

Computermodelle aus dem Blickwinkel der handlungstheoretischen Psychologie

Stefan Künzell

Übersicht

In diesem Beitrag soll versucht werden, die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der Verwendung von Computermodellen für den Erkenntnisgewinn handlungspsychologischer Forschung zu erkunden. Dabei wird, in Anlehnung an Nitsch (1986), die Situation als Konstellation von Person-, Umwelt- und Aufgabenfaktoren verstanden. Diese Faktoren werden daraufhin überprüft, in wie weit sie sinnvoll vom Computer modelliert werden können.

Der Sinn einer Computersimulation von Umwelt und Aufgabe liegt vor allem darin, in Experimenten wohldefinierte und dennoch komplexe Handlungssituationen zu präsentieren. Damit kann die für die experimentelle Psychologie typische Reduktion der Umwelt auf einige wenige unabhängig Variablen überwunden werden.

Das Modell der Person soll helfen, ihre handlungsregulierenden Prozesse zu verstehen und zu erklären. Mit Hilfe der Computersimulation kann auch das Systemverhalten von komplexen Modellen berechnet und veranschaulicht werden.

Eigenschaften von Modellen

Modelle werden in unserem Alltag in vielfältigster Weise wie selbstverständlich benutzt. Wir spielen mit Matchbox-Autos oder Modelleisenbahnen, benutzen einen Stadtplan, um uns in einer fremden Stadt zurechtzufinden. Ein Architekt baut ein Modell, um dem Bauherrn eine Vorstellung von seinem Entwurf zu geben, und den Aufbau des Wassermoleküls verstehen wir am besten durch ein Modell der Wasserstoff- und Sauerstoffatome.

Jedes Modell kann nach Stachowiak (1973, S. 131 f.) durch drei Merkmale gekennzeichnet werden, das Abbildungs-, das Verkürzungs- und das pragmatische Merkmal. Die ersten beiden Merkmale werden von Steinbuch prosodisch elegant charakterisiert: „Modelle unterscheiden sich in irgendwelchen Merkmalen von ihren Originalen – sonst wären sie nicht deren *Modelle*, aber sie haben auch manches mit ihnen gemeinsam – sonst wären sie

nicht *deren* Modelle“ (Steinbuch, 1971, S. 55). Das pragmatische Merkmal macht das Kernstück von Stachowiaks „allgemeiner Modelltheorie“ aus. Modelle werden immer „a) für bestimmte – erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende – Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen“ (Stachowiak, 1973, S. 132 f.; im Original alles mehrfach hervorgehoben) erstellt. Ein Modell ist also ein unter pragmatischen Aspekten verkürztes Abbild eines Originals. Die Angemessenheit eines Modells ist davon abhängig, für wen, wann und zu welchem Zweck ein Modell erstellt wird.

Aus diesen Eigenschaften folgt der nicht-empirische Charakter von Modellen (vgl. z.B. Herzog, 1984, S. 94f.). Modelle lassen sich empirisch nicht belegen oder falsifizieren. Wenn ein Merkmal des Originals nicht in einem Modell abgebildet wird, bedeutet dies nur, dass es vom Entwickler des Modells im Bezug auf Adressat, Zeitpunkt oder Modellzweck als unwichtig angesehen wird. Sollte dies allerdings bei zu vielen Merkmalen der Fall sein, wird das Modell unattraktiv. Es modelliert das Original nicht mehr angemessen.

Was denn nun an einem Original wichtig und was unwichtig ist, darüber gehen die Meinungen meist auseinander. Die Frage, die sich die Psychologie stellen muss, ist also die nach der *Angemessenheit* ihrer Modelle. Da ein empirischer Nachweis ausscheidet, kann die Angemessenheit nur relativ zu anderen Modellen beurteilt werden. Innerhalb des gleichen Paradigmas, also bei der Modellierung des gleichen Ausschnitts der psychischen Funktionen des Menschen (z.B. beim rhythmischen Klopfen im Takt eines Metronoms oder beim Handeln in Person-, Umwelt-, Aufgabenkonstellationen), gelten in der Regel Modelle als angemessener, die den untersuchten Ausschnitt vollständiger abbilden. Zweckmäßiger sind einfache, „sparsame“ Modelle, die bei gleicher Abbildungstreue nur wenige Vorannahmen machen.

Aber auch zwischen den Paradigmen der Psychologie gibt es Auseinandersetzungen über die Angemessenheit ihrer Modellbildung. So wird ein Verfechter Handlungstheorie andere Modelle für angemessen halten als das Anhänger des Informationsverarbeitungsparadigmas. Zwischen den Wissenschaftsdisziplinen gilt dies erst recht. Wie „der Mensch“ angemessen zu modellieren sei, also über das „Menschenbild“, gehen die Meinungen beispielsweise in der Biomechanik, der Medizin, der Psychologie und der Pädagogik weit auseinander.

In der Psychologie kommt der Modellbildung eine besondere Bedeutung zu. Da das Psychische als ihr Erkenntnisgegenstand nicht konkret „begreifbar“ ist, dienen Modelle auch zu seiner Konstruktion. „Für die Psychologie ist die *konstituierende* Funktion von Modellen besonders zu beachten. Denn, was in der Psychologie zu untersuchen ist, was also der psychologische ‚Gegenstand‘ ist, das definiert sich weitgehend via Modelle, die zumeist *als Metaphern* aus

ausserpsychologischen Kontexten übernommen werden.“ (Herzog, 1984, S. 96).

Computermodelle

Der Computer ist *das* Werkzeug zur Modellbildung schlechthin. Die Eigenschaften des Originals werden durch ein Computerprogramm modelliert, und fast jedes Computerprogramm ist ein Modell eines originären Gegenstands oder Prozesses. Ein besonders hilfreiches Merkmal des Computerprogramms ist seine Flexibilität. Falls beispielsweise einige Eigenschaften des Modells nicht mit dem Original übereinstimmen, muss das Computermodell nicht gleich verworfen werden, sondern kann durch eine Veränderung des Programms dem Original schrittweise angenähert werden. Gleiches gilt, wenn am Original neue, wesentliche Aspekte, die zu modellieren sind, entdeckt werden.

Zahlreiche Computermodelle sind heutzutage schon im Einsatz, es wird kaum noch ein Auto gebaut, kaum noch ein Pilot an den Steuerknüppel eines Düsenjets gelassen, ja mancher Frisör schneidet keine Haare mehr, ohne dass zuvor an einem Computermodell eventuelle Fehler oder Verbesserungen gesucht worden wären.

Um psychologische Theorien zu generieren und zu veranschaulichen werden, wie oben schon erläutert, immer Modelle benutzt. Sehr oft werden dabei Abbildungen mit mehreren Kästchen und noch mehr Pfeilen zwischen diesen verwendet, um der *scientific community* (für wen?) die aufgestellte Theorie zu erklären (wozu?). Doch Papier ist bekanntlich geduldig, und gerade in komplizierteren Modellen ist es schwierig, die Konsequenzen der verschiedenen Verbindungen zu überblicken. Insbesondere bei zeitlichen Abhängigkeiten sind die Grenzen des intuitiven Verstehens durch „scharfes Hinsehen“ schnell erreicht.

Hier kann die Implementation des Modells auf einem Rechner Abhilfe schaffen. „Die Modellkonstruktion [mit dem Computer, S.K.] erzwingt also Vollständigkeit, Expliztheit und Präzision der theoretischen Annahmen. Die Explizierung der theoretischen Annahmen führt oft dazu, daß man Implikationen der Theorie sieht, die zunächst unsichtbar waren“ (Dörner, 1994, S. 381). Das Computermodell ist also ein Instrument zur Explizierung und mithin zur Generierung von Theorien.

Im folgenden Kapitel sollen die Möglichkeiten des Einsatzes von Computermodellen in der handlungstheoretischen Psychologie untersucht werden.

Computermodelle und handlungstheoretische Psychologie

Grundlage des Handelns ist nach Nitsch (1986, Abb. 20) der Person-Umwelt-Bezug, wobei sich die Umwelt auf einer sozialen und materialen, die Person auf einer psychischen und einer somatischen Ebene analysieren lässt. Der klassische experimentalpsychologische Ansatz versucht, die kausalen Wechselwirkungen zwischen Person und Umwelt im Labor zu erkunden. Dabei muss aber die Komplexität der Zusammenhänge im „wirklichen Leben“ reduziert werden, in der Regel auf einige wenige unabhängige Variablen, die dann systematisch manipuliert werden. Diese unabhängigen Variablen bilden sozusagen ein extrem reduziertes Umweltmodell. Die Reduktion ist meistens so einschneidend, dass nicht von einem Modell geredet wird. Und dies zu Recht: Die Gemeinsamkeit der Eigenschaften und Prozesse mit dem Original „Umwelt“ ist tatsächlich unangemessen gering. Zwar werden in der Regel die Effekte der unabhängigen Variablen auf das an den Versuchspersonen gemessene Verhalten erkannt, doch dies entspricht, wie Nitsch provokant formuliert, im Ergebnis, dass wir „Alles über Nichts“ wissen (1997, S. 5, Übersetzung S.K.).

Die handlungspsychologische Herangehensweise steht einer solchen Forschungsmethode kritisch gegenüber. Es gilt, die Organisationsprinzipien komplexer dynamischer Systeme zu untersuchen („Systempostulat“, Nitsch, 1986). Dies erfordert eine „Akzentuierung von Feldstudien und Einzelfallanalysen“ mit „Betonung der unreduzierten (...) Wirklichkeit des Alltagshandelns“ (a.a.O., S.207).

Doch bekanntermaßen fangen wir uns damit ebenso gravierende Probleme ein. In Feldstudien ist ein experimentelles Design nicht möglich, denn jedes Alltagshandeln wird in der Regel schon dadurch verfremdet, dass eine Beobachtung durch den Forscher stattfindet. Erst recht können keine wohldefinierten, kontrollierten, vergleichbaren Alltagssituationen hergestellt werden. Durch die Komplexität der Welt können beobachtete Effekte ihre Ursache in allen möglichen, nicht erkennbaren, geschweige denn reproduzierbaren Situationsfaktoren haben. Wiederum von Nitsch (1997, S. 5) provokant formuliert, wissen wir dann „Nichts über Alles“.

Es sind verschiedene Möglichkeiten vorgeschlagen worden, diesem schon lange bekannten Dilemma zwischen interner und externer Validität zu begegnen, beispielsweise die Strategie multipler Aufgaben (Heuer, 1988; beispielhaft in der Sportwissenschaft angewendet von Szymanski, 1997). Hier soll die von Nitsch schon mehrfach (1991, S. 39; 1997, S. 22) empfohlene Methode der Computersimulation daraufhin untersucht werden, ob sie aus handlungstheoretischer Perspektive einen Lösungsansatz bieten kann und mit welchem Gewinn Computermodelle der Umwelt, der Aufgabe und der Person in das handlungspsychologische Methodenrepertoire eingehen können.

Computermodelle der Aufgabe und der Umwelt

Die hinter einer Simulation von Umwelt und Aufgabe stehende Idee wird durch folgendes Gedankenexperiment deutlich: Nehmen wir an, wir hätten einen Super-Computer, der die komplette soziale und materiale Umwelt simulierte. Alles in der Umwelt wäre durch diesen Computer gesteuert – das Verhalten der Mitmenschen, die Dinge, die auf dem Schreibtisch liegen, der Motor des von der Versuchsperson gefahrenen Autos.¹ Dieser Computer würde von dem Forscher programmiert, so dass er alle Umwelterfahrungen im Leben der Versuchspersonen steuerte. Hier könnten unterschiedliche Handlungen von Versuchspersonen in der exakt gleichen Umweltsituation eindeutig auf innerhalb der Person liegenden Faktoren zurückgeführt werden, und diese herauszufinden ist ein Ziel psychologischer Forschung.

Das Gedankenexperiment jemals zu verwirklichen ist (glücklicherweise) utopisch. Vor allem die soziale Umwelt exakt zu simulieren ist zurzeit völlig unmöglich und wird es wohl auch bleiben. Deutliche Fortschritte gibt es aber bei der computerunterstützten Simulation der materialen Umwelt.

Dörner und Mitarbeiter haben in zahlreichen Computersimulationen versucht, Handlungsstrategien von Versuchspersonen in dynamischen Umweltsituationen zu erkunden. Die Versuchsperson soll am Computer ein System steuern, in dem verschiedene Variablen beeinflussbar sind. Diese Variablen hängen komplex miteinander zusammen und entwickeln sich dynamisch. Die Zusammenhänge sind der Versuchsperson zum Teil unbekannt.

Ein typisches Beispiel (vgl. Dörner, Kreuzig, Reither & Stäudel, 1983): Die Vp sitzt als mit einer diktatorischen Vollmacht ausgestattete Bürgermeisterin des virtuellen Städtchens Lohhausen vor dem Bildschirm. Sie hat die Möglichkeit, in das Gesundheitswesen, die Bildung, die Industrie zu investieren oder sich um Sport und Kultur zu kümmern. Sie kann auch von jedem ein bisschen tun. Die Entwicklung Lohhausens wird der Vp in Form von Rückmeldung über Arbeitslosenzahlen, die Anzahl der Wohnungssuchenden, Haushaltssituation, Produktion und einem zusammenfassenden Wert „Zufriedenheit der Bewohner“ zurückgemeldet.

Ein zweites, etwas weniger komplexes Beispiel (Reichert & Dörner, 1988): Die Vp soll als Leiterin eines Kühlhauses die ausgefallene Klimaanlage ersetzen und die Temperatur mit einem Stellrad regeln. Die Temperatur folgt nicht linear den Einstellungen auf dem Stellrad, sondern ist dynamisch abhängig von der Störgröße, d.h. der Außentemperatur, und die Regelmechanismen setzen zudem noch zeitverzögert ein.

¹ Dies ließe sich übrigens nicht simulieren, in dem das Gehirn einer Versuchsperson an einen Computer angeschlossen wäre, der alle Wahrnehmungsinhalte in efferente Nervenimpulse übersetzte und die Auswirkungen aller Afferenzen in der Umwelt berechnete. In einem solchen Fall müsste nämlich auch der Körper des Menschen vom Computerprogramm mit simuliert werden, der aber ein unteilbarer Bestandteil der handelnden Person ist.

Die hier eingesetzten Computermodelle testen also nicht die Reaktion auf einzelne unabhängige Variablen, sondern das Handeln von Versuchspersonen in einem System mit reduzierter, wohldefinierter Komplexität und Dynamik. Dörner beobachtet in diesen Experimenten typische Handlungsfehler, dass beispielsweise der Anstieg des exponentiellen Wachstums nicht richtig eingeschätzt oder die dynamische Wirkung einer Handlung nicht berücksichtigt wird. Er vergleicht „gute“ mit „schlechten“ Versuchspersonen und sucht die Unterschiede, wie beispielsweise die Anzahl der gestellten Fragen oder die Anzahl der Entscheidungen. Die Ergebnisse können hier nicht im Einzelnen dargestellt werden, sind aber sehr lesbar in Dörner (1989) zusammengefasst.

Eine Gefahr bei der Interpretation des Handelns der Vp besteht darin, dass der Forscher das von ihm entworfene Modell mit der tatsächlichen Realität *gleichsetzt*. Dieser Gefahr ist Dörner teilweise erlegen. So berichtet er (1989, S. 200ff.) über „magische“ Hypothesen als Lösungsstrategien. Versuchspersonen glauben daran, dass zur Regelung des Kühlhauses z.B. 23 eine gute Zahl sei oder dass man nur ungerade Zahlen benutzen dürfe. Daraus ist aber keinesfalls der Schluss zu ziehen, dass die Vp auch bei der *tatsächlichen* Aufgabe im *wirklichen* Leben, die Temperatur eines Kühlhauses zu regeln, derartige magische Hypothesen bilden würden. Nein, diese Art von Hypothese beruht m.E. plausiblerweise darauf, dass in etlichen Computerspielen es darauf ankommt, magische, nur begrenzt logisch ableitbare Regeln zu finden. Die Vpn sind nicht dem Fehler des Versuchsleiters gefolgt und haben das Modell für die Realität genommen, sondern es gesehen als das, was es ist: Ein Computerspiel!

Gleiches geschah auf anderer Ebene mit einem im Spiel Gescheiterten, der die Eigenschaften der Computersimulation für sein schlechtes Abschneiden verantwortlich machte und vermutete, dass getestet werden sollte, wie lange er sich frustrieren ließe. Dies wird von Dörner als die Bewältigung des Zielkonflikts durch eine „Verschwörungstheorie“ interpretiert. Dabei nahm die Vp die Situation wahr wie sie war, nämlich als ein typisches psychologisches Experiment, in dem Situationen wie von der Vp vermutet durchaus einmal vorkommen können. Dass sie in der wirklichen Situation die gleiche Verschwörungstheorie entwickeln würde, erscheint eher unwahrscheinlich.

Weiterhin muss sich der Forscher darüber im klaren bleiben, dass bei einem solchen Experiment ein „Scheitern“ der Vpn nur heißt, dass ihr Modell der Situation nicht mit dem vom Versuchsleiter programmierten Modell übereinstimmt. Gewöhnlich ist das programmierte Modell zwar stringenter und plausibler als das der Vpn, dies muss aber nicht immer der Fall sein. In einer Simulation, in der die Vpn 20 Jahre lang für das Wohlergehen eines Stammes in der Sahelzone verantwortlich waren, schnitten erfahrene Manager, die von Dörner so genannten „Entscheidungspraktiker“, besser ab als „Entschei-

dungslaien“, Studierende, bei denen „eher mehr Interesse und Erfahrungen im Hinblick auf Ökologie und ‚Dritte Welt‘ vorhanden“ war (a.a.O., S. 297). Hier stellt sich natürlich die Frage, ob das Modell nicht auch von einem „Entscheidungspraktiker“ erstellt wurde, so dass Personen mit gleichen Wertmaßstäben und Handlungsstrategien in diesem Modell besser abschneiden müssen als Personen, die andere Prioritäten setzten. So weitreichende Schlüsse wie das Zurückführen des Leistungsunterschieds auf eine höhere „operative Intelligenz“ der Manager (a.a.O., S. 298) müssen auf jeden Fall kritisch hinterfragt werden.

Mit diesen Beispielen soll nicht gegen die Methode der Computersimulation der Umwelt im psychologischen Experiment argumentiert werden. Immerhin werden dort psychische Phänomene auf einer Komplexitätsebene untersucht, die klassischen psychologischen Experimenten verschlossen bleibt. Dies darf jedoch nicht dazu führen, die Beschränkungen durch die Verkürzungen in der Modellsituation aus den Augen zu verlieren.

Computersimulationen der Person

Während Simulationen der Umwelt dazu dienen, die Handlungsstrategien von Vpn in dieser Simulation experimentell zu erfassen, haben Modelle der Person eine grundsätzlich andere Funktion. Ihr Zweck ist es, das komplexe Geschehen der menschlichen Handlungsorganisation zu ordnen, zu kategorisieren und anschaulich zu machen oder, wollen wir Herzog (1984) folgen, den Forschungsgegenstand erst zu konstituieren. Werden diese Modelle im Computer implementiert, sichert dies die Widerspruchsfreiheit des Modells, denn logische Inkonsistenzen würden im Computer zwangsläufig zu Programmfehlern führen.

Ein Problem haben die meisten Modelle – und alle Computermodelle – mit der Intention, dem bewussten Entscheiden für oder gegen eine Handlung. Letztlich werden bewusste Prozesse immer durch ein nicht mehr weiter explizierbares Kästchen modelliert, in dem dann „Wille“, „Bewusstsein“, „Intention“ oder ähnliches steht. In Computermodellen wird dieses Kästchen von außen, sprich vom Programmierer des Modells, mit irgendwelchen Zahlen, die einen Zustand repräsentieren sollen, entsprechend gefüllt. Dies ist anders nicht implementierbar, denn die mathematisch-physikalischen Grundlagen des Entstehens bewusster Prozesse sind bisher unbekannt. Wenn aber ein Computermodell die Entstehung eines bewussten Prozesses simulieren könnte, bedeutete dies konsequenterweise, dass der Computer Bewusstsein besäße.

Dieses Ausklammern des Entstehens von intentionalen Prozessen widerspricht scheinbar dem Intensionspostulat und damit der eigentlichen Idee einer handlungstheoretischen Psychologie. Sie spricht erst dann von Handlung, wenn „ein Verhalten *unter subjektiven Absichten* (...) organisiert wird“

(Nitsch, 1986, S. 208, Hervorhebung S.K.). Diese Handlungsintentionen sind in einem hierarchischen Modell der Sinn-Zweck-Ziel-Schichtung strukturiert (a.a.O., Abb. 22). „Mit jedem Handeln stellt sich also die Ziel-, Zweck- und Sinnfrage, und sie wird jeweils vor dem Hintergrund von Ziel-, Motiv- und Werthierarchien beantwortet.“ (a.a.O., S. 213, im Original alles hervorgehoben). Nun ist wohl unumstritten, dass – gerade im Sport – eine Vielzahl von Handlungen unter hohem Zeitdruck durchgeführt werden müssen. Es ist unplausibel anzunehmen, dass bei der Planung dieser Handlungen alle intentionalen Hierarchiestufen „abgearbeitet“ werden. Neurobiologische Erkenntnisse legen nahe, dass dies nicht nur für Handlungen unter Zeitdruck gilt: „Wir müssen (...) davon ausgehen, daß auch bei uns Menschen das allermeiste, was unsere Interaktion mit der Umwelt steuert, unserem bewußten Erleben nicht zugänglich ist.“ (Roth, 1996, S. 31). Allerdings ist die Ausbildung einer bewussten Intention keine notwendige Voraussetzung für die Gültigkeit der handlungstheoretischen Betrachtungsweise, denn „dies [die hierarchische Strukturierung der Handlungsintentionen, S.K.] bedeutet nicht, daß für jede Handlung der Ziel-, Zweck- und Sinnbezug immer auch *hergestellt* und *bewußt* wird“ (Nitsch, 1986, S. 213, Hervorhebungen S.K.). Damit wird die Möglichkeit eingeräumt, dass implizite, nicht bewusste Intentionen Handlungen organisieren können.

Hier soll nun nicht die inzwischen fast unüberschaubare Anzahl der Computermodelle, die in der Psychologie entwickelt wurden, kurz angerissen werden. Stattdessen stelle ich mit dem Konnektionismus einen Ansatz vor, der mit einer der handlungstheoretischen Psychologie entgegengesetzten Strategie versucht, kognitive Prozesse des Menschen zu beschreiben und erklären. Erstere nähert sich *top-down*, ausgehend von Sinnfragen auf der Ebene von Normen und Werten, der Handlungsregulation des Menschen an. Im Konnektionismus wird eine *bottom-up*-Strategie verfolgt. Die interessante Frage, ob sich die beiden Ansätze ergänzen, ob sie sich „irgendwo in der Mitte treffen“ können, soll am Schluss dieses Abschnitts angesprochen werden.

Formales Modell eines Neurons

Ausgangspunkt des Konnektionismus ist auf der untersten Ebene die formale Modellierung eines Neurons, die zuerst von McCulloch und Pitts (1943) durchgeführt wurde und mit leichten Anpassungen noch heute aktuell ist. Dabei besitzt das künstliche Neuron, auch „Einheit“ (*Unit*, z.B. Rumelhart u.a., 1986) oder „McCulloch-Pitts-Zelle“ (z.B. Rojas, 1993) genannt, in der Regel folgende Eigenschaften:

- Es erhält Eingaben von beliebig vielen anderen Neuronen.
- Es verarbeitet diese Eingaben durch Aufsummierung.

- Es vergleicht die Summe der Eingaben mit einem Schwellenwert. Ist dieser Schwellenwert überschritten, „feuert“ das Neuron, wenn nicht, dann nicht².

Sicherlich sind die komplexen Eigenschaften des natürlichen Neurons in diesem Modell nicht annähernd abgebildet, doch reichen, wie wir noch sehen werden, schon diese grundlegenden Eigenschaften aus, um damit Ausschnitte aus kognitivem Verhalten zu simulieren.

Formales Modell eines neuronalen Netzwerks

Eine Ebene darüber werden neuronale Netzwerke, d.h. eine Anhäufung von vielen untereinander verbundenen Neuronen, modelliert. Auf dieser Ebene werden die „Architektur“ des Netzes sowie die „Lernregeln“ festgelegt. Je nach Ziel der Modellierung haben sich hier unterschiedliche Modelle entwickelt. Sie teilen aber alle folgende Gemeinsamkeiten:

- Künstliche Neuronen sind mit vielen anderen Neuronen verbunden. Die Verbindungen sind *gerichtet* und *gewichtet*.
- Die Gewichte der Verbindungen sind *adaptiv*. Sie verändern sich in Abhängigkeit von der formulierten Lernregel und den Eigenschaften der Ein- und Ausgabevektoren.
- Die Veränderung der Gewichte hängt nur von dem Zustand der Neuronen, die sie verbinden, ab. D.h. es findet nur eine *lokale* Informationsverarbeitung statt, eine globale Information ist nicht nötig.
- In künstlichen neuronalen Netzen wird das „Wissen“ *parallel* und *verteilt* repräsentiert. Es gibt keine symbolischen Knoten, also Neuronen, die für einen bestimmten Bewusstseinsinhalt stehen, sondern das Wissen entsteht als Prozess aus der Interaktion zwischen den langfristig sich verändernden Gewichten und den aktuellen Aktivierungen der Neuronen.

Das mehrschichtige Netzwerk ist die am häufigsten anzutreffende Netzarchitektur. Alle Neuronen der Schicht $n-1$ sind mit genau allen Neuronen der Schicht n verbunden. Weitere Verbindungen gibt es nicht. Das dabei meistens angewandte Lernverfahren ist der backpropagation-Algorithmus (z.B. Rumelhart, Hinton & Williams, 1986). Die Aufgabe des Netzes ist es, die Relation zwischen einer Ein- und einer Ausgabemenge zu erlernen. Dazu wird das Netz mit Beispielen trainiert. Dem Netz werden die Eingabevektoren (Elemente der Eingabemenge) eingegeben und das zunächst mit zufälligen Gewichtungen initialisierte Netz produziert eine Ausgabe. Diese Ausgabe wird mit der tatsächlich zugeordneten Ausgabe verglichen und ihr Abstand als Fehler dem Netz zurückgemeldet. Die Netzgewichte werden mit Hilfe des

² Statt dieser „Alles oder Nichts“-Regel wird häufig eine sigmoidale Ausgabefunktion benutzt, bei der in der Nähe des Schwellenwerts die Stärke der Ausgabe von dem Wert der Summe der Eingabe nichtlinear abhängt, (vgl. z.B. Rojas, 1993).

backpropagation-Algorithmus, einem lokalen Gradientenabstiegsverfahren, so verändert, dass sich der Abstand verkleinert. Dies geschieht mit allen Trainingsvektoren und muss oft wiederholt werden. Wenn sich das Netz nicht in einem lokalen Minimum „verfängt“, wird die Beispielrelation erlernt. In aller Regel werden nun vom Netz auch im Transfertest alle nicht in der Beispielmenge enthaltenen Elemente der Eingabemenge den korrekten Ausgabevektoren zugeordnet. Da bei diesem Verfahren stets ein Fehler zurückgemeldet wird, sprechen wir auch vom „überwachten Lernen“.

Unüberwachtes Lernen findet statt, wenn es nicht darum geht, Relationen zwischen Ein- und Ausgabemengen zu finden, sondern wenn die Eigenschaften der Eingabevektoren selbst ein Ordnungskriterium bilden. Ein typischer Anwendungsfall ist die Mustererkennung, wo verschiedene Muster aufgrund ihrer Ähnlichkeit als gleich bzw. ungleich erkannt werden müssen, beispielsweise das Erkennen der Gleichheit eines Gesichts mit oder ohne Bart. Dies kann durch eine modifizierte Form von Hebbschem Lernen (Hebb, 1949) gelernt werden. Dabei werden einfach nur die Gewichte zwischen zwei bei gleicher Eingabe feuernenden Neuronen verstärkt, die anderen abgeschwächt.

Betrachten wir den Lernprozess der Netze als Veränderungen von Zuständen im Vektorraum, der durch die Gewichte aufgespannt wird, so verhalten sich die Netze wie dynamische Systeme. Sie können in der Sprache der Synergetik beschrieben werden (z.B. Haken & Stadler, 1990)

Formales Modell kognitiver Prozesse

Eine weitere Ebene höher können wir den Verarbeitungsprozess des Netzes als ein Modell für einfache, unbewusste kognitive Prozesse verstehen. Die Eingabevektoren entsprechen hier der Erregung der Rezeptoren bzw. den physiologischen Korrelaten von Intentionen (s.o.), das Weiterleiten der Erregung entspricht der Bearbeitung im Arbeitsgedächtnis. Die Inhalte des Langzeitgedächtnisses sind in den Verbindungen gespeichert. In diesem Modell ist also ein kognitiver Prozess dadurch gekennzeichnet, dass er immer eine Interaktion zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis ist. Es gibt keine symbolischen Inhalte im Langzeitgedächtnis, sondern Erinnerungsprozesse werden immer dynamisch konstruiert. Für spezielle kognitive Funktionen können wir spezifische Teilnetze annehmen.

Jordan und Rumelhart (1992) haben ein Modell entwickelt, das das Bewegungslernen simuliert (s. Abb. 1). Sie gehen davon aus, dass der Mensch zwei Relationen lernen muss, um sich bewegen zu können. Die eine Relation ist der Zusammenhang zwischen den intendierten Ergebnissen, dem aktuellen, wahrgenommenen Zustand der Umwelt und den motorischen Kommandos. In der Kontrolltheorie wird diese Relation als „inverses Modell“ bezeichnet, da, invers zu der üblichen Denkweise der Physik, nicht aus vorgegebenen physikalischen Größen ihre Effekte berechnet werden, sondern genau

umgekehrt die zum Erreichen eines Effekts benötigten Größen ermittelt werden müssen. Diese Relation sorgt für die motorische Steuerung und Kontrolle, sie ist verantwortlich dafür, dass ein intendiertes Ziel auch erreicht werden kann.

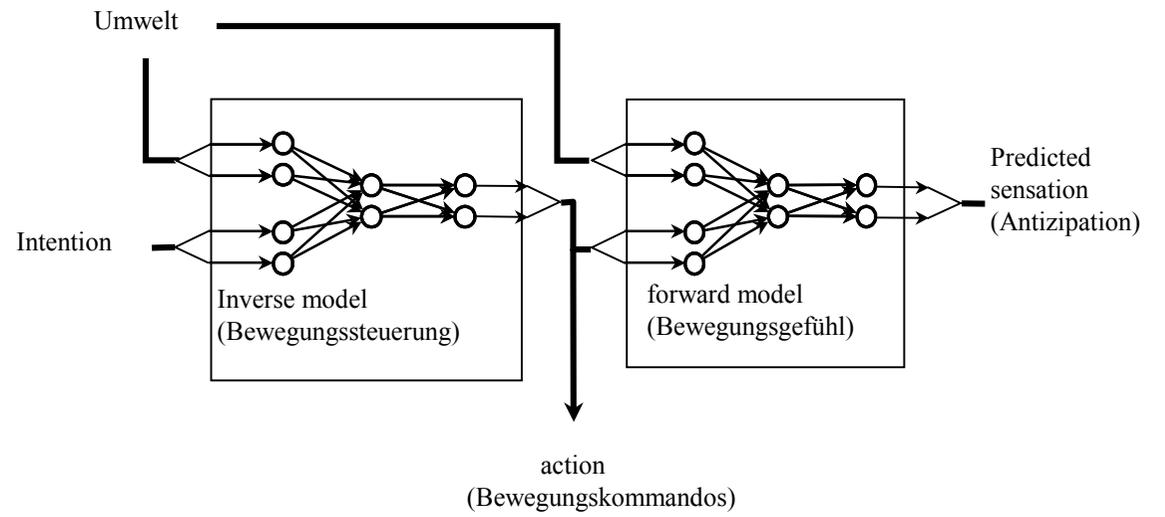


Abb. 1: Ein konnektionistisches Modell zum Bewegenslernen nach Jordan und Rumelhart (1992). Die geklammerten deutschen Begriffe sind hinzugefügt. Sie übersetzten die Begriffe der Kontrolltheorie in die Sprache der Sportwissenschaft.

Die andere Relation ist der Zusammenhang zwischen den motorischen Kommandos, dem aktuellen, wahrgenommenen Zustand der Umwelt und den erwarteten Ergebnissen. In der Kontrolltheorie heißt sie Vorwärtsmodell. Diese Relation möchte ich „Bewegungsgefühl“ nennen³. Von einem Menschen mit gutem Bewegungsgefühl erwarten wir, dass er die Ergebnisse seiner Bewegungen gut antizipieren kann, und umgekehrt ist es so, dass jemandem, der dies nicht gut kann, auch kaum ein gutes Bewegungsgefühl zugesprochen wird. Vorwärtsmodell und Bewegungsgefühl sind also zumindest semantisch kongruent.

Nach diesem Modell muss nun, um Bewegungen zu erlernen, zunächst einmal das Vorwärtsmodell halbwegs erworben sein, denn der Bewegungsfehler, der in der Umwelt wahrgenommen wird, muss für das lernende System in einen Fehler in die Ebene der motorischen Kommandos übersetzt werden. Genau dies aber leistet das Vorwärtsmodell, das Bewegungsgefühl. Erst wenn dies möglich ist, kann eine Bewegung zielgerichtet verändert, sprich gelernt werden.

Ein Beispiel

Nach dem Vorbild des Modells von Jordan und Rumelhart (1992) habe ich (Künzell, 1996) das Erlernen eines Positionswurfs im Basketball mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk simuliert. Das Netz wird mit zufälligen Gewichten initialisiert, d.h., das Netz verfügt über keinerlei „Vorerfahrung“. Zunächst wird das Vorwärtsmodell erlernt, indem das Netz mit (innerhalb plausibler Grenzen) zufälligen Abflugwinkel- und -geschwindigkeitskombinationen trainiert wird. Das Netz soll die entsprechende Flugweite des Balles „erlernen“. Es produziert aufgrund seiner Berechnungsvorschrift eine Ausgabe, die „geschätzte“ Flugweite des Balls. Die Differenz zur tatsächlichen Flugweite wird dem Netz als Fehler zurückgemeldet. Dabei werden, wie schon oben erwähnt, ausschließlich die drei Vektoren Abflugwinkel, -geschwindigkeit und der Fehlervektor dem Netz präsentiert, das „Lernen“ erfolgt über den backpropagation-Algorithmus. Nach 2000 Durchgängen à 500 Trainingsvektoren wird die Abbildung zwischen Ein- und Ausgabevektoren in guter Näherung vom Netz modelliert. Es „hat jetzt ein Gefühl dafür“, wie weit der Ball bei bestimmten Wurfparametern fliegt. Insbesondere „weiß“ es auch, was es tun muss, um weiter oder kürzer zu werfen.

Damit kann nun auch das inverse Modell trainiert werden. Dabei muss das Netz „lernen“, je nach Distanz zum Korb die entsprechenden Winkelkombi-

³ In einer früheren Publikation (Künzell, 1996) wird das Vorwärtsmodell als Modell für die Bewegungsvorstellung bezeichnet, was ich aber inzwischen nicht mehr glücklich finde, da die Bewegungsvorstellung oft ein bewusster Prozess ist, während sich der Geltungsanspruch konnektionistischer Modelle auf implizite, unbewusste Prozesse beschränken sollte.

nationen zu finden. Dies gelingt nach 800 Trainingsdurchgängen recht gut. Das Netz findet jetzt zu der intendierten Korbentfernung die passenden Wurfparameter.

Rückschlüsse vom Modell auf menschliches Verhalten

Einige Rückschlüsse für das menschliche (und wohl auch tierische) Lernen von Bewegungen sind schon im letzten Abschnitt angedeutet worden. Wenn wir Bewegungen erlernen wollen, müssen wir nach diesem Modell zuerst zumindest implizit ein Gefühl dafür entwickeln, welche Effekte unsere Bewegungen auf die Umwelt haben. Dieses Gefühl vermittelt dann die Richtung der Bewegungskorrektur. Auf das Basketballbeispiel bezogen muss zunächst ein Gefühl dafür vorhanden sein, wie weit ein Ball fliegt, wenn wir ihn werfen. Insbesondere müssen wir wissen (oder „fühlen“), dass er weiter fliegen wird, wenn wir ihn kräftiger werfen, und welche Abwurfwinkel überhaupt geeignet sind. Dies erscheint zwar selbstverständlich und bringt jeder, der das erste mal einen Basketball in die Hand nimmt, schon mit sich. Bei der konnektionistischen Modellierung motorischen Lernens wird aber deutlich, dass dieser Prozess keinesfalls trivial ist und bei der Formulierung von Theorien nicht vergessen werden sollte.

Wie können wir uns das erste Erwerben eines Bewegungsgefühls vorstellen? Jordan und Rumelhart (1992) schlagen hier vor, dass dies die Funktion der Strampelbewegungen eines Babys ist. Dabei werden quasizufällige Muskelaktivitäten erzeugt, und das Baby lernt, wie sich die Extremitäten dabei bewegen. Das Strampeln dient also dem Erwerb eines grundlegenden Bewegungsgefühls. Erst nachdem dies einigermaßen erworben ist, ist das Baby in der Lage, zielgerichtete Bewegungen, d.h. die Bewegungssteuerung bzw. das inverse Modell zu erlernen.

Das Funktionieren eines solchen bottom-up Modells im Computer heißt nun keineswegs, dass die menschliche Informationsverarbeitung solche Teilfunktionen enthalten muss. „Wenn wir wissen, wie ein gegebenes Problem von einem Computer gelöst werden kann, wissen wir – dem Optimismus einiger Neuronale-Netzwerke-Freaks zum Trotz – noch nichts über die vom Menschen angewandten Strategien, das gleiche Problem zu lösen“, lautet das vernichtende Urteil von Nitsch (1997, S. 15, Übersetzung S.K.).

Wirklich gar nichts? Zunächst einmal liefert das Computermodell so etwas wie einen Existenzbeweis: Es ist möglich, das gegebene Problem mit den im Computermodell verwendeten Mitteln zu lösen. Und im Fall eines konnektionistischen Modells kann ergänzt werden, dass dazu nicht notwendig eine zentrale Instanz oder ein zentraler Prozessor den Lernprozess steuern muss. Konnektionistische Modelle haben bewiesen, dass durch die komplexe, dynamische, verteilte, parallele Interaktion der im Prinzip „dummen“ Neuronen auf der Ebene der Netzwerke „intelligentes“ Verhalten (wie z.B. Musterdiskriminierung) entstehen kann. Dies ist zwar in der Biologie schon

lange bekannt, so können „dumme“ Termiten durch lokale Informationen „intelligent“ ihren Bau erstellen. Doch konnte (und kann?) man sich bei der menschlichen Kognition keine intelligente Leistung ohne eine zentrale Instanz vorstellen.

Nun heißt ein Existenzbeweis aber nur, dass etwas so funktionieren *könnte*, nicht aber, dass es auch beim Menschen so funktioniert. Der Konnektionismus behauptet aber, dass künstliche neuronale Netze angemessene Modelle für menschliche Informationsverarbeitungsprozesse seien. Dabei sind mindestens zwei Schwierigkeiten zu beachten.

Die eine liegt jeder bottom-up Strategie zu Grunde: Diese Strategie geht davon aus, ein gegebenes komplexes Problem zunächst zu ignorieren und sich auf die kleinsten „Problematome“ zu konzentrieren, im Konnektionismus die künstlichen Neuronen. Diese werden gelöst (d.h. als Prozedur oder Modul auf dem Rechner implementiert), dann wird versucht, mithilfe dieser Lösungen „Problemmoleküle“, dann „Problemsubstanzen“ zu lösen (um im Bild zu bleiben), und so weiter, bis schließlich das ganze komplexe Problem gelöst worden ist. Die Schwierigkeit dabei ist, dass niemand garantiert, mit diesem Verfahren tatsächlich an dem gewünschten Ziel anzukommen. Es kann leicht passieren, dass die präsentierte „Lösung“ mit dem eigentlichen Ausgangsproblem nicht mehr allzu viel zu tun hat, dass unerkannte, aber notwendige „Problematome“ nicht implementiert wurden oder dass ihre Wechselwirkungen unberücksichtigt blieben und daher die Lösung nicht erreicht werden konnte.

Das zweite Problem ist, dass selbst eine perfekte Nachbildung eines Ausschnitts der menschlichen Kognition mit dem Rechner noch nicht beweist, dass die zugrunde liegenden Prozesse angemessen modelliert sind. Typisches Beispiel für eine Diskrepanz ist die Simulation eines Schachspielers durch ein Computerprogramm. Dieses Modell kann inzwischen besser Schach spielen als der amtierende Weltmeister, aufgrund der eingesetzten *brute-force*-Strategie sind aber Rückschlüsse auf Mechanismen menschlicher Informationsverarbeitungsprozesse völlig unplausibel. Dieses Problem hat vermutlich auch Nitsch in seinem obigen Zitat angesprochen.

Doch es gibt Möglichkeiten, den Schwierigkeiten zu begegnen. Das Unternehmen „Erforschung der menschlichen Kognition“ wird schon sehr lange betrieben, und es sind schon auf fast allen Ebenen Modelle entwickelt und empirisches Wissen erhoben worden. Daran muss sich eine konsequente bottom-up Strategie „entlanghangeln“. In ein konnektionistisches Modell sollen also theoretische und empirische Erkenntnisse aus Ansätzen, die sich auf höheren (und evtl. auf noch niedrigeren) Ebenen mit Kognition befassen, einfließen. Wenn auf mehreren Ebenen gezeigt werden kann, dass die Ergebnisse von Simulationen mit künstlichen neuronalen Netzen empirischen Daten oder theoretischen Vorhersagen aus anderen psychologischen Para-

digmen entsprechen, oder wenn gar konnektionistische Modelle Verhalten vorhersagen, dass sich nachträglich empirisch bestätigt, wird die Plausibilität eines konnektionistischen Modells wachsen.

Die Möglichkeiten konnektionistischer Modellierung der Person liegen also einerseits in dem Beweis, dass zumindest implizit gesteuerte Handlungen ohne die Existenz einer zentralen Instanz ausgeführt und gelernt werden könnten, andererseits in einer heuristischen Funktion, in dem die Modellierung Probleme aufwirft, die bisher wenig beachtet wurden und Vorhersagen macht, die neue Sichtweisen fördern.

Konnektionismus und handlungstheoretische Psychologie

Wegen ihrer gegensätzlichen Forschungsstrategie erscheinen die handlungspsychologische und die konnektionistische Herangehensweise als unvereinbar. Diese scheinbare Unvereinbarkeit beruht auf der Unterschiedlichkeit der Betrachtungsebenen. Während die Handlungspsychologie eher die Makroebene des menschlichen Verhaltens und Erlebens ins Visier nimmt und von dort aus *top-down* weiterarbeitet, erkundet der Konnektionismus die „microstructure of cognition“ (so der Untertitel des einflussreichen Werks von Rumelhart u.a. (1986) bzw. McClelland u.a. (1986)). Doch wenn wir von der Betrachtungsebene einmal abstrahieren, lassen sich einige Gemeinsamkeiten finden, die eine „Begegnung auf der mittleren Problemebene“ zumindest nicht ausschließen.

Sowohl der handlungstheoretische als auch der konnektionistische Ansatz gehen davon aus, dass das Psychische am besten als ein komplexes dynamisches System angesehen wird. Daraus folgt, dass einfache Ursache-Wirkungs- oder Reiz-Reaktions-Zusammenhänge keine adäquaten Erklärungen für menschliches Handeln sind. Auf der Makroebene führt dies zur Einbeziehung komplexer Intentionshierarchien, auf der Mikroebene zu komplexen Interaktionen von Erregungsvektoren und Gewichtsmatrizen. Damit wird deutlich, dass menschliches Handeln nicht durch Umweltreize determiniert sein kann, sondern dass vergangene bedeutungshaltige Erfahrungen unser Verhalten beeinflussen, dass Handlungen eben durch dieses komplexe dynamische System reguliert werden (Regulationspostulat, vgl. Nitsch, 1986). Dies wird in *beiden* Ansätzen vorausgesetzt.

Schwieriger wird es bei der Betrachtung der Intention. Hier muss sich mindestens eine von zwei verwegenen Hypothesen bestätigen, um den offenkundigen Widerspruch zwischen dem Intentionstheorie (vgl. Nitsch, 1986) und dem ohne ein Modell der Intention arbeitenden Konnektionismus aufzuheben.

Die eine Hypothese lautet, dass die in konnektionistischen Netzen durch die im Training („Erfahrung“) angesammelten Verhaltens- und Bewertungsrelationen bei genügender Komplexität Prozesse entstehen, die als Simulation von Intentionen aufgefasst werden können. In den meisten konnektionisti-

schen Netzen erfolgt die Bewertung allerdings von außen durch Fehlervorgaben. Für die Implementation von systeminternen Bewertungen müssen Bedürfnisse oder Emotionen modelliert und in das Netz integriert werden (vgl. auch Dörner, 1999).

Die zweite Hypothese besagt, dass das, was wir Menschen als Intention erleben, für die Handlungsregulation von untergeordneter, nicht entscheidender Bedeutung ist. Die Entscheidung für oder gegen eine Handlung entsteht im Gehirn in einem von *vorbewussten* Bewertungsrelationen im limbischen System gesteuerten Prozess. Intentionsbildung ist dann ein Vorgang, der *nach* den nicht bewusstseinsfähigen komplexen Aktivitäten des durch Erfahrung erworbenen Bewertungssystems auftritt. Neurobiologische Befunde deuten auf die Richtigkeit dieser Hypothese hin (vgl. Roth, 1996).

Das Modell der Intentionsbildung stellt offensichtlich eine Art Trennlinie zwischen konnektionistischen und handlungspsychologischen Modellen dar, an deren Überwindung aber zurzeit in den verschiedensten Wissenschaftsdisziplinen gearbeitet wird.

Schlussbemerkung

Das Leben, die Welt, der Mensch sind kompliziert und komplex. Wie wir mit dieser Komplexität umgehen, Wichtiges von Unwichtigem unterscheiden, ist eine der faszinierendsten Leistungen unseres handlungsregulierenden Systems. Wollen wir Aussagen über diese Leistungen machen, können wir sie nicht erhalten, indem wir Verhalten einer Versuchsperson im Labor mit einigen wenigen Variablen erfassen. Um aber der Komplexität Herr zu werden, bietet es sich an, den Computer als Hilfsmittel zu benutzen.

Die handlungstheoretische Psychologie will menschliches Handeln in seiner Ganzheit und Komplexität, unter Berücksichtigung sowohl der Person als auch von Umwelt und Aufgabe, verstehen. Die Modellierung mit dem Computer eröffnet hier die Möglichkeit, die Komplexität der Situation handhabbar und überschaubar zu machen. Dabei muss jedoch sorgfältig auf die pragmatischen Verkürzungen des Computermodells geachtet werden. Seine Grenzen erfährt das Computermodell dort, wo die Analogie zwischen Modell und Original nicht mehr gegeben ist. Diese Grenze nach rationalen Kriterien zu finden und zu ziehen ist nicht immer leicht, insbesondere verstimmt die emotionale Begeisterung der Forscher über einige Eigenschaften ihres Modells hier häufig den Blick. Ich hoffe, dass es mir in diesem Beitrag gelungen ist, den Blick dafür zu schärfen.

Literatur - Künzell

- Dörner, D. (1989). Die Logik des Mißlingens. Strategisches Denken in komplexen Situationen. Reinbek: Rowohlt.
- Dörner, D. (1994). Heuristik der Theorienbildung. In T. Herrmann & W. H. Tack (Hrsg.), *Methodologische Grundlagen der Psychologie. Enzyklopädie der Psychologie, Serie "Forschungsmethoden der Psychologie"*, Band 1 (S. 343-388). Göttingen u.a.: Hogrefe.
- Dörner, D. (1999). *Bauplan für eine Seele*. Reinbek: Rowohlt.
- Dörner, D., Kreuzig, H. W., Reither, F. & Stäudel, T. (Hrsg.). (1983). *Lohhausen. Vom Umgang mit Unbestimmtheit und Komplexität*. Bern: Huber.
- Haken, H. & Stadler, M. (Eds.). (1990). *Synergetics of cognition*. Berlin: Springer.
- Hebb, D. O. (1949). *The organisation of behavior*. New York: Wiley.
- Herzog, W. (1984). *Modell und Theorie in der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.
- Heuer, H. (1988). Motorikforschung zwischen Elfenbeinturm und Sportplatz. In R. Daus (Ed.), *Neuere Aspekte der Motorikforschung* (S. 52-69). Clausthal-Zellerfeld: dvs.
- Jordan, M. I. & Rumelhart, D. E. (1992). Forward models: Supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Science*, 16, 307-354.
- Künzell, S. (1996). *Motorik und Konnektionismus. Neuronale Netzwerke als Modell interner Bewegungsrepräsentationen*. Köln: bps.
- McClelland, J.L., Rumelhart, D.E. & the PDP Research Group (eds.). (1986). *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition* (Vol. 2). Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- McCulloch, W. S. & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.
- Nitsch, J. R. (1986). Zur handlungstheoretischen Grundlegung in der Sportpsychologie. In H. Gabler, J. R. Nitsch, & R. Singer (Hrsg.), *Einführung in die Sportpsychologie. Teil 1. Grundthemen* (S. 188-270). Schorndorf: Hofmann.
- Nitsch, J. R. (1991). Handlungstheorie und empirische Forschung. In R. Singer (Ed.), *Sportpsychologische Forschungsmethoden - Grundlagen, Probleme, Ansätze* (S. 26-42). Köln: bsp.
- Nitsch, J. R. (1997). Empirical research in sport psychology: A critical review of the laboratory - field controversy. In R. Singer (Ed.), *European Yearbook of Sport Psychology* (Vol. 1, pp. 1-25). St. Augustin: Academia.
- Reichert, U., & Dörner, D. (1988). Heurismen beim Umgang mit einem "einfachen" dynamischen System. *Sprache und Kognition*, 7, 12-24.
- Rojas, R. (1993). *Theorie der neuronalen Netze. Eine systematische Einführung*. Berlin u.a.: Springer.
- Roth, G. (1996). *Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Kognitive Neurobiologie und ihre philosophischen Konsequenzen*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. & Williams, D. E. (1986). Learning internal representations by error propagation. In D. E. Rumelhart, J. L. McClelland & The PDP research group (Eds.), *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition. Volume 1: Foundations* (pp. 318-362). Cambridge, Mass.: MIT Press.

- Rumelhart, D. E., McClelland, J. L. & The PDP Research Group (Eds.). (1986). Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition (Vol. 1). Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
- Steinbuch, K. (1971). Technische Modelle biologischer Vorgänge. In H. v. Dittfurth (Ed.), Informationen über Information - Probleme der Kybernetik (S. 55-65). Frankfurt/Main: Fischer.
- Szymanski, B. (1997). Techniktraining in den Sportspielen - bewegungszentriert oder situationsbezogen? Hamburg: Czwalina.

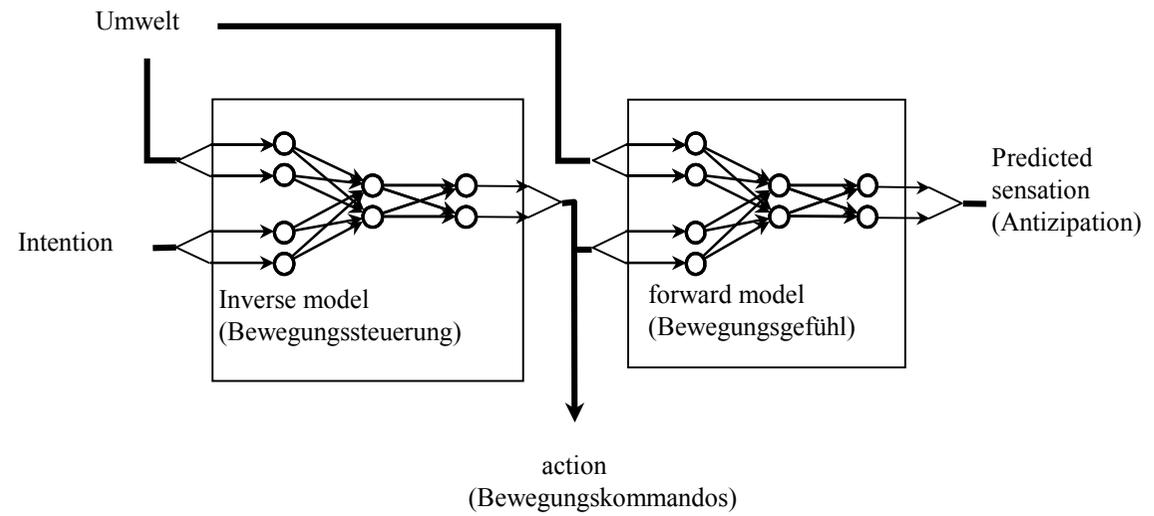


Abb. 1: Ein konnektionistisches Modell zum Bewegungslernen nach Jordan und Rumelhart (1992). Die geklammerten deutschen Begriffe sind hinzugefügt. Sie übersetzten die Begriffe der Kontrolltheorie in die Sprache der Sportwissenschaft.