

Inverse Motorische Modelle bei Kindern und Erwachsenen:

Die Rolle des visuellen Feedbacks

Petra Jansen-Osmann¹, Steffen Beirle², Stefanie Richter¹, Jürgen Konczak³
und Karl-Theodor Kalveram¹

¹Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, ²IUP/Universität Heidelberg, ³University of Minnesota

Zusammenfassung. Neurobiologische Befunde zeigen, dass neuronal kodierte inverse Modelle der Biomechanik des Körpers die Basis menschlicher Bewegungssteuerung bilden. Diese Arbeit untersucht die Rolle visueller Information zur Präzisierung *inverser motorischer Modelle* bei Kindern und Erwachsenen. Je 8 neun- bzw. fünfjährige Kinder und 8 Erwachsene führten horizontale, zielgerichtete Unterarmbewegungen unter Variation visuellen Feedbacks durch (volles Feedback, partielles Feedback, kein Feedback). Die Bewegungen Erwachsener waren ungenauer, wenn das visuelle Feedback am Anfang und Ende der Bewegung fehlte (partielles Feedback). Das Fehlen visueller Information während der Bewegung führte bei ihnen zu keiner Vergrößerung der räumlichen Zielabweichung. Dagegen waren die Bewegungen beider Kindergruppen ungenauer, wenn visuelles Feedback während der Bewegung fehlte. Die Zielgenauigkeit verbesserte sich jedoch, wenn die Bewegungen zuvor unter visuellem Feedback gelernt wurden. Die Abhängigkeit der Kinder von visuellem Feedback bedeutet, dass sie stärker auf zentrale Regelungsprozesse angewiesen sind. Die mangelnde motorische Steuerung besonders der jüngeren Kinder hat wahrscheinlich zwei Ursachen: Erstens, eine fehlerhafte invers kinematische Transformation (von Zielkoordinaten zu Gelenkwinkeln) und zweitens, ein ungenau parametrisiertes inverses Modell.

Schlüsselwörter: Motorische Entwicklung, Motorische Kontrolle, Motorisches Lernen, Sensomotorik

Inverse Motor Models in children and adults: The role of visual feedback

Abstract. Neurobiological evidence reveals that neurally coded inverse models of limb dynamics form the basis for feed-forward motor control in humans. This study investigates the role of visual feedback for the acquisition of inverse motor models in children and adults. Eight 9-year-old and eight 5-year-old children and eight adults performed goal-directed horizontal forearm movements using a single-joint arm manipulandum. When visual feedback was not available before and after movement execution (partial feedback), spatial error increased in adults and children. However, the lack of visual information during movement execution did not affect adult motor performance. In contrast, spatial error increased in both children groups when visual feedback was removed. Spatial accuracy was improved during the partial feedback condition, if children had prior practice under full visual feedback. The increased dependence on visual feedback, especially in the younger children, is a sign that children relied predominantly on central feedback mechanisms for motor control, because their feed-forward control was not yet functional. The reasons for the lack of feed-forward control are twofold: First, there are problems in motor planning, specifically with the inverse kinematic transformation (from hand position to joint angles). Second, there are deficits in the neural controller, specifically due to imprecise neural estimations of the true limb dynamics.

Key words: childhood, humans, motor control, motor learning, visuomotor

Schnelle Zeigebewegungen werden durch neuronale Steuerungsprozesse realisiert, bei denen ein Bewegungsziel ohne Rückgriff auf sensorische Erfolgsrückmeldungen erreicht wird (Feldman, 1966; Schmidt, 1988). Es gibt verschiedene Ansichten darüber, wie Bewegungssteuerung realisiert werden kann. Äquilibrium-Punkt-Modelle (z. B. Feldman, 1966; Feldman, Adamovich & Levin, 1995; Latash, 1993) gehen davon aus, dass die Federeigenschaften des Arms zur Bewegungskontrolle genutzt werden. Bewegungen resultieren dabei aus zentralen Veränderungen der Ruhelage und Steifigkeit anta-

gonistischer Muskeln eines Gelenks und beinhalten nur die Planung des Bewegungsendpunktes. Bei Eingelenksbewegungen wird das Äquilibrium-Punkt-Modell durch einige Befunde gestützt (Latash, 1992; Polit & Bizzi, 1978). Äquilibrium-Punkt-Kontrolle ist per definitionem nicht auf Information über die Ausgangsposition der Bewegung angewiesen (Feldman et. al., 1995; Schmidt, 1988); es gibt sowohl tier- und humanexperimentelle Untersuchungen, die diese Annahme stützen (Polit & Bizzi, 1978; Soechting & Flanders, 1989), als auch Studien, die dagegen sprechen (Vindras, Desmurget, Prablanc &

Viviani, 1998). Eine Untersuchung zur Verteilung von Handlungsfehlern bei Zeigebewegungen von McIntyre, Stratta und Lacquaniti (1998) spricht für die Planung der Distanz und Richtung einer Bewegung ausgehend von einem bestimmten Ausgangspunkt. Dabei müssen Transformationen zwischen verschiedenen Bezugssystemen mit kartesischen und Gelenk-Koordinaten vorgenommen werden. Zunächst wird die Zieldiskrepanz als Differenz zwischen Bewegungsziel und Startposition des Arms bestimmt (kartesische Koordinaten, bezogen auf die Augen oder den Kopf). Diese Diskrepanz dient im Fall eingelenkiger Bewegungen zur Festlegung eines Bewegungsplans (Gelenk-Koordinaten bezogen auf die Schulter). Die Umsetzung des Bewegungsplans kann über ein inverses Modell realisiert werden, welches unter Berücksichtigung der am Arm wirkenden nicht-muskulären Kräfte aus den Winkelvorgaben die notwendigen Muskelkräfte (Kalveram, 1998) oder motorischen Kommandos (Wolpert & Kawato, 1998) erzeugt. Inverse Modelle bilden eine neuronale Repräsentation der physikalischen Eigenschaften des Arms (Kalveram, 1998; Kawato, 1999) und müssen über relativ genaue Schätzungen der tatsächlichen Dynamik des Arms verfügen, da sonst Efferezenzen spezifiziert werden, die zu dysmetrischen Bewegungen führen.

Evidenz für die Existenz inverser Modelle liefern Studien zur Adaptationsleistung an *externe Kräfte* bei zielgerichteten Armbewegungen (zur Übersicht s. Kawato, 1999). Das Aufschalten externer Kräfte führt zunächst zu einer Abweichung vom Ziel, die jedoch nach einigen Wiederholungen verschwindet. Nach Wegnahme des externen Kraftfelds zeigen sich Fehler in Gegenrichtung der ehemals wirkenden Kraft (Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994). Diese Art der motorischen Nacheffekte und die Generalisierung auf vorher nicht dargebotene Ziele sind gerade typisch für die Bewegungssteuerung durch ein inverses Modell, das die nicht mehr existierende Kraft zu kompensieren sucht. Nacheffekte bei der motorischen Handlung an eine *veränderte visuelle Information* können eher im Rahmen multipler, anfänglich interferierender visuell-motorischer Karten interpretiert werden (Cunningham & Welch, 1994).

Die Frage, ob und wie inverse motorische Modelle in der Ontogenese erworben werden, untersuchten wir in einer Studie zur Adaptation an externe Kräfte (Konczak, Jansen-Osmann & Kalveram, eingereicht): 4-11jährige Kinder führten zielgerichtete Unterarmbewegungen in einem viskosen Kraftfeld aus. Bereits vierjährige Kinder adaptierten in der oben beschriebenen Weise an externe Kräfte, jedoch langsamer als ältere Kinder. Der Erwerb und die Präzisierung inverser Modelle ist somit eine von der Entwicklung abhängige Leistung.

Motorische Planung und Bewegungssteuerung ist ohne Bereitstellung visueller und propriozeptiver Rückmeldung (Feedback) nicht denkbar. Kontinuierliche *visuelle Information* gibt Aufschluss a) über die Lokalisation des Ziels, b) die vor Bewegungsbeginn vorliegende Position des Arms mit Bezug auf das Ziel, c) den Bewegungsverlauf und d) die Lokalisation des Arms nach Ende der Bewegung bezogen auf das Ziel. Damit ist visuelle Infor-

mation über die Zieldiskrepanz, den Bewegungsverlauf und den Handlungsfehler gegeben. *Propriozeptive Information* steht kontinuierlich vor, während und nach der Bewegung zur Verfügung und liefert Information über den jeweiligen Gelenkwinkel, die Gelenkgeschwindigkeit (Muskelspindeln) und die Muskelspannung (Golgi-Sehnen-Organ). Propriozeptive Information dient der quantitativen Ermittlung der Abweichungen des Plans von der aktuellen Bewegungstrajektorie, welche einerseits zur Adjustierung des inversen Modells (gestrichelter Pfeil in Abb. 1c), andererseits aber auch zur unmittelbaren Korrektur der laufenden Bewegung herangezogen werden können (Funktionseinheit „Regler“ in Abb. 1c). Die Annahme, dass die Bewegungen über ein inverses Modell gesteuert werden, legt die Vermutung nahe, dass die visuelle Information während der Bewegung keine Rolle spielt. Spijkers und Spellerberg (1995) fanden im Gegensatz zu dieser theoretischen Annahme jedoch heraus, dass bei Zielbewegungen die Genauigkeit mit der Verfügbarkeit visueller Information über die Bewegungstrajektorie zunahm. Dies war unabhängig von der Wahrscheinlichkeit, mit der eine bestimmte Feedbackbedingung auftrat (kurzes, mittleres, langes Feedback), und ob die visuelle Information auf den Bewegungsanfang oder das Ende begrenzt war. Die vorhandene visuelle Rückmeldung wird nach Ansicht der Autoren zur online-Kontrolle der Bewegung genutzt.

Untersuchungen zur Rolle visuellen Feedbacks bei Kindern im Vorschul- und Grundschulalter sind eindeutiger: Der Einfluss visueller Information auf die Präzision von Zielbewegungen ist vom Alter abhängig. Bei Armbewegungen führte die Sichtbarkeit der Hand und des Arms besonders bei jüngeren Kindern zur Verbesserung der Zielgenauigkeit (Bard, Hay & Fleury, 1990; Brown, Sepehr, Ettliger & Skreczek, 1986; Hay, 1981). Fehlt das visuelle Feedback bei Zeigebewegungen, wird von U-förmigen Entwicklungsverläufen berichtet: Der Fehler in der Zielgenauigkeit ist bei 5- und 11jährigen Kindern geringer als bei 7- und 9jährigen (Hay, 1984). Bezogen auf inverse motorische Modelle bedeutet dies, dass die Steuerkomponente der Bewegung, d. h. die Durchführung der aus der Zieldiskrepanz geplanten Bewegung nicht präzise funktioniert. Die Kinder können allein anhand der Propriozeption scheinbar nicht ermitteln, wie sich der Verlauf der Bewegung gestaltet. Im Gegensatz zu den bereits genannten Studien ist die zentrale Frage der vorliegenden Studie, ob Kinder lernen können, sich auch ohne visuelle Rückmeldung zielgenau zu bewegen. In einer Untersuchung von Hay und Bard (1984) wurde nach einer Übungsphase mit kontinuierlichem visuellem Feedback die Durchführung von Bewegungen *ohne Feedback* untersucht. Hier sollte demgegenüber Information darüber gewonnen werden, wie kontinuierliches visuelles Feedback die Leistung der Kinder unter *partiell*em visuellem Feedback beeinflusst.

Folgende Hypothesen werden überprüft: Erstens, verbessern Kinder ihre motorische Steuerung mit Hilfe einer Übungsphase mit kontinuierlicher visueller Information? Das heißt, wird visuelle Information benutzt, um ein inverses motorisches Modell der Armdynamik zu präzisieren?

ren? Im Sinne einer Replikation der früheren Untersuchungen zum Einfluss visueller Rückmeldung ist des Weiteren zu erwarten, dass das Fehlen kontinuierlicher visueller Information bei Kindern *ohne Übung* zu einem erhöhten Handlungsfehler führt. Schließlich wird davon ausgegangen, dass Erwachsene visuelle Information nur zur Bestimmung der Zieldiskrepanz und des Handlungsfehlers benötigen. Visuelle Information während der Bewegung hat keinen Einfluss auf die aktuelle Bewegungstrajektorie.

Methode

Versuchsteilnehmer. Es nahmen 8 Erwachsene (Durchschnittsalter: 25,8 Jahre), 8 neunjährige und 8 fünfjährige Kinder, also insgesamt 24 Versuchsteilnehmer (davon 13 weibliche und 11 männliche) an der Untersuchung teil. Eine erwachsene Person wurde aufgrund zu langsamer Bewegungen aus der Auswertung herausgenommen: Der Mittelwert der maximalen Geschwindigkeit der sieben verbleibenden Erwachsenen lag bei Bewegungen mit vollem bzw. partiellem visuellem Feedback bei 121,25°/sec (Minimum 87,73°/sec, Maximum 147,36°/sec). Der Mittelwert der ausgeschlossenen Versuchsperson betrug dagegen 63,73°/sec. Vor Beginn des Experiments gaben die Eltern schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme ihres Kindes am Versuch. Keines der Kinder hatte eine dokumentierte abnorme oder verzögerte motorische Entwicklung. Mittels einer Befragung der Eltern der teilnehmenden Kinder bzw. der teilnehmenden Erwachsenen wurde eruiert, dass alle Versuchsteilnehmer rechtshändig waren.

Versuchsaufbau. Die Teilnehmer saßen auf einem Stuhl. Ihr rechter Unterarm lag auf einer Armschiene, die Teil eines Manipulandums war, das nur horizontale Drehbewegungen zuließ (siehe Abb. 1 a/b).

Die Teilnehmer führten zielgerichtete Unterarmflexionen oder -extensionen mit einer Amplitude von 30° zu zwei visuell spezifizierten Zielen durch. Auf einem halbmondförmigen Schirm, 1,5 m vor ihnen, sahen sie zwei Pfeile. Ein Pfeil repräsentierte das Ziel, der andere entsprach der aktuellen Winkelposition des Unterarms.

Versuchsdurchführung. Zu Beginn eines jeden Durchgangs standen Zielpfeil und Armpositions-pfeil bei -10°, d.h. 10° rechts von der Mitt-Sagittalen. Wenn der Zielpfeil um 30° nach links sprang, sollten die Versuchsteilnehmer dem Pfeil so schnell und genau wie möglich folgen (Flexionsbewegung). Nach Bewegungsende sprang der Zielpfeil auf seine ursprüngliche Position zurück und die Versuchsteilnehmer führten nun eine 30° Extension aus. In-

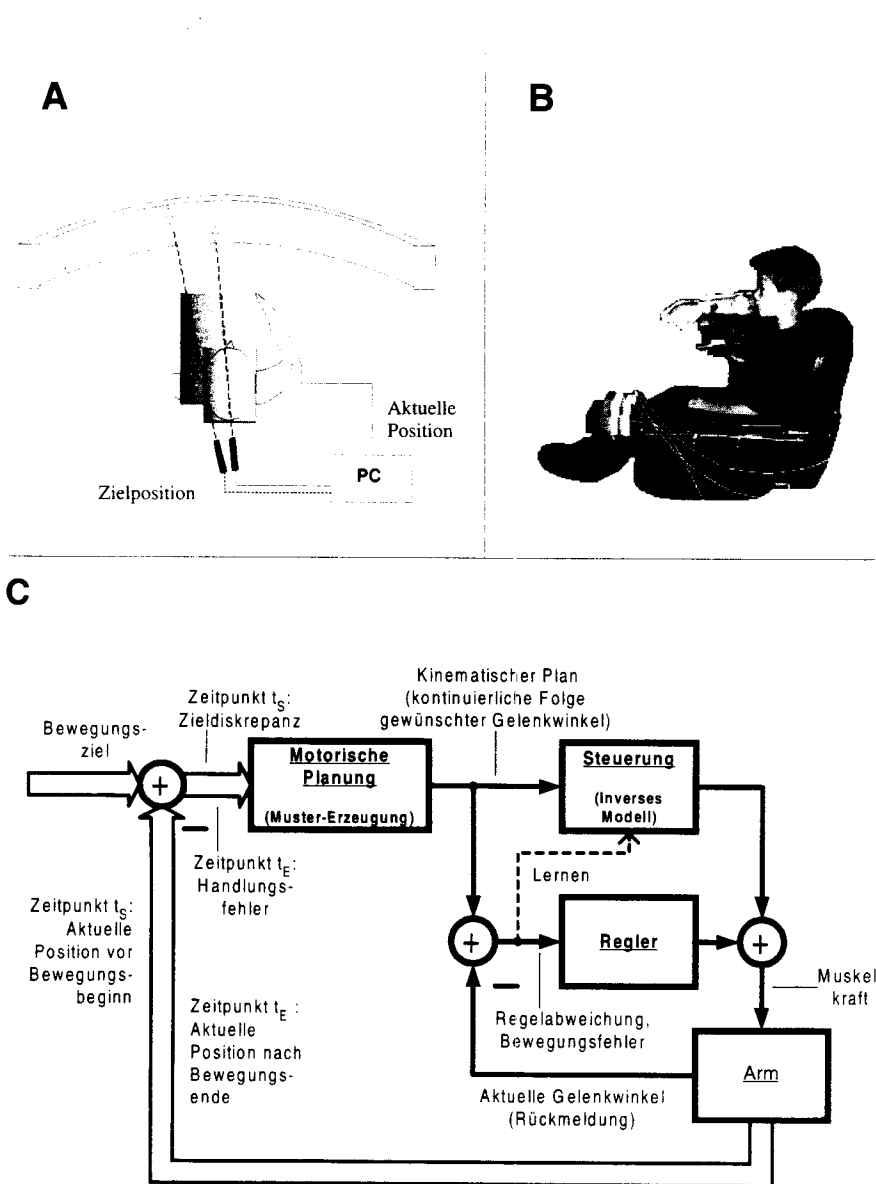


Abbildung 1. a) Versuchsaufbau, b) 5-jähriger Junge bei der Ausführung der Bewegung. c) Kontroll-Modell für Zielbewegungen des Unterarms. Die motorische Planung erhält Informationen nur zu den diskreten Zeitpunkten t_S und t_E . Der kinematische Plan ist hingegen kontinuierlich in der Zeit. Die Bewegung erstreckt sich zwischen den Zeitpunkten T_S und T_E .

samt wurden 80 Unterarmbewegungen (40 Flexionen, 40 Extensionen) durchgeführt. Vor Beginn des Experiments wurden die Bewegungen einige Male geübt, bis sich die Versuchsteilnehmer mit dem Manipulandum vertraut gemacht hatten.

Innerhalb der 80 Versuchsdurchgänge wurde das visuelle Feedback blockweise in drei Stufen variiert: mit vollem visuellem Feedback (VF), mit partiellem visuellem Feedback (PF) und ohne visuelles Feedback (OF). In der Bedingung VF waren sowohl der Arm als auch der Armpositionspfeil ständig sichtbar. In der Bedingung PF war der Arm nie sichtbar, der Armpositionspfeil war immer dann sichtbar, wenn die Winkelgeschwindigkeit des Arms kleiner oder gleich $2^\circ/\text{sec}$, der Arm also praktisch in Ruhe war (vor Bewegungsanfang und nach Bewegungsende). In der Bedingung OF waren sowohl Arm als auch der Armpositionspfeil nie sichtbar. In den Bedingungen PF und OF wurde der Arm mit einer Styroporplatte abgedeckt. Die Blöcke für VF und PF umfassten jeweils 30 Durchgänge, wobei die eine Hälfte der Teilnehmer zuerst VF, dann PF erhielt, die andere Hälfte zuerst PF, dann VF. Alle Teilnehmer hatten in den letzten 20 Durchgängen die Bedingung OF. Mit Hilfe eines Potentiometers und eines Tachometers an der Hebelachse wurde die Winkelposition und -geschwindigkeit der Bewegung für jeden Versuchsdurchgang gemessen. Die Daten wurden mit einer Rate von 520 Hz abgetastet und mit einem 12 bit Analog-Digital Wandler (ME-300-Interface, Meilhaus) digitalisiert. Anschließend wurden sie mit einem Butterworth Filter 2. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 10 Hz gefiltert. Als Bewegungsbeginn wurde der Zeitpunkt definiert, an dem die Position erstmals um mehr als 2° vom Startpunkt abwich. Auf diesen Zeitpunkt wurden die nachfolgenden Kurvenauswertungen bezogen. Die Trajektorien wurden auf ein Zeitfenster standardisiert, das sich von 100 Messpunkten vor bis 800 Messpunkten nach Bewegungsbeginn erstreckte (ca. 1,7 sec).

Versuchsplan. Es handelte sich um einen drei-faktoriellen Versuchsplan (Alter * Art des Feedbacks * Reihenfolge des Feedbacks). Der Faktor *Alter* hatte drei Stufen: 5 Jahre, 9 Jahre und Erwachsene. Auf dem Faktor *Art des Feedbacks* mit den drei Stufen VF, PF und OF lagen Messwiederholungen vor. Dem zweistufigen Faktor *Reihenfolge des Feedbacks* (VF - PF - OF oder PF - VF - OF) wurden die Versuchsteilnehmer innerhalb ihrer Altersgruppen dem Zufall nach zugeordnet. Als abhängige Variable wurde zunächst die *Zielgenauigkeit* bestimmt: Die Position wurde am Ende der ersten Bewegungsphase (bestehend aus Beschleunigungs- und Bremsphase) bestimmt, d. h. zu einem Zeitpunkt, an dem noch keine Korrekturbewegungen eingesetzt haben konnten. In der Regel, d. h. in ca. 80 % der Fälle, wurde das 1. Maximum in der Positionskurve (= Nulldurchgang der Geschwindigkeit) gewählt. In den Fällen, in welchen die Probanden zum Ziel hin abbremsen, aber noch vor Erreichen eines Maximums erneut beschleunigten, wurde der Wendepunkt der Positionskurve (= Nulldurchgang der Beschleunigung) gewählt. Danach wurde der *absolute Fehler* in der Zielgenauigkeit berechnet, indem die erreichte Zielposition von der tatsächlichen Zielposition (20° bzw. -10°)

abgezogen und der Betrag gebildet wurde. Darüber hinaus wurde die maximale Geschwindigkeit jeder Bewegung berechnet. Zur Auswahl der exemplarischen Daten wurde die mittlere absolute kumulierte Differenz zwischen den einzelnen Bewegungsverläufen und der gemittelten Baselinebewegung (*Trajektorien-Differenz = TD-Wert*) bestimmt (vgl. Konczak, Jansen-Osmann & Kalveram, eingereicht). Es handelt sich hier um ein Maß für die Variabilität der Bewegungsverläufe in dem 1. Block ohne Reibung (Baselinebedingung).

Ergebnisse

Abbildung 2 veranschaulicht anhand exemplarischer Daten, wie sich die räumlichen Trajektorien (Zeit-Positionskurven) als Funktion des visuellen Feedbacks in den Altersgruppen unterscheiden.

Die kinematische Variabilität nahm einerseits mit zunehmendem Alter ab. Andererseits erhöhte sich die Variabilität in jeder Gruppe, je unvollständiger das visuelle Feedback war.

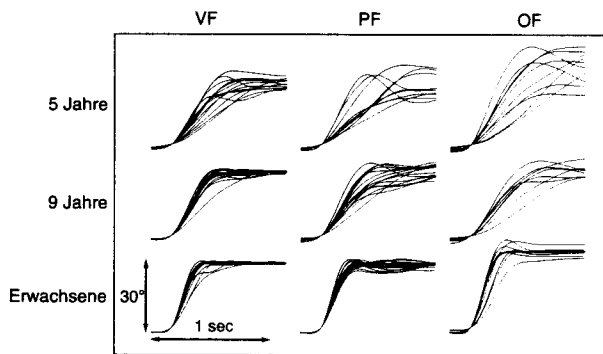


Abbildung 2. Exemplarische Zeit-Positionskurven während Flexionsbewegungen des Unterarms. Dargestellt sind für jede Altersgruppe die Trajektorien jeweils eines Versuchsteilnehmers unter den drei verschiedenen Formen visuellen Feedbacks. Als „exemplarische“ Vertreter jeder Altersgruppe wurden die Bewegungskurven der Probanden gewählt, deren TD-Wert des jeweiligen Versuchsblocks dem gemittelten TD-Wert der Altersgruppe in etwa entsprach (Erwachsene: 681.73, exemplarischer Vertreter: 549.05; 9jährige: 1619.9, exemplarischer Vertreter: 1450.74; 5jährige: 2695.08, exemplarischer Vertreter: 2403.56).

Bedeutung visuellen Feedbacks bei Erwachsenen. Der absolute Fehler der Erwachsenen war größer, wenn sie Bewegungen ohne visuelles Feedback ausführten, $F(2, 12) = 15.91, p < .001$. Dieser Fehler unterschied sich signifikant sowohl vom ersten Versuchsblock, $F(1, 6) = 16.99, p < .01$, als auch vom zweiten Versuchsblock, $F(1, 6) = 1.38, p < .01$ (siehe Abb. 3). Die Variation des visuellen Feedbacks in den ersten beiden Versuchsblöcken hatte keinen Einfluss auf die adulte Fehlerleistung (siehe Abb. 3 - Erwachsene).

Bedeutung visuellen Feedbacks bei Kindern und Erwachsenen. Zunächst wurde untersucht, ob volles oder

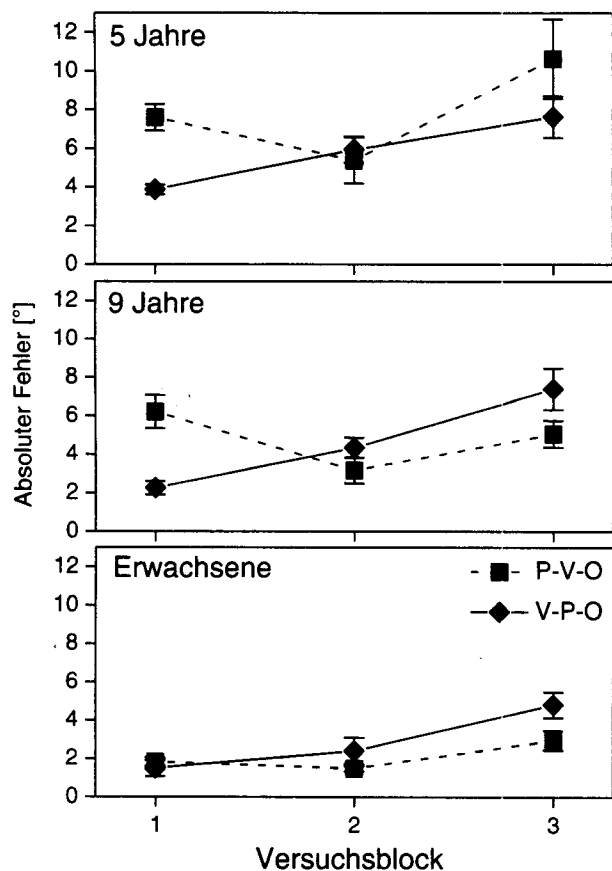


Abbildung 3. Mittlerer absoluter Fehler der Erwachsenen, neunjährigen Kinder und fünfjährigen Kinder in Abhängigkeit von der Art des visuellen Feedbacks.

partielles Feedback sich auf den absoluten Fehler unterschiedlich auswirkten, wenn Bewegungen zum ersten Mal ausgeführt wurden. Statistisch ergaben sich signifikante Haupteffekte für Altersgruppe, $F(2, 17) = 27.63$, $p < .001$ und Feedbackbedingung, $F(1, 17) = 35.97$, $p < .001$. Auch die Interaktion zwischen beiden Faktoren war signifikant, $F(2, 17) = 6.53$, $p < .01$. Die Fehlergröße im ersten Block nahm mit steigendem Alter ab. In der Bedingung mit partiellem Feedback war die Fehlergröße nur für die beiden Kindergruppen höher als unter vollem visuellen Feedback (siehe Abb. 3 – 1. Versuchsblock).

Lernen präziser inverser Modelle bei Kindern. In einer zweiten Analyse wurde untersucht, ob das Vorhandensein vollen Feedbacks im ersten Versuchsblock den Kindern half, die Zielgenauigkeit bei Bewegungen unter partiellem Feedback im zweiten Versuchsblock zu verbessern. Die Haupteffekte für Altersgruppe ($F(1, 12) = 18.72$, $p = .001$) und Feedbackbedingung ($F(1, 12) = 14.17$, $p < .01$) waren signifikant: Jüngere Kinder hatten einen größeren absoluten Fehler als ältere; partielles Feedback verursachte einen größeren absoluten Fehler als volles Feedback. Auch die Interaktion zwischen den Faktoren Feedbackbedingung und Versuchsblock war signifikant, $F(1, 12) = 16.17$, $p < .01$. Partielles Feedback ver-

ursachte nur dann einen größeren absoluten Fehler als volles Feedback, wenn es im ersten Block präsentiert wurde. Im zweiten Block unterschied sich die Fehlergröße aufgrund der Feedbackbedingung nicht (siehe Abb. 3). Hatten die Kinder die Bewegung im ersten Block mit vollem visuellem Feedback gelernt, schnitten sie im zweiten Block bei partiellem Feedback genauso gut ab wie Kinder, die hier volles Feedback erhielten. In der Tendenz zeigte sich zudem ein „negativer Transfer“: Unter der Voll-Feedbackbedingung war der absolute Fehler im zweiten Versuchsblock größer als im ersten Block, $t(7) = -2.22$, $p = .062$.

Maximale Geschwindigkeit. Ein Einfluss des Alters auf die maximale Geschwindigkeit wurde deutlich, $F(2, 22) = 7.40$, $p < .01$. Post-hoc Vergleiche zeigten, dass 5jährige Kinder ($\bar{x} = 71,42^\circ/\text{sec}$, $s = 31.57$) signifikant langsamere Bewegungen als Erwachsene ($\bar{x} = 121,44^\circ/\text{sec}$, $s = 23.24$) ausführten. Der Unterschied in der maximalen Geschwindigkeit der 9jährigen ($\bar{x} = 92,14^\circ/\text{sec}$, $s = 18.79$) zu der der Erwachsenen und 5jährigen erwies sich als nicht signifikant. Darüber hinaus zeigte sich kein Einfluss der Feedbackbedingung.

Diskussion

Bewegungsrelevantes visuelles Feedback hatte in der vorliegenden Untersuchung für Erwachsene und Kinder eine unterschiedliche Bedeutung. Erwachsene benötigten visuelles Feedback lediglich zu Beginn und am Ende der Bewegung, um die Zieldiskrepanz und den Handlungsfehler zu bestimmen. Dies steht im Gegensatz zu einer Untersuchung von Spijkers und Spellerberg (1995), die zeigten, dass die Zielgenauigkeit mit der Verfügbarkeit visueller Information zunahm. Unklar bleibt jedoch, ob die in der vorliegenden Untersuchung gefundene Verbesserung der Zielgenauigkeit unter Teil-Feedback auf der visuellen Anfangsinformation und/oder Endinformation beruht.

Im Gegensatz zu Erwachsenen sind Kinder auch während der Bewegungsausführung auf visuelle Information angewiesen. Obwohl die 5jährigen ihre Bewegungen signifikant langsamer ausführten, machten sie auch unabhängig von der Art des Feedbacks größere Fehler als die Erwachsenen. Kinder in beiden Altersgruppen machten größere Fehler, wenn sie nur partielles statt volles Feedback in dem ersten Versuchsblock erhielten. Diese Abhängigkeit von visuellem Feedback sowie die langsame Ausführung der Bewegung bedeutet, dass Kinder zur Kontrolle ihrer Extremitätenmotorik vornehmlich auf zentrale Regelungsprozesse angewiesen sind. Dies ist ein indirekter Beleg dafür, dass die neuronalen Steuerungsprozesse im frühen und mittleren Kindesalter noch nicht vollständig funktional sind. Aus systemtheoretischer Sicht gibt es zwei Möglichkeiten, die dieses Verhalten erklären. Erstens, die motorischen Planungsprozesse liefern ungenaue kinematische Daten aufgrund einer fehlerhaften invers kinematischen Transformation. Diese Transformation ist essentiell für die Planung, da sie die Umrechnung von

Endpunktpositionen (hier der Hand) in Winkelkoordinaten vornimmt (hier Ellbogenwinkel). Zweitens, dysmetrische Armbewegungen können auch entstehen, wenn der neuronale Kontroller selber ungenau parametrisiert ist. In diesem Fall würde das inverse motorische Modell nur ungefähre neuronale Schätzungen der tatsächlichen Armdynamik enthalten. Im Prinzip können auch Fehler in Planungs- und/oder Kontrollsystemen zu einem erhöhten Bewegungsfehler führen. Da die Bewegungsaufgabe in dieser Studie sehr einfach und die räumliche Trajektorie voll determiniert war (nur ein mechanischer Freiheitsgrad), kann man davon ausgehen, dass die Anforderungen an motorische Planungsareale relativ gering waren. Das wiederum bedeutet, dass die beobachteten kinematischen Fehler wahrscheinlich zu einem größeren Anteil durch ein ungenaues inverses Modell verursacht worden sind. Für diese Interpretation spricht auch, dass die Kinder in der Lage waren, den Handlungsfehler zu bestimmen. Sie profitierten eindeutig von vollem Feedback in der ersten Phase und benutzten den Handlungsfehler, um ihr inverses Modell des Arms zu aktualisieren. Ansonsten hätten die Kinder keine Verbesserung im zweiten Versuchsblock gezeigt, in dem nur partielles Feedback zur Verfügung stand. Unsere Ergebnisse legen die Vermutung nahe, dass visuelle Information zu Beginn und am Ende der Bewegung auch für Erwachsene unabdingbar ist. Wenn man die Bedeutung visueller Rückmeldung in der Ontogenese motorischer Kontrolle untersuchen will, ist es daher wichtig, zwischen visueller Rückmeldung während und zu Beginn bzw. am Ende der Bewegung zu unterscheiden. Unsere Ergebnisse ergänzen die von Hay und Bard (1984): Eine Übungsphase mit vollem Feedback führte zwar nicht zur Verbesserung der Zielgenauigkeit unter der Bedingung ohne Feedback, verbesserte aber die Zielgenauigkeit unter partiellem Feedback.

Der in der Tendenz gefundene „negative Transfer“ deutet darauf hin, dass es den Kindern schwer fiel, nach einer Phase mit partiellem Feedback – die eine Steuerungs-Strategie erforderte – auf die durch die visuelle Rückmeldung nahegelegte Regelungsstrategie zurückzugreifen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Entwicklung der Zielmotorik auch im Alter von neun Jahren noch nicht abgeschlossen ist. Unser Experiment zeigt, dass selbst Neunjährige beim kurzfristigen Erwerb einer neuen zielgerichteten Armbewegung eher Regel- als Steuerungsmechanismen anwenden. Erwachsene hingegen bevorzugen eindeutig neuronale Steuerungsmechanismen. In der Phase zwischen dem fünften und neunten Lebensjahr sehen wir allerdings eine kontinuierliche Entwicklung zum vermehrten Gebrauch neuronaler Steuerung. Dieser Befund wird auch durch die Ergebnisse anderer Studien unterstützt (z. B. Kuhtz-Buschbeck, Stolze, Jöhnk, Boczek-Funcke & Illert, 1998; Rösblad, 1996), die zeigen, dass Kinder bei Greifbewegungen weniger flexibel und mehr von der visuellen Information abhängig sind als Erwachsene.

Literatur

- Bard, C., Hay, L. & Fleury, M. (1990). Timing and accuracy of visually directed movements in children: Control of direction and amplitude components. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 102–118.
- Brown, J. V., Sepehr M. M., Ettliger, G. & Skreczek, W. (1986). The accuracy of aimed movements to visual targets during development: role of visual information. *Journal of Experimental Child Psychology*, 41, 443–460.
- Cunningham, H. A. & Welch, R. B. (1994). Multiple concurrent visual-motor mappings: Implications for models of adaptation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 987–999.
- Feldman, A. G. (1966). Functional tuning of the nervous system during control of movement or maintenance of a steady posture II – Controllable parameters of the muscles. *Biofizika*, 11, 498–508.
- Feldman, A. G., Adamovich, S. V. & Levin, M. F. (1995). The relationship between control, kinematic and electromyographic variables in fast single-joint movements in humans. *Experimental Brain Research*, 103, 440–450.
- Hay, L. (1981). The effect of amplitude and accuracy requirements on movement time in children. *Journal of Motor Behavior*, 13, 177–186.
- Hay, L. (1984). Discontinuity in the development of motor control in children. In W. Prinz & A. F. Sanders (Eds.), *Cognition and Motor Processes* (pp. 351–360). Berlin: Springer.
- Hay, L. & Bard, C. (1984). The role of movement speed in learning a visuo-manual coordination in children. *Psychological Research*, 46, 177–186.
- Kalveram, K.-T. (1998). *Wie das Individuum mit der Umwelt interagiert*. Lengerich: Pabst.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718–727.
- Konczak, J., Jansen-Osmann, P. & Kalveram, K.-T. (eingereicht). How children learn internal motor models of their arms. *Journal of Motor Behavior*.
- Kuhtz-Buschbeck, J. P., Stolze, H., Jöhnk, K., Boczek-Funcke, A. & Illert, M. (1998). Development of prehension movements in children: a kinematic study. *Experimental Brain Research*, 122, 424–432.
- Latash, M. L. (1992). Virtual trajectories, joint stiffness, and changes in the limb natural frequency during single-joint oscillatory movements. *Neuroscience*, 49, 209–220.
- Latash, M. L. (1993). *Control of human movements*. Illinois: Human Kinetics.
- McIntyre, J., Stratta, F. & Lacquaniti, F. (1998). Short-term memory for reaching to visual targets: Psychophysical evidence for body-centered reference frames. *Journal of Neuroscience*, 18, 8423–8435.
- Polit, A. & Bizzi, E. (1978). Processes controlling arm movements in monkeys. *Science*, 201, 1235–1237.
- Rösblad, B. (1996). Roles of visual information for control of reaching movements in children. *Journal of Motor Behavior*, 29, 174–182.
- Schmidt, R. A. (1988). *Motor control and learning – a behavioral emphasis* (2nd Ed.). Champaign, Illinois: Human Kinetics.

- Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *Journal of Neuroscience*, *14*, 3208–3224.
- Soechting, J. F. & Flanders, M. (1989). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, *62*, 582–894.
- Spijkers, W. & Spellerberg, S. (1995). On-line visual control of aiming movements? *Acta Psychologica*, *90*, 333–348.
- Vindras, P., Desmurget, M., Prablanc, C. & Viviani, P. (1998). Pointing errors reflect biases in the perception of the initial hand position. *Journal of Neurophysiology*, *79*, 3290–3294.
- Wolpert, D. M. & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, *11*, 1317–1329.

Petra Jansen-Osmann
Stefanie Richter
Karl-Theodor Kalveram

Institut für Experimentelle Psychologie
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Universitätsstraße 1
D-40225 Düsseldorf

Steffen Beirle

IUP/Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 229
D-69120 Heidelberg

Jürgen Konczak

Human Sensorimotor Control Laboratory
Division of Kinesiology
University of Minnesota
1900 University Ave. S.E.
USA – Minneapolis, MN 55455