

Spekulationen zur Struktur ideo-motorischer Beziehungen

Joachim Hoffmann, Martin V. Butz, Oliver Herbort, Andrea Kiesel
und Alexandra Lenhard

Universität Würzburg

Zusammenfassung. Nach der ideo-motorischen Hypothese werden Aktionen mit ihren kontingenten sensorischen Effekten bidirektional verbunden, so dass eine Antizipation der Effekte direkt die Aktionen aktiviert, die erfahrungsgemäß das Antizipierte hervorbringen. Wir diskutieren (1) die Rolle von exterozeptiven und propriozeptiven Effekten, (2) die Situationsabhängigkeit von Aktions-Effekt Beziehungen, (3) die Notwendigkeit abstrakter effektorunspezifischer Aktionsrepräsentationen und schließlich (4) die Verwertung von sensorischen Rückmeldungen bei der Kontrolle der Aktionsausführung. Unsere Diskussion führt zu einer hypothetischen Struktur ideo-motorischer Beziehungen, in der die „Idee“ (das antizipierte Ziel) die „Motorik“ (die Körperbewegung) über eine Kaskade von inversen Modellen determiniert.
Schlüsselwörter: Wahrnehmung, motorische Kontrolle, motorisches Lernen

Speculations about the structure of ideomotor relations

Abstract. The ideomotor hypothesis predicts that actions become connected bidirectionally with their sensory effects so that anticipations of the effects directly trigger the actions that have been learned to produce them. This article discusses (1) the role of both exteroceptive and proprioceptive effects, (2) the dependency of action-effect relations on the current situation, (3) the need for more abstract, effector-unspecific action representations, and finally (4) the use of sensory feedback in action control. The discussion leads to the formulation of a tentative structure of ideomotor relations in which the “idea” (anticipated goal) determines the “motor activity” (body movements) over a cascade of inverse models.
Key words: perception, motor control, motor learning

Die ideo-motorische Hypothese

Wie geschieht es, dass unser Körper in aller Regel unserem Willen gehorcht, dass etwa, wenn ich trinken will, sich meine Hände so bewegen, dass sie tatsächlich die Tasse ergreifen und zum Munde führen? Da wir Menschen, wie alle anderen Tiere auch, uns nicht anders bewegen können, als durch die Kontraktion von Muskeln, lautet die Frage letztlich: Wie bestimmt unser „Wille“ wann welche Muskeln in welcher Stärke und mit welcher Dauer zucken, damit das, was wir wollen, auch geschieht? Die ideo-motorische Hypothese (IMH) suggeriert auf diese grundlegende Frage eine auf den ersten Blick verblüffend einfache Antwort: Die IMH geht davon aus, dass sich jede (zunächst unwillkürliche) Aktion des Körpers mit den eintretenden sensorischen Effekten zwangsläufig so verbindet, dass allein die Idee (die Antizipation) der Effekte ausreicht, um diejenige Aktion hervorzubringen, die erfahrungsgemäß zum antizipierten Effekt führt (Abbildung 1).

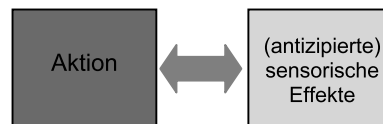


Abbildung 1. Veranschaulichung einer direkten bidirektionalen Beziehung zwischen Aktionen und den von ihnen hervorgebrachten sensorischen Effekten.

Die IMH hat eine lange Geschichte. In England kann sie bis zu Thomas Leycock (1845) und in Deutschland bis zu Johann Friedrich Herbart (1825) zurückverfolgt werden, und bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts war sie als allgemeiner Erklärungsansatz weitgehend akzeptiert (vgl. Stock & Stock, 2004). So verweist etwa Harleß (1861, S. 67/68) darauf, dass „... eine intensive Empfindung des Effektbildes ... das primäre und unerlässliche Erfordernis für die Ausführung einer willkürlichen Bewegung ist“. Im gleichen Sinne konstatiert James (1981/1890, S. 1112), dass: „... an anticipatory image, then, of the sensorial consequences of a movement, ... is the only psychic state which introspection lets us discern as

the forerunner of our voluntary acts.“ und auch Münsterberg (1889, S. 23/24) sieht jedem Verhaltensakt ein Innervationsgefühl vorausgehen, das „... nichts anderes ist, als die Erinnerungsvorstellung der früher vollzogenen Wahrnehmung.“ Man war sich also in der Auffassung einig, dass willkürliche Verhaltensakte von Erinnerungen oder Antizipationen der zu erzeugenden sensorischen Effekte determiniert werden.

Für den mit dem 20. Jahrhundert aufkommenden Behaviorismus war die Vorstellung, dass Verhalten durch nicht beobachtbare Zustände wie Erinnerungen oder Antizipationen determiniert werden, allerdings ein Sakrileg. Die IMH wurde von den Behavioristen grundsätzlich abgelehnt und nicht selten lächerlich gemacht, wie etwa 1913 vom damaligen Präsidenten der Amerikanischen Psychologen Vereinigung, Edward Thorndike, der die IMH mit dem primitiven Glauben von Naturvölkern verglich: „... shocking as it may seem, it can be shown that the orthodox belief of modern psychologists, that an idea of a movement tends to produce the movement which is like it, is a true child of primitive man's belief that if you sprinkle water in a proper way your mimicry tends to produce rain“ (Thorndike, 1913, S. 101).

Auch als in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts die Kognitionspsychologie den Behaviorismus ablöste, wurde die „perverse“ Fixierung (Dickinson, 1994, S. 48) des Behaviorismus auf Reiz-Reaktionsbeziehungen nicht wirklich überwunden. So definierte etwa Neisser (1967, S. 4): „... the term cognition refers to all the processes by which the sensory input is transformed, reduced, elaborated, stored, recovered, and used“. Für den Kognitivisten wie für den Behavioristen beginnen also die interessierenden psychischen Prozesse gleichermaßen mit dem sensorischen Input, mit der Wirkung von Reizen. Den Reizwirkungen vorausgehende intentionale Zustände werden aus der Betrachtung ausgeschlossen. In der Konsequenz blieb die IMH über Jahrzehnte ohne nachhaltigen Einfluß auf theoretische Überlegungen zur Verhaltensdetermination (für Ausnahmen vgl. Hoffmann, 1993).

Erst in den letzten Jahren ist das wissenschaftliche Interesse an der IMH wieder erwacht. Dabei wird eine Rekapitulation der theoretischen Überlegungen (z. B. Hoffmann, 1993, 2001, 2003; Hommel, 1996, 1998, 2003; Kunde, 2006; Paelecke & Kunde, 2005; Prinz, 1987, 1992, 1998) durch zahlreiche experimentelle Untersuchungen zur Überprüfung der IMH ergänzt. Im Wesentlichen werden zwei methodische Ansätze verfolgt:

Der erste Ansatz folgt einem Vorschlag von Greenwald (1970a): Die Probanden erleben in einer ersten (Lern)Phase, dass von ihnen geforderte willkürliche Aktionen zu kontingenten sensorischen Ef-

fekten führen, etwa das Drücken einer linken Taste zu einem hohen und das Drücken einer rechten Taste zu einem tiefen Ton. In einer zweiten (Test)Phase wird geprüft, ob die Darbietung der erlebten sensorischen Effekte selektiv die Aktivierung derjenigen Aktionen erleichtert, deren Effekt sie zuvor waren – im Beispiel also der hohe Ton das Drücken der linken und der tiefe Ton das Drücken der rechten Taste (z. B. Beckers, De Houwer & Eelen, 2002; Elsner & Hommel, 2001, 2004; Hommel, 1996; Hommel, Alonso & Fuentes, 2003).

Der zweite Ansatz geht von dem etablierten Befund aus, dass kompatible Reiz-Reaktionszuordnungen zu besseren Leistungen führen als inkompatible Zuordnungen (Simon & Rudel, 1967). Wenn nun, so die Überlegung, sensorische Effekte unerlässliche Antezedenzen willkürlicher Aktionen sind (Kunde, 2006), dann sind zwischen Aktionen und Effekten gleiche Kompatibilitätseffekte zu erwarten, wie zwischen Reizen und Reaktionen: So, wie eine rechte Taste auf einen rechts dargebotenen Reiz schneller gedrückt wird als auf einen links dargebotenen Reiz (S-R Kompatibilität), so sollte eine rechte Taste auch schneller gedrückt werden, wenn sie rechts anstatt links zu einem Effekt führt (R-E Kompatibilität), eben weil die Antizipation dieses Effektes eine unabdingbare Voraussetzung der Aktionsinitiierung ist (z. B. Kunde, 2001, 2003; Kunde, Koch & Hoffmann, 2004; Stöcker, Sebald & Hoffmann, 2003).

Ohne hier auf die Befunde im Einzelnen einzugehen sei festgestellt, dass beide methodische Ansätze verlässliche Hinweise darauf erbracht haben, dass Repräsentationen von sensorischen Effekten bereits vor der Ausführung der geforderten Aktionen aktiviert werden und Einfluß auf die Auswahl, Initiierung und Ausführung der Aktionen nehmen. Die vor mehr als hundert Jahren auf der Grundlage introspektiver Beobachtungen geäußerten Vermutungen zur Determination von Willküraktionen durch die Antizipation der zu erzeugenden sensorischen Konsequenzen finden nun endlich – ist man versucht zu sagen – ihre experimentelle Bestätigung.

Ist nun die Frage, wie der „Wille“ den Körper kommandiert, geklärt? Wissen wir nun, wie die Bewegungen unserer Glieder so bestimmt werden, dass das, was wir wollen, auch geschieht? Mitnichten! Die IMH wirft zu viele Fragen auf, um schon eine Antwort sein zu können.

Wie werden Aktions-Effekt Beziehungen gelernt?

Die IMH verlangt zwingend, dass Aktions-Effekt Beziehungen gelernt werden – wie sonst sollte der „Wille“ wissen, welche Aktion welchen Effekt zu erzeugen vermag?

Für den Aufbau von Verbindungen zwischen Aktionen und nachfolgend eintretenden Effekten sind bewährte fehlerbasierte Lernmechanismen, wie etwa die Delta-Regel, bekannt (Hinton, 1989). Die Effektantizipationen werden hier mit den tatsächlich eintretenden Effekten verglichen und der registrierte Fehler wird benutzt, um die Antizipationen den tatsächlich eintretenden Effekten immer besser anzugleichen. Die IMH verlangt aber nicht nur den Erwerb von Aktions→Effekt Beziehungen sondern auch deren Umkehrbarkeit, so dass also nicht nur Aktionen Erwartungen über die erfahrungsgemäß eintretenden sensorischen Konsequenzen auslösen (Vorwärts-Modell), sondern dass auch umgekehrt Antizipationen von Konsequenzen diejenigen Aktionen bestimmen, die erfahrungsgemäß das Antizipierte zu erzeugen vermögen (Inverses Modell). Aktions→Effekt Beziehungen sind aber niemals in dem Sinne eindeutig, dass zur Erreichung eines Effektes immer nur ein und dieselbe Aktion führt. Im Gegenteil, jeder Effekt wird in aller Regel durch unabzählbar viele verschiedene Aktionen erreicht. Allein schon aufgrund dieser Redundanz sind Aktions→Effekt Beziehungen nicht einfach umkehrbar.

Vermutet man dementsprechend separate Lernmechanismen für den Erwerb des Inversen Modells (Effekt→Aktion) ist man mit dem Problem konfrontiert, dass kein Lernsignal zur Verfügung steht: Während für die Belehrung des Vorwärts-Modells die real eintretenden sensorischen Konsequenzen genutzt werden können, existiert für das inverse Modell keine Instanz, die jeweils die auszuführende Aktion vorgeben könnte (das distal supervised learning problem, Jordan & Rumelhart, 1992). Auf Überlegungen zu Lernmechanismen, die auch ohne Belehrungssignal zum Aufbau konsistenter Inverser Modelle führen, kann hier nicht eingegangen werden (vgl. z.B. Kalveram, 2004; Rosenbaum et al., 1995, 2001; Herbort, Butz & Hoffmann, 2005; Butz, Herbort & Hoffmann, 2007). Wir wollen lediglich festhalten, dass noch keinesfalls geklärt ist, welche Lernmechanismen die von der IMH geforderte bidirektionale Aktivierbarkeit von Aktions↔Effekt Beziehungen gewährleisten. Die im nächsten Punkt zu diskutierende Unterscheidung verschiedener Arten von Effekten wirft zudem die Frage auf, ob Aktions↔Effekt Lernen überhaupt auf einem einheitlichen Lernmechanismus beruht.

Was ist ein Effekt?

Bereits William James hat bei der Besprechung der IMH zwischen „remote effects, made by the movement on the eye or ear or distant skin, etc.“ und „resident effects, made on the moving parts themselves, muscles, joints, etc.“ unterschieden (James, 1981/

1890, S. 1127). Wir wollen hier etwas allgemeiner zwischen Effekten unterscheiden, die sich auf den eigenen Körper beziehen und solchen, die sich auf Veränderungen in der Umwelt beziehen (vgl. auch Heuer, 1983).

Die beiden Effektklassen unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer „Intendiertheit“: Obwohl prinzipiell jeder sensorische Effekt intendiert sein kann, zielen Aktionen gewöhnlich nicht darauf, ein bestimmtes Körpergefühl zu erzeugen. In der Regel geht es vielmehr darum, bestimmte Effekte in der Umwelt zu erreichen, etwa das Licht anzuschalten, eine Tür zu öffnen, Kaffee einzugießen usw. Darüber hinaus unterscheiden sich die beiden Effektklassen in ihrer Kontingenzt zu den Aktionen. Während Körpereffekte weitgehend eindeutig an die Aktionen gebunden sind, können die Umwelteffekte ein und derselben Aktion sehr unterschiedlich ausfallen. So führt etwa die Fingerbewegung, mit der eine Taste gedrückt wird, stets zu annähernd demselben Gefühl des sich bewegenden Fingers, aber zu sehr unterschiedlichen Effekten in der Umwelt, je nachdem womit die Taste verbunden ist.

Beides, die unterschiedliche Intendiertheit und die unterschiedlichen Kontingenzen lassen vermuten, dass Umwelt- und Körpereffekten unterschiedliche Funktionen in der Verhaltenskontrolle zuzuschreiben sind. Eine Vermutung, die Johann Friedrich Herbart schon vor 180 Jahren teilte: „Gleich nach der Geburt eines Menschen oder eines Thieres entstehn aus bloß organischen Gründen, unabhängig von der Seele, gewisse Bewegungen in den Gelenken; und jede solche Bewegung erregt in der Seele ein bestimmtes Gefühl. Im nämlichen Augenblicke wird durch den äußern Sinn wahrgenommen, was für eine Veränderung sich zugetragen habe; [...] In einer späteren Zeit erhebt sich ein Begehren nach der beobachteten Veränderung. Damit reproducirt sich das zuvor mit dieser Beobachtung complicirte Gefühl. [Diesem entsprechen] in den Nerven und Muskeln alle die inneren und äußeren Zustände, vermittels deren die beabsichtigte Veränderung in der Sinnenphäre hervorgebracht werden“ (Herbart, 1825, S. 464).

Bereits Herbart hatte also gesehen, dass es zwischen den Antizipationen von zu erreichenden Umwelteffekten und der Aktivierung der sie erzeugenden Aktionen einer Vermittlung bedarf. Die antizipierten (intendierten) Umwelteffekte, so seine Vermutung, reproduzieren zunächst die mit ihnen „complicierten“ (Körper-)Gefühle und erst diesen entsprechen dann all die Zustände in den Nerven und Muskeln, die zur erforderlichen Bewegung der Körperteile führen. Es ist danach nicht eine sondern es sind zwei „Verbindungen“ zu lernen: Einmal die „Complicierung“ oder Assoziation von Körpergefühlen und Umweltverän-

derungen und zum zweiten „Entsprechungen“ zwischen Körpergefühlen und den die Bewegung verursachenden Nerven- und Muskelveränderungen.

Das Erlernen der „Entsprechungen“ wird vermutlich durch die hohen Kontingenzen zwischen bewegungsspezifischen Efferenzen und propriozeptiven Reafferenzen begünstigt, so dass ein Hebb'scher Lernprozess nach der Regel „what fires together wires together“ erfolgreich sein könnte. Es würde sich um einen zwangsläufigen Lernvorgang handeln, mit dem die Beherrschung des eigenen Körpers gelernt wird. Ob eine gleiche Zwangsläufigkeit für die Integration von Umwelt-Effekten angenommen werden kann, ist dagegen fraglich. Als unstrittig darf gelten, dass Aktionen mit *intendierten* Umwelt-Effekten verbunden werden, deren Eintreten ja als Bekräftigung der ausgeführten Aktion erlebt wird („response-outcome“ Lernen, vgl. Stock & Hoffmann, 2002; Wasserman et al., 1993). Fraglich ist hingegen, inwieweit auch nicht intendierte Umwelt-Effekte mit den Aktionen verbunden werden, die sie kontingent hervorbringen.

Die Mehrzahl der aktuellen Arbeiten zum Nachweis von Aktions-Effekt Lernen hat gezeigt, dass (zumeist) einfache Tastenreaktionen durchaus mit nicht-intendierten Umwelt-Effekten (Töne, visuelle Reize) verbunden werden. Dementsprechend ist die Zwangsläufigkeit des Aktions-Effekt-Lernens auch für nicht intendierte Umwelt-Effekte vermutet worden (z. B. Elsner & Hommel, 2001; Kunde, Hoffmann & Zellmann, 2002; Ziebler, 1998). Allerdings förderten die Bedingungen dieser Untersuchungen in aller Regel eine Beachtung der nicht-intendierten Umwelt-Effekte: Entweder, weil die Umwelt-Effekte in genau den Dimensionen variierten, in denen sich auch die Reaktionen unterschieden, oder weil es die einzigen Umwelt-Effekte waren, die überhaupt eintraten. Wenn dagegen die Aufmerksamkeit von Umwelt-Effekten abgelenkt wird, findet sich keine verlässliche Evidenz mehr für Aktions-Effekt-Lernen. Ziebler, Nattkemper und Frensch (2004) berichten bspw. über Experimente, in denen Tastenreaktionen sowohl von intendierten als auch von nicht-intendierten Umwelt-Effekten kontingent gefolgt wurden. Es zeigte sich, dass die Tastenreaktionen zwar mit den intendierten aber eben nicht mit den nicht-intendierten Umwelt-Effekten verbunden wurden (vgl. auch Ansorge, 2002, 2006; Hoffmann & Sebald, 2000). Diese intentionale Abhängigkeit der Lernmechanismen verweist eher auf überwachtes anstelle von latentem, zwangsläufigem Lernen.

Es ist auf jeden Fall die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, dass beim Aufbau von Aktions-Effekt-Beziehungen zwei Lernvorgänge zu unterscheiden sind, die keineswegs den gleichen Gesetzen gehorchen müssen: Zum einen Lernmechanismen zur Beherr-

schung des eigenen Körpers und zum zweiten Lernmechanismen zum Einsatz des Körpers für das Erreichen von angestrebten Umwelt-Effekten.

Die Situationsabhängigkeit der Aktions-Effekt-Beziehungen

Umwelt-Effekte sind oft deshalb nicht kontingent an bestimmte Aktionen gebunden, weil ihr Eintreten von der jeweiligen Situation abhängig ist. Das Drücken der Maustaste führt etwa zu sehr unterschiedlichen Effekten, je nachdem wo sich der Cursor befindet, und ein und dieselbe Bewegung führt bei einem Return im Tennis zu sehr unterschiedlichen Konsequenzen, je nachdem ob der Ball „angeschnitten“ gewesen ist oder nicht. Wenn, wie in diesen Fällen, der Erfolg von Aktionen davon abhängt, ob die passenden Ausgangsbedingungen gegeben sind, wird in der Regel auch gelernt, die Ausgangsbedingungen im Handeln zu berücksichtigen. Der Aufbau von Aktions-Effekt-Beziehungen ist also durch einen Lernmechanismus zu ergänzen, der gewährleistet, dass Aktions-Effekt-Beziehungen immer dann situationsabhängig repräsentiert werden, wenn ihre Kontingenz von Situationsmerkmalen systematisch abhängt (Hoffmann, 1993, 2001, 2003).

Der Erwerb von situationsabhängigen Aktions-Effekt-Beziehungen hängt von der Ausrichtung der Aufmerksamkeit ab (Hoffmann & Sebald, 2000; Stock & Hoffmann, 2002): Für den Handlungserfolg kritische Situationsmerkmale werden erst dann in die Handlungssteuerung einbezogen, wenn sie aufgrund ihrer Auffälligkeit oder aus anderen Gründen beachtet werden. Ist die Beachtung aber gegeben, dann werden sie gleichermaßen an die Aktionen gebunden wie beachtete Effekte. Eine entsprechende Aktionsbereitschaft ist dann sowohl durch Antizipationen der zu erzeugenden Effekte als auch durch Antizipationen von kritischen Situationsmerkmalen repräsentiert – eine Einsicht, die schon Narziß Ach teilte: „Der gegenständliche Inhalt unserer Willensabsichten umfasst die Zielvorstellung (das, was ich will) und die Bezugsvorstellung (das, worauf sich mein Wollen bezieht). Die Willenshandlung ... setzt dann ein, wenn die Bezugsvorstellung (die Gelegenheit zum Handeln) nicht bloß gedanklich gegeben oder antizipiert ist, ... sondern wenn sie in Wirklichkeit vorliegt ...“ (Ach, 1932, S. 341). Wenn man zudem bedenkt, dass selbst Ratten es lernen, dass etwa das Drücken einer Taste bei Licht zu Futterkugeln und bei Klickergeräuschen zu Süßwassertropfen führt (Colwill & Rescorla, 1990), dann wird deutlich, dass die situationsabhängige Differenzierung ein elementares Merkmal der Struktur von handlungssteuernden Aktions-Effekt-Beziehungen ist.

Was ist eine Aktion?

So, wie wir diskutiert haben, welche Arten von „Effekten“ in handlungssteuernde Aktions-Effekt-Beziehungen eingebunden werden, so ist auch zu hinterfragen, in welcher Form „Aktionen“ in diesen Beziehungen repräsentiert werden. Handelt es sich beim motorischen Teil der ideo-motorischen Beziehung um die konkreten efferenten Aktivierungsmuster für eine ganz bestimmte Bewegung des Körpers? Obwohl letztlich konkrete Bewegungen zu bestimmen sind, ist es doch aus wenigstens zwei Gründen unwahrscheinlich, dass intendierte (Umwelt)Effekte die auszuführenden Bewegungen direkt determinieren. Erstens ist zur Erreichung ein und desselben Effektes nur äußerst selten ein und dieselbe Bewegung erforderlich. Selbst unter so konstanten Bedingungen wie beim Schreiben auf einer Tastatur, variieren die Bewegungen von Hand und Finger, die zum Schreiben etwa eines bestimmten Buchstabens erforderlich sind, beträchtlich. Auch wenn man annimmt, dass nicht die Bewegung selbst, sondern lediglich zu erreichende Hand- und Fingerhaltungen determiniert werden, bleibt das Problem der Variabilität bestehen, da sich in Abhängigkeit von den Ausgangssituationen auch verschiedene finale Hand- und Fingerhaltungen einstellen. Es ist somit nutzlos, in Aktions-Effekt-Beziehungen konkrete Bewegungen oder Körperhaltungen zu speichern, die kaum jemals wieder zum Erreichen der jeweils intendierten Effekte benötigt werden (Hoffmann & Lenhard, 2004).

Zum zweiten gilt, dass Aktions-Effekt-Beziehungen, die für die Kontrolle der Bewegungen eines bestimmten Effektors erworben worden sind, weitgehend auf andere Effektoren übertragen werden können. Dies ist insbesondere für den intermanuellen Transfer gezeigt worden: Aktions-Effekt-Beziehungen, die mit der rechten Hand trainiert worden sind, können von der linken Hand ohne weiteres Training annähernd vollständig übernommen werden (z.B. Criscimagna-Hemminger et al., 2003; Hazeltine, 2002; Sainburg & Wang, 2002). Betrachten wir zur Illustration das Beispiel einer aktuellen Untersuchung von Lenhard und Hoffmann (2004).

Die Probanden (Pbn) tippten mit einem in der rechten Hand gehaltenen Stift auf jeweils vorgegebene Zieltasten eines virtuellen 3 mal 3 Tastenfeldes. Die Pbn konnten weder die sich bewegende Hand noch den Stift aber einen blauen Punkt sehen, der stellvertretend die Bewegungen des Stiftes über dem virtuellen Tastenfeld widerspiegelte. Die Lage des Punktes im virtuellen Display entsprach dabei exakt den tatsächlichen Bewegungen der Hand, respektive der Stiftspitze, bis auf eine Ausnahme: Immer dann, wenn ein bestimmtes Zielfeld zu erreichen war, wurde die Rückmeldung so manipuliert, dass die

Hand das Ziel überschießen musste, um den blauen Punkt auf dem Ziel zu sehen. Für das Erreichen dieses einen Zieles musste also die rechte Trainingshand eine neue Bewegungsweite lernen. Die Pbn lernten diese neue Aktions-Effekt-Beziehung. Das kritische Ziel wurde auch dann überschossen, wenn der blaue Punkt ausgeblendet wurde und somit keine visuelle Rückmeldung mehr über die Bewegungen der Hand zur Verfügung stand. Das gleiche Ergebnis zeigte die linke Hand: Ohne jedes weitere Training überschossen die Pbn die kritische Zieltaste gleichermaßen mit der untrainierten linken wie mit der trainierten rechten Hand. Die mit der rechten Hand erworbene neue Aktions-Effekt-Beziehung (Bewegungsweite-Zieltaste) wurde also unmittelbar von der linken Hand übernommen.

Das Ergebnis ist insofern bemerkenswert, als den Transfer auch diejenigen Pbn zeigten, die die selektive Veränderung der Bewegungsweite für eines der Ziele nicht bemerkt hatten. Damit kann ausgeschlossen werden, dass es sich bei dem Transfer um eine bewusste strategische Anpassung der Bewegungsweite handelt. Wir können vielmehr vermuten, dass die auf das kritische Ziel bezogene neue Bewegungsweite der rechten Hand in einem Format repräsentiert worden ist, auf das die Kontrolle der linken Hand gleichermaßen zugreifen kann. Es könnte sich hier um eine nicht-visuelle Repräsentation des körpernahen Raumes handeln, auf die alle Effektoren gleichermaßen referieren können, so dass beispielsweise der dort repräsentierte Ort, an dem sich die Spitze des rechten Zeigefingers befindet, unmittelbar auch die Bewegungen bestimmt, die die linke Hand ausführen muss, um diesen Ort zu erreichen (vgl. Schicke & Röder, 2006; Spence & Driver, 2004).

Die Überlegung, dass ein bestimmter Effekt praktisch nie durch genau ein und dieselbe Bewegung erreicht werden kann und die Tatsache, dass Aktions-Effekt-Beziehungen, die mit einem Effektor erworben wurden, auf andere Effektoren übertragen werden, weisen zwingend darauf hin, dass in Aktions-Effekt-Beziehungen die Aktionen (auch) auf eine effektorunspezifische Weise repräsentiert sein müssen, etwa in Form von Bewegungsparametern die von beliebigen Effektoren übernommen werden können. Dies schließt selbstverständlich effektorspezifische Repräsentationen insbesondere für hoch trainierte und weitgehend gleichförmige Bewegungsabläufe nicht aus (vgl. Rieger, 2004; Verwey & Clegg, 2005; Verwey & Wright, 2004; Berner & Hoffmann, in press).

Wie wird die Ausführung der Aktionen kontrolliert?

Anthony Greenwald hatte schon 1970 konstatiert, dass die IMH keine Aussagen zur Ausführung von

Aktionen macht: „The problem of explaining response execution ... has been set aside temporarily until a more precise formulation of the ideomotor linkage is available“ (Greenwald, 1970b, S. 96). Dies ist nun 37 Jahre her und die IMH ist noch immer nicht durch Überlegungen zur Funktion von Effektantizipationen bei der Aktionsausführung ergänzt worden.

Eine Kontrolle der Ausführung willkürlicher Bewegungen kann allein unter Nutzung sensorischer Rückmeldungen realisiert werden; da nur das kontrolliert werden kann, was „gemessen“ wird. Es liegt deshalb nahe, anzunehmen, dass die Ausführungskontrolle durch einen Vergleich der antizipierten mit den eintretenden sensorischen Effekten geschieht, so wie dies auch in anderen Konzeptionen zur Verhaltenskontrolle angenommen wird (z.B. Adams, 1971; Schmidt, 1975; Miller, Galanter & Pribram, 1960; Desmurget & Grafton, 2000). Nach der getroffenen Unterscheidung von Körper- und Umwelt-Effekten ist weiter anzunehmen, dass sowohl Rückmeldungen über das sich bei der Bewegung einstellende Körpergefühl (effektorspezifisch als auch effektorunspezifisch) als auch über die in der Umwelt erreichten Veränderungen für die Ausführungskontrolle genutzt werden. Wenn etwa Jonathan Cole in seinem Buch „Pride and the daily marathon“ beschreibt, wie ein deafferenzierter Patient im Dunklen noch nicht einmal aufrecht stehen kann (Cole, 1995), dann verweist dies auf die bedeutsame Rolle, die propriozeptive Rückmeldungen über den eigenen Körper selbst bei der Kontrolle von Körperhaltungen spielen. Und wenn gezeigt wird, dass nach 2000facher Wiederholung ein und derselben Zielbewegung das Ausschalten visueller Rückmeldungen zu einer stärkeren Leistungsminderung führt als nach nur 200facher Wiederholung (Proteau et al., 1987), dann verweist dies genau so zwingend auf die Nutzung exterozeptiver (hier visueller) Rückmeldungen über Umwelteffekte bei der Kontrolle selbst einfachster und hochgeübter Aktionen. Die Struktur ideomotorischer Aktions-Effekt-Verbindungen ist also durch entsprechende Rückmeldungsschleifen zur Kontrolle des Eintretens antizipierter körper- und umweltbezogener Effekte zu ergänzen (Abb. 2).

Mit der Einbeziehung von Rückmeldungsschleifen gerät die zeitliche Dynamik ideomotorischer Beziehungen in den Blickpunkt: Rückmeldungen benötigen Zeit und stehen somit der Kontrollinstanz stets mehr oder weniger verzögert zur Verfügung. Bei der Ausführung von Aktionen stehen wohl Informationen über Veränderungen der Muskelzustände am schnellsten zur Verfügung. Demgegenüber dürften integrierte Informationen über Veränderungen effektorunabhängiger Bewegungsparameter etwas später übermittelt werden. Informationen über das Eintreten von in der

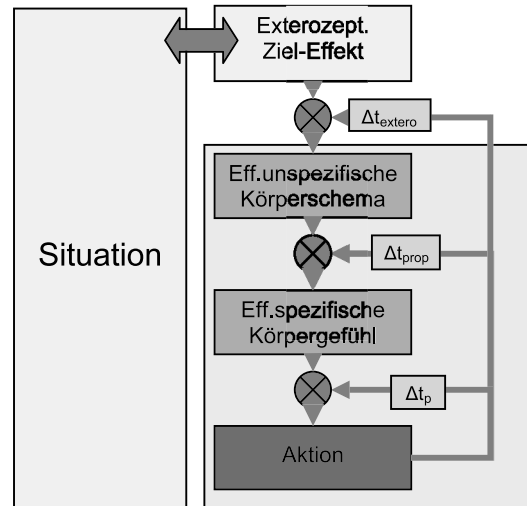


Abbildung 2. Veranschaulichung zur Realisierung von situationsabhängigen Aktions-Effekt-Beziehungen in kaskadisch organisierten Regelmechanismen.

Umwelt angestrebten Veränderungen stehen schließlich noch weiter verzögert zur Verfügung. Damit gilt aber auch, dass Abweichungen von den jeweiligen Zielgrößen unterschiedlich schnell für eine Korrektur der Aktionsausführung genutzt werden können; Abweichungen von angestrebten Muskelzuständen können schneller als Abweichungen von effektorunspezifischen Bewegungsparametern und diese wiederum schneller als umweltbezogene Zielabweichungen kompensiert werden.

Aus diesen Zusammenhängen ergibt sich, dass Abweichungen von den Zielgrößen der jeweils langsamer „getakteten“ Regelkreise die Zielgrößen der jeweils schneller „getakteten“ Regelkreise determinieren müssen, wenn eine Ausführungskontrolle unter Einbeziehung aller Rückmeldungen gelingen soll. In der Konsequenz führt dies zu kaskadisch aufeinander bezogene Regelmechanismen, in denen die aktuellen Abweichungen auf jeder Ebene zu entsprechenden Zielvorgaben (Antizipationen) der jeweils nachgeordneten Ebene führen: Die Differenz zum angestrebten Umweltziel bestimmt die anzustrebenden effektorunspezifischen Bewegungsparameter und deren Differenz zu den gegebenen Parametern bestimmt die effektorspezifischen Vorgaben bis hin zu den notwendigen Muskelkontraktionen, die den Körper in Bewegung setzen, bis alle Differenzen auf allen Ebenen aufgehoben sind. Jede dieser Stufen stellt gewissermaßen ein inverses Modell dar, in dem repräsentiert (gespeichert) ist, welche Ziele oder Führungsgrößen für unmittelbar nachgeordnete Stufen (der output) so vorzugeben sind, dass die Differenz zwischen dem „eigenen“ Ziel und dem aktuellen rückgemeldeten Zustand (der Input) reduziert wird. Das Erlernen ideomotorischer Beziehungen ist nach dieser Vor-

stellung auf das Erlernen von kaskadisch organisierten input-output Relationen verteilt (vgl. auch Powers, 1973 für ähnliche Überlegungen).

Fazit

Die Annahme, es werden bidirektionale Beziehungen zwischen Aktionen und Effekten so gelernt, dass es nur der Vorstellung des herzustellenden Effektes bedarf, um den Körper so in Bewegung zu setzen, dass das Vorgestellte auch eintritt, oder wie es Franz Mechsner (2004, S. 355 f.) ausgedrückt hat, dass „[motor commands] are automatically and implicitly tuned in direct correspondence to perceptual-cognitive activity“, ist vermutlich nicht falsch, aber sie lässt noch völlig offen, wie sich denn diese Umsetzung lernabhängig strukturiert. Dabei sind u.E. die unterschiedlichen Funktionen von propriozeptiv und exterozeptiv vermittelten Effekten ebenso zu bedenken, wie die situationsabhängige Differenzierung von Aktions-Effekt-Beziehungen. Ebenso gilt es, die Existenz effektorunabhängiger Aktionsrepräsentationen und die rückmeldungsabhängige Kontrolle der Aktionsausführung in die Überlegungen einzubeziehen.

Die Abbildung 2 illustriert eine Spekulation, in der Aktions-Effekt-Beziehungen in kaskadisch organisierten Regelungsprozessen aufgehoben sind: Von den antizipierten (intendierten) Umwelt-Effekten ausgehend werden erst effektorunspezifische und schließlich effektorspezifische Aktionsparameter jeweils situationsspezifisch abgeleitet. Inwieweit diese Spekulationen Bestand haben, müssen weitere Modellüberlegungen, Experimente und Simulationen erweisen. In jedem Fall aber lohnt es sich, die Lernmechanismen und die entstehenden Strukturen zu erforschen, mit denen sensorische Antizipationen in Körperbewegungen umgesetzt werden. Es geht schließlich um nichts Geringeres als die Aufklärung des Mysteriums wie der „Wille“ den Körper dazu bringt, sich so zu bewegen, dass das, was wir wollen, auch geschieht.

Literatur

Ach, N. (1932). *Finale Qualität (Gefügigkeitsqualität) und Objektion*. *Archiv für die Gesamte Psychologie* (Zweiter Ergänzungsband, S. 267–366). Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.

Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111–149.

Ansorge, U. (2002). Spatial intention – response compatibility. *Acta Psychologica*, 109, 285–299.

Ansorge, U. (2006). Die Rolle von Absichten bei der automatischen Verarbeitung visuell-räumlicher Informationen. *Psychologische Rundschau*, 57, 2–12.

Beckers, T., De Houwer, J. & Eelen, P. (2002). Automatic integration of non-perceptual action effect features: The case of the associative affective Simon effect. *Psychological Research*, 66, 166–173.

Berner, M. & Hoffmann, J. (in press). Effector-related sequence learning in a bimannual-bisequential serial reaction time task. *Psychological Research*.

Butz, M. V., Herbort, O. & Hoffmann, J. (2007). *Exploiting redundancy for flexible behavior: Unsupervised learning of a modular sensorimotor control architecture*. Manuscript submitted for publication.

Cole, J. (1995). *Pride and a daily marathon*. Cambridge, MA: MIT Press.

Colwill, R. M. & Rescorla, R. A. (1990). Effect of reinforcer devaluation on discriminative control of instrumental behavior. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 16, 40–47.

Crisicimagna-Hemminger, S. E., Donchin, O., Gazzaniga, M. S. & Shadmehr, R. (2003). Learned dynamics of reaching movements generalize from dominant to non-dominant arm. *Journal of Neurophysiology*, 89, 168–176.

Desmurget, M. & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Science*, 4, 423–431.

Dickinson, A. (1994). Instrumental conditioning. In N. J. Mackintosh (Ed.), *Animal learning and cognition* (pp. 45–79). San Diego, CA: Academic Press.

Elsner, B. & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 229–240.

Elsner, B. & Hommel, B. (2004). Contiguity and contingency in action-effect learning. *Psychological Research*, 68, 138–154.

Greenwald, A. G. (1970a). A choice reaction time test of ideomotor theory. *Journal of Experimental Psychology*, 86, 20–25.

Greenwald, A. G. (1970b). Sensory feedback mechanisms in performance control: with special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, 77, 73–99.

Harleß, E. (1861). Der Apparat des Willens. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*, 38, 50–73.

Hazeltine, E. (2002). The representational nature of sequence learning: Evidence for goal-based codes. In W. Prinz & B. Hommel (Eds.), *Common mechanisms in perception and action. Attention and Performance XIX* (pp. 673–689). Oxford: Oxford University Press.

Herbart, J. F. (1825). *Psychologie als Wissenschaft neu gegründet auf Erfahrung, Metaphysik und Mathematik. Zweiter, analytischer Teil*. Königsberg: August Wilhelm Unzer.

Herbort, O., Butz, M. V. & Hoffmann, J. (2005). Towards an adaptive hierarchical anticipatory behavioral control system. In C. Castelfranchi, C. Balkenius, M. V. Butz & A. Ortony (Eds.), *From reactive to anticipatory cognitive embodied systems: Papers from the AAAI Fall Symposium* (pp. 83–90). Menlo Park, CA: AAAI Press.

Heuer, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart: Kohlhammer.

Hinton, G. E. (1989). Connectionist learning procedures. *Artificial Intelligence*, 40, 185–234.

Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen: Hogrefe.

Hoffmann, J. (2001). Das ideomotorische Prinzip, ABC, Closed Loops und Schemata. In J. R. Nitsch & H. All-

- mer (Hrsg.), *Denken-Sprechen-Bewegen, Bericht über die 32. Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Sportpsychologie (asp) vom 1. bis 3. Juni 2000 in Köln* (S. 69–75). Köln: bps.
- Hoffmann, J. (2003). Anticipatory behavioral control. In M. Butz, O. Sigaud & P. Gerard (Eds.), *Anticipatory behavior in adaptive learning systems* (pp. 44–65). Heidelberg: Springer.
- Hoffmann, J. & Lenhard, A. (2004). Psychology has to deal with efferences too. *Journal of Motor Behavior*, *36*, 384–385.
- Hoffmann, J. & Sebold, A. (2000). Lernmechanismen zum Erwerb verhaltenssteuernden Wissens. *Psychologische Rundschau*, *51*, 1–9.
- Hommel, B. (1996). The cognitive representation of action: Automatic integration of perceived action effects. *Psychological Research*, *59*, 176–186.
- Hommel, B. (1998). Perceiving one's own action – and what it leads to. In J. S. Jordan (Eds.), *Systems theory and a priori aspects of perception* (pp. 143–179). Amsterdam: Elsevier.
- Hommel, B. (2003). Acquisition and control of voluntary action. In S. Maasen, W. Prinz & G. Roth (Eds.), *Voluntary action: Brain, Minds, and sociality* (pp. 34–48). Oxford: University Press.
- Hommel, B., Alonso, D. & Fuentes, L. J. (2003). Acquisition and generalization of action effects. *Visual Cognition*, *10*, 965–986.
- James, W. (1981). *The principles of psychology* (Vol. 2). Cambridge, MA: Harvard University Press (orig. 1890).
- Jordan, M. I. & Rumelhart, D. E. (1992). Forward models: Supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Science*, *16*, 307–354.
- Kalveram, K. T. (2004). The inverse problem in cognitive, perceptual and proprioceptive control of sensorimotor behaviour: Towards a biologically plausible model of the control of aiming movements. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, *2*, 255–273.
- Kunde, W. (2001). Response-effect compatibility in manual choice reaction tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *27*, 387–394.
- Kunde, W. (2003). Temporal response-effect compatibility. *Psychological Research*, *67*, 153–159.
- Kunde, W. (2006). Antezedente Effektrepräsentationen in der Verhaltenssteuerung. *Psychologische Rundschau*, *57*, 34–42.
- Kunde, W., Hoffmann, J. & Zellmann, P. (2002). The impact of anticipated action effects on action planning. *Acta Psychologica*, *109*, 137–155.
- Kunde, W., Koch, I. & Hoffmann, J. (2004). Anticipated action effects affect the selection, initiation and execution of actions. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. Section A: Human Experimental Psychology*, *57A*, 87–106.
- Laycock, T. (1845). *On the reflex functions of the brain* (pp. 1–16). Bartholomew Close, UK: Adlard.
- Lenhard, A. & Hoffmann, J. (2004). *Adaptation von Handbewegungen an targetspezifische virtuelle Zielverlagerungen*. Vortrag auf der 46. Tagung experimentell arbeitender Psychologen in Gießen.
- Mechsner, F. (2004). A psychological approach to bimanual coordination. *Journal of Motor Behavior*, *36*, 355–370.
- Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rinehart, and Winston.
- Münsterberg, H. (1889). *Beiträge zur Experimentalpsychologie. Heft 1*. Freiburg i.B.: Mohr.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Appleton.
- Paelecke, M. & Kunde, W. (2005). How the mind controls the body: Anticipatory effect codes in action planning. In D. T. Rosen (Ed.), *Trends in experimental psychology research* (pp. 187–202). New York: Nova Science.
- Powers, W. T. (1973). *Behavior: The control of perception*. Oxford: Aldine.
- Prinz, W. (1987). Ideomotor action. In H. Heuer & A. F. Sanders (Eds.), *Perspectives on perception and action* (pp. 47–76). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Prinz, W. (1992). Why don't we perceive our brain states? *European Journal of Cognitive Psychology*, *4*, 1–20.
- Prinz, W. (1998). Die Reaktion als Willenshandlung. *Psychologische Rundschau*, *49*, 10–20.
- Proteau, L., Marteniuk, R. G., Girouard, Y. & Dugas, C. (1987). On the type of information used to control and learn an aiming movement after moderate and extensive training. *Human Movement Science*, *6*, 181–199.
- Rieger, M. (2004). Automatic keypress activation in skilled typing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *30*, 555–565.
- Rosenbaum, D. A., Loukopoulus, L. D., Meulenbroek, R. G. J., Vaughan, J. & Engelbrecht, S. E. (1995). Planning reaches by evaluating stored postures. *Psychological Review*, *102*, 28–67.
- Rosenbaum, D. A., Meulenbroek, R. G. J., Vaughan, J. & Jansen, C. (2001). Posture-based motion planning: Applications to grasping. *Psychological Review*, *108*, 709–734.
- Sainburg, R. L. & Wang, J. (2002). Interlimb transfer of visuomotor rotations: Independence of direction and final position information. *Experimental Brain Research*, *145*, 437–447.
- Schicke, T. & Röder, B. (2006). Spatial remapping of touch: confusion of perceived stimulus order across hand and foot. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*, 11808–11813.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*, 225–260.
- Simon, J. R. & Rudel, A. P. (1967). Auditory S-R compatibility: The effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, *51*, 300–304.
- Spence, C. & Driver, J. (2004). *Crossmodal space and crossmodal attention*. Oxford: University Press.
- Stock, A. & Hoffmann, J. (2002). Intentional fixation of behavioural learning, or how R-O learning blocks S-R learning. *European Journal of Cognitive Psychology*, *14*, 127–153.
- Stock, A. & Stock, C. (2004). A short history of ideomotor action. *Psychological Research*, *68*, 176–188.
- Stöcker, C., Sebold, A. & Hoffmann, J. (2003). The influence of response-effect compatibility in a serial reaction time task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *56A*, 685–703.
- Thorndike, E. L. (1913). Ideomotor action. *Psychological Review*, *20*, 91–106.
- Verwey, W. B. & Clegg, B. A. (2005). Effector dependent sequence learning in the serial RT task. *Psychological Research*, *69*, 242–251.
- Verwey, W. B. & Wright, D. L. (2004). Effector-independent and effector-dependent learning in the discrete sequence production task. *Psychological Research*, *68*, 64–70.

- Wasserman, E. A., Elek, S. M., Chatlosh, D. L. & Baker, A. G. (1993). Rating causal relations: Role of probability in judgements of response-outcome contingency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19, 174–188.
- Ziessler, M. (1998). Response-effect learning as a major component of implicit serial learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, 962–978.
- Ziessler, M., Nattkemper, D. & Frensch, P. A. (2004). The role of anticipation and intention in the learning of ef-

fects of self-performed actions. *Psychological Research*, 68, 163–175.

Joachim Hoffmann

Universität Würzburg
Institut für Psychologie III
Röntgenring 11
97070 Würzburg