berufliche Integration in den allgemeinen Arbeitsmarkt— Ein  
realistisches Ziel für chronisch psychisch Kranke?*
- 99-1: W. Tschacher & C. Scheier. *Der Ansatz der Embodied Cognitive  
Science: Konzepte, Methoden und Implikationen für die Psychologie*
- 00-1: W. Tschacher, N. Baur & Z. Kupper. *Wirkungsgefüge von Psychosen II*

Layout: Nicole Baur

Produktion: Werkstatt im Lobhaus,

Die Forschungsberichte können neu von unserer Webpage:  
<http://www.upd.unibe.ch/research/publikationen.html>  
als PDF-Files heruntergeladen werden.