

# **Der Zusammenhang von Vorstellung und Motorik in der Entwicklung**

Inauguraldissertation zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

vorgelegt von

Markus Krüger

geboren am 12.12.1977

in Hamburg

Greifswald, den 05.09.2011

Dekan: Prof. Dr. Klaus Fesser

1. Gutachter: Prof. Dr. Horst Krist

2. Gutachter: PD Dr. Moritz M. Daum

Tag der Promotion: 02.02.2012

Bestandteil dieser kumulativen Dissertation sind folgende vier Artikel:

1. Krüger, M. & Krist, H. (2009). **Imagery and motor processes - when are they connected? The mental transformation of body parts in development.** *Journal of Cognition and Development, 10*(4), 239-261.
2. Krüger, M. & Krist, H. (2009). **Verknüpfung von Vorstellung und Motorik in der Entwicklung: Die mentale Transformation bei Darstellungen von Händen.** *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie, 41*(4), 198-206.
3. Krüger, M. & Krist, H. (2011). **Does the Motor System Facilitate Spatial Cognition? Motor Effects on Spatial Imagery in Human Development.** Manuscript submitted for publication.
4. Krüger, M. (2011). **Analogue Mental Transformations in Three-year-olds: Introducing a New Mental Rotation Paradigm Suitable for Young Children.** Manuscript submitted for publication.

Bei den Artikeln 1. bis 3. war der Erstautor hauptverantwortlich für das Design, die Planung und die Durchführung der Experimente, die Auswertung und die Interpretation. Die erste und die abschließende Verschriftlichung wurden auch jeweils vom ersten Autor vorgenommen. Eine Ausnahme bildet nur Experiment 1 aus dem 3. Artikel: Hier verteilt sich der Anteil am Design zu gleichen Teilen auf beide Autoren.

**Inhaltsverzeichnis**

Zusammenfassung	5
Abstract	6
Einführung	7
Stand der Forschung	8
Mentale Rotation	8
Motorische Einflüsse auf die mentale Rotation	9
Motorische Entwicklung und mentale Rotation bei Säuglingen	12
Motorische Einflüsse auf die Vorstellung von dynamischen physikalischen Prozessen	13
Eigene Arbeiten zum Forschungsgegenstand	15
Projektion physiologischer Bewegungseinschränkungen auf die mentale Rotation	16
Formen externaler Unterstützung bei der räumlichen Vorstellung	19
Mentale Rotation bei drei Jahre alten Kindern	20
Schlussfolgerungen	22
Flexibilität	23
Frontalhirnreifung	23
Intuitive Physik	24
Timing-Responsive Representations	25
Fazit	26
Literaturverzeichnis	27

### **Zusammenfassung**

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen motorischen Prozessen und der Vorstellung aus entwicklungspsychologischer Perspektive wurden insgesamt sechs Experimente durchgeführt. Im Mittelpunkt stand dabei der Einfluss der Motorik auf Vorstellungsprozesse. Dies ist vor dem Hintergrund einer gegenwärtig unter dem Schlagwort „embodied cognition“ wieder auflebenden historischen Strömung zu sehen, die in der Tradition Piagets steht und deren Vertreter den ontogenetischen und phylogenetischen Ursprung des Denkens in der Motorik vermuten. Eine experimentelle Annäherung an die Thematik erfolgte zum einen über die Beobachtung von Auswirkungen physiologischer Bewegungseinschränkungen auf die mentale Transformation körperbezogener Reize und zum anderen über die Auswirkung motorischer Handlungen auf die Vorstellung. Während andere Autoren davon ausgehen, dass dieser Einfluss bei jüngeren Kindern besonders stark ausgeprägt ist, und daher auf eine sich langsam lösende Bindung zwischen Motorik und Kognition schließen, hat sich dieser Trend in unserer Forschung nicht bestätigt. Zwar deutete sich auch bei Kindern eine qualitativ andere Beziehung zwischen Vorstellung und Motorik an, aber insgesamt wurde bei Erwachsenen ein stabilerer Einfluss der Motorik auf die Vorstellung gefunden. Bei Kindern fiel dieser Effekt eher variabel aus.

**Abstract**

In six experiments the connection between imagery and the motor system in development was studied. This research was focused on the effect of body representations on imagery processes. Present research in this field - called “embodied cognition” - is dominated by Piaget’s view that cognition derives from motor processes ontogenetically and phylogenetically. Our experimental approach covers the impact of physiological (movement) constraints on mental transformations of pictures of hands and the impact of motor action on dynamic representations. Other authors claim that there is a stronger link between the motor system and imagery in younger children than in older children and adults. This is taken as evidence for a dissolving link between the motor system and imagery. The present research suggests a qualitatively different link between the motor system and imagery in younger children in comparison with older children and adults, but not a stronger link. In fact, this link seems rather variable in children and more stable in adults.

### **Einführung**

Betrachtungen über den Zusammenhang zwischen Vorstellung und Motorik in der Entwicklungspsychologie gehen schon auf Piaget zurück. Als anschauliches Beispiel mag ein weit bekannter Versuch Piagets mit seiner Tochter Lucienne dienen (Piaget, 1936/1952): Lucienne, damals 16 Monate alt, versuchte eine Uhrenkette aus einer Schachtel zu holen. Allerdings war die Schachtel nicht vollständig geöffnet und sie konnte mit ihren Fingern die Kette nicht erreichen. Mit diesem Problem konfrontiert öffnete und schloss Lucienne ihren Mund mehrmals, um sich wiederum zu bemühen, die Schachtel weiter zu öffnen. So gelang es ihr schließlich, die Kette zu erreichen. Piaget nahm an, dass Lucienne ihren Körper auf die Schachtel projizierte und mit dem Öffnen des eigenen Mundes das Öffnen der Schachtel abbildete. Nachdenken im eigentlichen Sinne findet noch nicht statt, sondern ist an korrespondierende motorische Prozesse gebunden.

Die Motorik spielt in Piagets Theorie der kognitiven Entwicklung des Menschen (für eine Übersicht siehe Reusser, 2006) eine herausragende Rolle. Er sieht nämlich in der Motorik den Ursprung der menschlichen Intelligenz (Piaget, 1936/1952). Demnach löst der Mensch erst langsam im Laufe der Entwicklung seine mentalen Repräsentationen von motorischen Prozessen ab, muss sich aber auch zunächst noch auf konkrete Repräsentation stützen und ist erst mit Beginn der Pubertät zu wirklich abstraktem Denken befähigt. Dieser Entwicklungsverlauf ist mit der Annahme verbunden, dass die Teile des Großhirns, die für eine grundlegende Auseinandersetzung mit der Umwelt nötig sind, also Wahrnehmung und Motorik, auch evolutionär gesehen am ältesten sind (vgl. Killackey, 1995). Ähnlich wie Haeckel (1866) bei der Embryonalgenese ging auch Piaget (1970/1988) bei der kognitiven Entwicklung davon aus, dass der Weg des individuellen Menschen zum vernunftbegabten Wesen eine Rekapitulation verschiedener stammesgeschichtlicher Zustände beinhaltet. Tatsächlich hoffte Piaget (1970/1988) durch die Nachzeichnung der kognitiven Ontogenese

auch Rückschlüsse auf die kulturelle Phylogenese des Menschen ziehen zu können (Reginensi, 2004; Sinha, 1999; vgl. Platt & Spelke, 2009).

Diese Betrachtung des Kindes als ein im Beginn rein perzeptuell-motorisches Wesen ist schwer mit dem Phänomen des *kompetenten Säuglings* (Baillargeon, 2004; Baillargeon & Carey, in press) in Einklang zu bringen. Nichtsdestotrotz gibt es auch in jüngster Zeit Autoren, die sogar noch radikalere *Embodiment*-Theorien vertreten (für eine Übersicht siehe Wilson, 2002): Während Piaget (1937/1954; Piaget & Inhelder, 1948/1967) noch davon ausgeht, dass Menschen auf dem Höhepunkt ihrer Entwicklung zu echtem abstrakten Denken fähig sind, vermutet zum Beispiel Gibbs (2005, 2008), dass alles menschliche Denken letztendlich auf motorische Prozesse reduzierbar sei.

### **Stand der Forschung**

Tatsächlich gibt es empirische Befunde, die eine engere Verknüpfung von kognitiven Prozessen und der Motorik im Kindesalter im Gegensatz zum Erwachsenenalter durchaus nahelegen. Während die meisten der Arbeiten, die in diesem Zusammenhang vorgestellt werden sollen, auf einem mentalen Rotationsparadigma beruhen (Funk, Brugger & Wilkening, 2005; Frick, Daum, Walser & Mast, 2009; Schwarzer, Freitag & Buckel, 2010a, 2010b; vgl. Shepard & Metzler, 1971), gibt es auch eine Arbeit (Frick, Daum, Wilson & Wilkening, 2009), die auf einem weiteren Paradigma zur dynamischen Vorstellung von Schwartz und Black (1999) beruht.

### **Mentale Rotation**

Mit dem Paradigma der mentalen Rotation lieferten Shepard und Metzler (1971) einen einschlägigen Beleg für analoge Repräsentationen. Sie ließen ihre Probanden immer zwei Würfelkombinationen (WK) auf Deckungsgleichheit kontrollieren. Dabei waren diese WK immer entweder tatsächlich deckungsgleich oder aber Spiegelbilder voneinander. Außerdem wurden die WK aus verschiedenen Blickwinkeln gezeigt. Shepard und Metzler vermuteten,



dass die Probanden die WK durch eine vorgestellte Rotation auf dem kürzesten Weg in die gleiche Orientierung überführten, um einen Abgleich vorzunehmen. Tatsächlich fanden sie einen linearen Zusammenhang zwischen dem Rotationswinkel (Quantifizierung der Orientierung des Stimulus) und der Reaktionszeit (RZ), die die Probanden zur Lösung der Aufgabe benötigten. Daraus schlossen sie auf eine analoge mentale Transformation der Stimuli.

### **Motorische Einflüsse auf die mentale Rotation**

Angelehnt an Arbeiten Parsons' (1987, 1994) zur mentalen Rotation von Körperteilen untersuchten Funk et al. (2005) den Einfluss der eigenen Körperhaltung und der physiologischen Bewegungseinschränkungen auf Prozesse der mentalen Rotation.

Parsons (1987) hatte entdeckt, dass erwachsene Probanden Abbilder von Händen (in verschiedenen Positionen) schneller als linke oder rechte Hand identifizieren können, wenn ihre eigene Handstellung der Perspektive auf der Darbietung entspricht. Wenn zum Beispiel die Probanden ihre Hände mit dem Handrücken nach oben hielten, konnten sie auch Bilder von Händen, die mit dem Handrücken nach oben dargeboten (*dorsale* Perspektive) waren, schneller zuordnen als Bilder von Händen mit der Handfläche nach oben (*palmare* Perspektive). Weiterhin konnte Parsons (1994) zeigen, dass die Zeit, die Probanden für solche Zuordnungen benötigten, stark mit der Zeit korrelierte, die Probanden brauchten, um ihre Hand tatsächlich in die dargebotene Stellung zu bewegen. Er nahm daher an, dass die mentale Transformation, die zur Lösung der Aufgabe nötig ist, den Regeln einer tatsächlichen Bewegung unterliegt; und zudem, dass diese Transformation in der tatsächlichen Stellung der eigenen Hände ihren Anfang nimmt (vgl. Sekiyama, 1982). Zur Lösung der Aufgabe überführten die Probanden demnach in einer verdeckten (nur vorgestellten) Bewegung ihre eigenen Hände in die in der Abbildung dargestellte Position und entschieden dann durch Abgleich, ob eine linke oder rechte Hand dargestellt war.

Im Vergleich zur klassischen mentalen Rotation (Shepard & Metzler, 1971) hängen folglich bei der mentalen Transformation von Körperteilen die RZ nicht nur vom kürzesten möglichen Rotationswinkel ab, sondern werden auch über physiologische Einschränkungen des menschlichen Bewegungsapparates vermittelt und hängen weiterhin auch von der aktuellen Körperhaltung der Probanden ab.

In ihrer entwicklungspsychologischen Studie konzentrierten sich Funk et al. (2005) vor allem auf die Auswirkungen der aktuellen Körperhaltung. Kindergartenkinder (5- bis 6-jährige) sollten auf einer Tastatur die rechts gelegene Taste drücken, wenn ihnen ein Abbild einer rechten Hand präsentiert wurde, und umgekehrt die links gelegene Taste bei einer linken Hand. In der einen Bedingung bedienten die Kinder die Tastatur von oben und hielten ihre eigenen Hände damit automatisch in einer dorsalen Position, in der anderen Bedingung wurde die Tastatur umgedreht, und die Kinder sollten die Tasten nun von unten her bedienen. Dies führte zu einer palmaren Handstellung. Zusätzlich wurde auch die Perspektive auf die dargestellten Reize variiert (ebenfalls palmar/ dorsal) und diese dann in verschiedenen Rotationswinkeln präsentiert ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$ ). Die Sicht auf die eigenen Hände wurde während des Versuches verdeckt. Tatsächlich waren die Kinder schneller in ihren Beurteilungen, wenn ihre eigene Handstellung perspektivisch der zu beurteilenden Hand entsprach, als wenn sich die Sicht auf die eigene Hand von der Perspektive der Darstellung unterschied. Bei einer Stichprobe mit erwachsenen Probanden ergab sich dieser Geschwindigkeitsvorteil allerdings nur bei der Beurteilung der dorsal präsentierten Abbildungen von Händen. Daraus schlussfolgerten die Autoren, dass die beschriebene Wechselwirkung zwischen Körper und Motorik einerseits und dynamischer Vorstellung andererseits bei Kindern stärker ausgeprägt sei als bei Erwachsenen. Diese Interpretation sehen sie in Einklang mit der anfangs geschilderten Annahme der Entwicklung des Denkens aus der Motorik.

Ein weiterer Ansatzpunkt für die Erforschung des Zusammenhanges zwischen mentaler Rotation und Motorik sind Wechselwirkungen zwischen Bewegungsaufgaben (motorische Rotation) und mentaler Rotation: Hierbei geht es um die Frage, ob eine mit einer manuellen Rotationsbewegung kompatible mentale Rotation schneller abläuft als eine damit inkompatible. So ließen zum Beispiel Wexler, Kosslyn und Berthoz (1998) Probanden mit einem Joystick eine kreisende Bewegung ausführen und gleichzeitig mentale Rotationsaufgaben lösen. Entsprach die Richtung der Bewegung dem angenommenen kürzesten Weg der mentalen Rotation, war die RZ kürzer, als wenn sie der mentalen Rotation entgegen lief. Ähnliche Effekte konnten bei Erwachsenen in mehreren Studien nachgewiesen werden (Sack, Lindner & Linden, 2007; Wohlschläger, 2001; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998).

Auch in einer Untersuchung mit Kindern fanden Frick, Daum, Walser et al. (2009) eine solche Wechselwirkung. Die Kinder wurden dazu angeleitet, eine Kurbel zu drehen. Gleichzeitig sollten sie eine vereinfachte mentale Rotationsaufgabe lösen (vgl. Marmor, 1975): Es sollte jeweils entschieden werden, ob eine Art Puzzlestück mit zwei Auswölbungen in zwei vorgegebene Aussparungen passte. Die Drehrichtung der manuellen Rotation wurde immer dann als kompatibel mit der mentalen Rotation angesehen, wenn sie dem kürzeren Weg folgte, um den das Objekt rotiert werden musste, um einen Abgleich zu ermöglichen. Insgesamt konnte in allen untersuchten Altersgruppen und in allen Bedingungen der typische Zusammenhang zwischen Winkeldisparität und RZ beobachtet werden. Wurde die Kurbel in eine inkompatible Richtung gedreht, führte dies zu einer Erhöhung der RZ bei den fünf und den acht Jahre alten Kindern – bei den elf Jahre alten Kindern und den Erwachsenen manifestierte sich kein solcher Unterschied. Wie Funk et al. (2005) sehen auch Frick, Daum, Walser et al. (2009) ihre Ergebnisse als Bestätigung der Annahme eines engeren Zusammenhanges zwischen Motorik und Vorstellung in der Kindheit als im

Erwachsenenalter. Dieses sehen sie als übereinstimmend mit der Theorie Piagets und der Entwicklung des Denkens aus der Motorik.

Kritisch anzumerken ist, dass in beiden Studien auch eine Art Deckeneffekt vorliegen kann: Aufgrund zu geringer Anforderungen könnte eine mögliche Beeinflussung durch motorische Interferenzen bei älteren Kindern und Erwachsenen nicht mehr messbar sein. Frick, Daum, Walser et al. (2009) führen einen Deckeneffekt auch explizit als Alternativerklärung an: Ältere Probanden verfügen möglicherweise über genügend kognitive Ressourcen, um Beeinträchtigungen durch die motorische Aufgabe zu kompensieren. Auch die Aufgabe bei Funk et al. (2005) könnte für die erwachsenen Probanden schlicht zu einfach gewesen sein. Interessant wäre es auch zu klären, wie sich motorische Einflüsse auf die Leistung bei Kindern im Vergleich zu unbeeinflusster mentaler Rotation auswirken. Aufgrund der Embodiment-Hypothese würde man bei kompatibler manueller Rotation von einem positiven Einfluss ausgehen. Bei Erwachsenen sind die Befunde bisher uneinheitlich (Sack et al., 2007).

### **Motorische Entwicklung und mentale Rotation bei Säuglingen**

Die Verwendung von Blickzeitpräferenzparadigmen (auch: Neuigkeitspräferenzparadigmen) ermöglicht es auch bei Säuglingen Hinweise auf Fähigkeiten zur mentalen Rotation zu untersuchen. Mash, Arterberry und Bornstein (2007) entwickelten ein Paradigma, bei dem den Säuglingen eine Abfolge von Bildern eines geometrischen Objektes gezeigt wurde. Dabei wurde das gleiche Objekt aus verschiedenen Perspektiven gezeigt – auf jedem neuen Bild weitere 60° um eine vertikale Achse rotiert. Beim kritischen Ereignis wurde das Objekt dann 120° um eine horizontale Achse gedreht gezeigt. In einer Kontrollbedingung wurde ein tatsächlich neues Objekt in gleicher Orientierung gezeigt. Da fünf Monate alte Säuglinge nur beim alten Objekt nicht dishabituieren, also eine gleich bleibende Blickzeit zeigten, gingen die Autoren davon aus, dass die Säuglinge erkannten, dass es sich um das gleiche Objekt aus einer neuen Perspektive handelte (vgl. Bower, 1966).

Den Zusammenhang zur Motorik stellten Schwarzer et al. (2010a, 2010b) in einer Studie mit neun Monate alten Säuglingen her. Dazu verwendeten sie ein von Moore und Johnson (2008; vgl. Quinn & Liben, 2008) abgeleitetes Untersuchungsparadigma. Im Unterschied zu bisherigen Studien erhoben sie auch die motorischen Fähigkeiten der teilnehmenden Säuglinge. Dabei stellte sich - zumindest bei den männlichen Säuglingen - ein Zusammenhang zwischen Motorik und mentaler Rotationsfähigkeit heraus: Nur Säuglinge, die schon robben oder kriechen konnten, dishabituierten nicht bei der neuen Perspektive. Daraus schlossen die Autoren, dass vor allem Säuglinge, die sich selbst fortbewegen können, bekannte Objekte auch aus neuen Perspektiven als die gleichen Objekte erkennen können.

Dies legt nahe, dass die der mentalen Rotation zugrunde liegenden Fähigkeiten eng mit motorischen Prozessen verknüpft sind; oder aber, dass die selbst initiierte Fortbewegung eine Sensibilität für die Wahrnehmung verschiedener Perspektiven induziert. Diese beiden Vermutungen schließen sich allerdings nicht zwingend gegenseitig aus.

### **Motorische Einflüsse auf die Vorstellung von dynamischen physikalischen Prozessen**

Ein weiteres Beispiel für eine Verknüpfung von Vorstellung und Motorik stammt von Schwartz und Black (1999): Probanden wurden gebeten, sich den Wasserspiegel in einem Glas vorzustellen. Dann sollten sie angeben, wie sich der Wasserspiegel verändert, wenn das Glas gekippt wird bzw. wie weit man das Glas kippen kann, bevor Wasser überläuft. Variiert wurde der Glasdurchmesser. Bei gleicher Glashöhe und gleichem Wasserpegel kann ein schmales Glas weiter gekippt werden als ein weites. Es stellte sich heraus, dass nur die Probanden, die tatsächlich ein (leeres) Glas in die Hand bekamen und dieses kippen durften, den Durchmesser des Glases bei der maximal möglichen Neigung korrekt beachteten.

Dieses Phänomen untersuchten Frick, Daum, Wilson et al. (2009) in einer entwicklungspsychologischen Studie in drei Experimenten mit fünf, sieben und neun Jahre alten Kindern und mit Erwachsenen. In einem ersten Experiment überprüften sie, ob die Probanden den Durchmesser verschiedener Gläser beim Kippen beachteten. Dazu befestigten

sie ein schmales oder ein breites Glas an einer vertikal aufgehängten, drehbaren Scheibe. Aufgabe der Teilnehmer war es, entweder das Glas (und damit auch die Scheibe) soweit zu drehen, dass das (imaginäre) Wasser den Rand erreichte (motorisch-manuelle Bedingung), oder mit einem Pfeil zu markieren (explizites Urteil), wie weit man das Glas entsprechend kippen könnte. Im Unterschied zu Schwartz und Black (1999) konnten die Probanden in allen Bedingungen das Glas sehen (im ursprünglichen Experiment hielten die Probanden ihre Augen geschlossen). Konsistent mit den Ergebnissen von Schwartz und Black (1999) beachteten die Teilnehmer aller Altersgruppen nur in der motorischen Bedingung die Weite des Glases, kippten also das schmale Glas weiter als das breite. In einem weiteren Experiment überprüften Frick, Daum, Wilson et al. (2009), ob tatsächlich die manuelle Bewegung des Glases für den Effekt oder das visuelle Feedback ausschlaggebend sei. Dazu ließen sie die Probanden die Neigung des Glases per Fernsteuerung einstellen. Hier ergab sich bei den fünf Jahre alten Kindern kein signifikanter Effekt für die Weite des Glases. Die älteren Kinder und die Erwachsenen beachteten allerdings den Durchmesser des Glases physikalisch richtig. In einem letzten Experiment testeten sie nochmals den Einfluss des visuellen Feedbacks, indem sie sieben Jahre alte Kinder sowie Erwachsene die Neigung des Glases wieder manuell einstellen ließen, jedoch wurde der Blick auf das Glas durch einen Vorhang verdeckt. Nun konnte kein Einfluss des Glasdurchmessers mehr festgestellt werden.

Trotzdem priorisieren die Autoren (Frick, Daum, Wilson et al., 2009) eine Vermittlung des Effektes über den motorischen Einfluss und vernachlässigen den Einfluss des visuellen Feedbacks. Als entscheidend sehen sie den Befund an, dass die fünf Jahre alten Kinder nur in der motorisch-manuellen Bedingung (Exp. 1 vs. Exp. 2) den Glasdurchmesser richtig integrieren konnten. Daraus schließen sie, dass bei den jüngeren Kindern auch die Rolle der Motorik für die Vorstellung größer sei. Dies erklärt jedoch nicht, warum in der rein motorisch-haptischen Bedingung (Exp. 3) kein Effekt für den Glasdurchmesser bestimmbar war.

### **Eigene Arbeiten zum Forschungsgegenstand**

Wie exemplarisch dargestellt, wird in der aktuellen Forschung überwiegend von einer engeren Verknüpfung von kognitiven Prozessen mit der Motorik im Kindesalter (im Gegensatz zum späteren Verlauf der Entwicklung) ausgegangen. Diese engere Verknüpfung interpretieren viele Autoren als einen Beleg für die Entwicklung des Denkens aus der Motorik und folgen damit einem Ansatz, der eigentlich als neo-piagetianisch zu bezeichnen wäre. Unsere im Folgenden vorgestellten Studien können diese angenommene engere Verknüpfung jedoch nicht bestätigen. In einer Serie aus drei Experimenten untersuchten wir die mentalen Transformationen von Händen im Kindesalter (Krüger & Krist, 2009a, 2009b; vgl. Parsons, 1987, 1994). Im Gegensatz zu Funk et al. (2005) lag bei unseren Studien der Schwerpunkt nicht auf der aktuellen Handstellung der Probanden im Vergleich zur Perspektive auf die dargestellten Hände (d.h., die Testreize), sondern auf der Projektion physiologischer Bewegungseinschränkungen auf die mentale Rotation der Reize. In einer weiteren Versuchsserie aus zwei Experimenten verglichen wir mit einem neuen Paradigma verschiedene Formen der externalen Unterstützung der Vorstellung - zum einen durch die Motorik und zum anderen durch die Wahrnehmung (Krüger & Krist, 2011). In den meisten Studien, die die Entwicklung des Zusammenhanges von Vorstellung und Motorik zum Gegenstand haben, sind die Probanden Kindergartenkinder ab fünf Jahren (z.B. Funk et al., 2005; Frick, Daum, Walser et al., 2009; unsere eigenen Studien, siehe unten). Allerdings sind die jüngsten Probanden, bei denen ein derartiger Zusammenhang gefunden wurde, die von Schwarzer et al. (2010a, 2010b) untersuchten Säuglinge. Auf der Suche nach Möglichkeiten, um diese erhebliche Alterslücke zu überbrücken (vgl. Krist & Krüger, 2011), entwickelten wir in einer letzten Studie Ansätze für ein neues mentales Rotationsparadigma, das auch für drei Jahre alte Kinder geeignet ist (Krüger, 2011).

### **Projektion physiologischer Bewegungseinschränkungen auf die mentale Rotation**

Betrachtet man die Bewegungsmöglichkeiten der Hand aus dem Handgelenk heraus bei einer waagerechten Stellung des Armes, so stellt man fest, dass - hält man die Handfläche nach oben (palmar) - eine Bewegung der Hand zur Körpermitte (Innenrotation) leichter fällt als eine Bewegung vom Körper weg (Außenrotation), die weitgehend blockiert ist. Hält man jedoch den Handrücken nach oben (dorsal), verhält es sich umgekehrt. Nun ist die Innenrotation blockiert und die Außenrotation frei (vgl. Parsons, 1994; Putz & Pabst, 1993). Gemäß einer Embodiment-Hypothese würde man damit rechnen, dass eine mentale Transformation der Abbilder von Händen ähnlichen Regeln unterliegt wie die tatsächliche Bewegung und sich dieses auch in den RZ niederschlägt (z.B. Parsons, 1987, 1994; vgl. Wohlschläger, 2001). Die daraus abgeleitete Vorhersage lautet, dass auch eine entsprechende mentale Rotation diesen Bewegungseinschränkungen folgt. Demnach sollte man die palmaren Abbilder von Händen mental schneller nach innen rotieren als nach außen und die dorsalen schneller nach außen als nach innen.

Um dieses zu überprüfen, entwickelten wir für unsere entwicklungspsychologischen Studien ein für Kinder leicht verständliches, computergestütztes mentales Rotationsparadigma: Den Probanden wurde immer ein großes Bild in der Mitte des Schirms mit zwei kleinen Vergleichsbildern rechts und links unten präsentiert. Aufgabe der Probanden war es zu entscheiden, welches der kleinen Vergleichsbilder identisch mit dem großen zentralen Bild war. Dazu betätigten sie auf der entsprechenden Seite einen Schalter. Die Sicht auf die eigenen Hände wurde immer verdeckt.

Gegenüber älteren mentalen Rotationsparadigmen für Kinder hatte unser Paradigma den Vorteil, dass kein vorangestelltes Training mit realen Objekten notwendig war (vgl. Marmor, 1975). Stattdessen unterschieden sich zu Beginn des Trainings die Motive auf den beiden Vergleichsbildern. Dadurch verstanden auch die jüngeren Kinder die Aufgabe schnell.



Im späteren Verlauf des Trainings und während des eigentlichen Tests waren die Vergleichsbilder immer Spiegelbilder voneinander.

In einem ersten Experiment konnte allerdings kein Motoreffekt (i.S.v. Beeinflussung der RZ durch physiologische Bewegungseinschränkungen) nachgewiesen werden (Krüger & Krist, 2009a, Exp. 1) – weder bei den fünf bis sechs Jahre alten Kindern noch bei den Erwachsenen. Hierbei wurden im Test nur Hände von dorsal gezeigt und im Training ausschließlich körperfremde Objekte verwendet. Außerdem betätigten die Probanden die Schalter mit den Füßen. Obwohl vergleichbare Studien keine Hinweise dahingehend brachten, besteht natürlich die Möglichkeit, dass bei Abbildungen von Händen das Auftreten eines Motoreffektes wahrscheinlicher wird, wenn der Effektor der Eingabe dem Versuchsmaterial entspricht (vgl. Parsons, 1987, 1994). Zudem erscheint es subjektiv leichter, Bewegungseinschränkungen des Handgelenkes durch die Requirierung weiterer Freiheitsgrade aus dem Schultergelenk zu umgehen, wenn sich die Hände in einer dorsalen Stellung befinden statt in einer palmaren Handstellung (vgl. Krüger, König, Meyer & Krist, 2010). Weiterhin könnte ein Training nur mit körperfremden Objekten eine nicht-motorische Rotationsstrategie bahnen (vgl. Kosslyn, Thompson, Wraga & Alpert, 2001).

In einem weiteren Experiment versuchten wir daher, einen Motoreffekt zu provozieren (Krüger & Krist, 2009a, Exp. 2). Hierbei gaben die Probanden ihre Antworten per Handschalter. Im Test wurden Hände aus der palmaren Perspektive präsentiert und im Training wurden auch Abbilder von Händen eingeführt. Tatsächlich ließ sich jetzt in allen untersuchten Altersgruppen (fünf bis sechs Jahre alte Kindergartenkinder, sieben Jahre alte Grundschulkindern und Erwachsene) ein Motoreffekt nachweisen. Einschränkend muss aber angeführt werden, dass dieser bei den Kindergartenkindern nur bei der Beurteilung von Bildern der rechten Hand auftrat, während der Effekt bei den älteren Probanden bei beiden Händen sichtbar war. Dies entspricht nicht der Erwartung, dass Motoreffekte stärker ausgeprägt sind, je jünger die Kinder sind. Man könnte sogar spekulieren, dass die

Beeinflussung der mentalen Rotation von Körperteilen durch physiologische Bewegungseinschränkungen erst im Laufe der Entwicklung erworben wird. Demnach tritt der Effekt dann zuerst bei der rechten (dominanten) Hand auf.

In einem letzten Experiment (Krüger & Krist, 2009b) variierten wir die Perspektive auf die Hände (palmar vs. dorsal), das Training (Hände vs. körperfremde Objekte) und den Eingabeeffektor (Hände vs. Füße), wobei die Handstellung der Probanden (dorsal) stabil gehalten wurde (in den vorhergehenden Experimenten wurde die Handstellung der Probanden nicht kontrolliert). Dabei bestätigten sich für die älteren Kinder (Grundschüler der zweiten Klassenstufe) und für die Erwachsenen die Ergebnisse der beiden ersten Experimente (Krüger & Krist, 2009a): Ausschlaggebend für das Auftreten des Motoreffektes war die Perspektive auf die Hände. Nur bei der palmaren Ansicht trat der Effekt auf. Dieses Ergebnis konnte auch in einem weiteren Experiment mit Erwachsenen repliziert werden (Krüger et al., 2010). Bei den jüngeren Kindern (fünf bis sechs Jahre alte Kindergartenkinder) hingegen trat der Motoreffekt nur auf, wenn deren eigene Handstellung der Perspektive auf die präsentierten Hände entsprach – also beide Male dorsal (wobei der umgekehrte Test, also Handstellung und Präsentation palmar, noch aussteht). Weder das Training noch der Eingabeeffektor schienen einen Einfluss zu haben. Obwohl ein qualitativer Unterschied von jüngeren Kindern im Vergleich zu älteren Kindern und Erwachsenen gezeigt werden konnte, kann man trotzdem nicht von einer stärkeren Ausprägung bei den jüngeren Kindern sprechen. Es könnte sogar vermutet werden, dass die jüngeren Kinder einen Motoreffekt nur dann zeigen, wenn dieser durch die eigene Körperhaltung ausgelöst wird anstatt von dem Ausprägungsgrad der Bewegungseinschränkung.

Diese Ergebnisse sprechen nicht für eine Dominanz der Motorik in der Vorstellung der jüngsten getesteten Kinder. Besonders die Ergebnisse von Experiment 2 und auch teilweise von Experiment 3 werfen eher die Frage auf, ob in der jüngsten Altersgruppe überhaupt eine robuste oder eine besonders zugängliche Repräsentation der Bewegungsmöglichkeiten des

eigenen Körpers vorliegt. Insgesamt sprechen unsere Befunde zur Projektion physiologischer Bewegungseinschränkungen auf die mentale Rotation daher gegen ein stärkeres Embodiment in der frühen Entwicklung.

### **Formen externaler Unterstützung bei der räumlichen Vorstellung**

In einschlägigen Studien wurde gezeigt, dass Kindergartenkinder Beurteilungs- oder Vorstellungsaufgaben, deren Lösungen ihnen sonst verschlossen bliebe, durch eine Handlung lösen können (z.B. Krist, Fieberg & Wilkening, 1993; Rieser, Garing & Young, 1994; vgl. Schwartz & Holton, 2000). Allerdings bleibt dabei offen, ob speziell die Handlung (i.S. eines motorischen Prozesses) die Vorstellung unterstützt oder ob auch andere Formen der Unterstützung einen positiven Einfluss haben könnten.

Dies wird an einem Beispiel der räumlichen Vorstellung von Erwachsenen deutlich. Simons und Wang (1998; Wang & Simons, 1999) untersuchten, ob Probanden Positionen von Objekten in einer Anordnung besser bestimmen konnten, nachdem die Anordnung bewegt wurde oder nachdem sich die Teilnehmer selbst (fort-)bewegt hatten. Dabei blieb der relative Bezug der Anordnung zu den Probanden in beiden Bedingungen gleich. Es stellte sich heraus, dass die Leistung der Probanden besser war, wenn sie zu Fuß ein Stück um die Anordnung herumgegangen waren, als wenn die Anordnung entsprechend rotiert wurde. Die Vermutung, dass dieser Unterschied in der Leistung durch die Beteiligung motorischer Prozesse (die selbständige Bewegung) zustande kam, konnte hier widerlegt werden: Auch wenn die Probanden auf einem Stuhl sitzend um die Anordnung geschoben wurden, trat der Effekt auf.

Auf vergleichbaren Überlegungen baut unsere Studie zur Auswirkung von externaler Unterstützung der dynamischen Vorstellung auf (Krüger & Krist, 2011). Wir baten Kinder (fünf bis sechs Jahre alte Kindergartenkinder und Grundschüler der dritten Klassenstufe), sich einen markanten Punkt auf einer Abbildung zu merken, welche auf einer drehbaren Scheibe fixiert war. Nachdem die Abbildung abgedeckt war, wurde entweder die Scheibe für die Kinder gedreht (Wahrnehmungsbedingung), die Kinder durften die Scheibe selbst drehen

(Motorbedingung) oder die Kinder sollten sich vorstellen, dass die Scheibe in eine vorgegebene Position gedreht wurde (reine Vorstellungsbedingung). Daraufhin sollten die Kinder angeben, wo sich der markante Punkt nun befinden würde. Die Abweichung vom Ziel war bei externaler Unterstützung (Kombination der beiden Bedingungen, in denen die Scheibe tatsächlich gedreht wurde) kleiner als bei der reinen Vorstellung. Zwischen der Wahrnehmungsbedingung und der Motorbedingung gab es jedoch keine Unterschiede bezüglich der Zielabweichung. Dieses konnte auch in einem Kontrollexperiment bestätigt werden (Krüger & Krist, 2011, Exp. 2).

Auch dieses Ergebnis kann weder eine starke Embodiment-Hypothese noch die engere Verknüpfung von Vorstellung und Motorik bei Kindern im Gegensatz zu Erwachsenen bestätigen. Beiden Annahmen zufolge hätte man eine bessere Leistung in der Motorbedingung erwartet, weil das Motorsystem hier aktiv in die mentale Transformation eingebunden ist.

### **Mentale Rotation bei drei Jahre alten Kindern**

Allerdings besteht die Möglichkeit, dass der angenommene stärkere Zusammenhang zwischen Vorstellung und Motorik nur bei noch jüngeren Kindern als den bisher untersuchten fünf Jahre alten Kindern zuverlässig nachzuweisen ist. So zeigen zum Beispiel die Befunde von Schwarzer et al. (2010a, 2010b), dass schon bei Säuglingen die Motorik eine Rolle in der dynamischen Vorstellung spielen kann. Bei der mentalen Rotation besteht jedoch das Problem, dass das klassische Paradigma bei Kindern unter fünf Jahren nicht zuverlässig angewendet werden kann. Vier Jahre alte Kinder tendieren dazu, Antworten bei Rotationsaufgaben aufgrund irrelevanter Merkmale des Reizmaterials zu geben oder raten ausschließlich (Quaiser-Pohl, Rohe & Amberger, 2010). Nur bei einem sehr geringen Anteil (ca. 25%) der vier Jahre alten Kinder gibt es Hinweise darauf, dass sie überhaupt mentale Transformationen (i.S.v. dynamischen Repräsentationen) als Lösungsverhalten anwenden (Estes, 1999). Bei Säuglingen einsetzbare Paradigmen, die auf dem Blickzeitparadigma

beruhen, können wiederum bei älteren Kindern nicht ohne weiteres angewandt werden (z.B. Gezer, 2009; vgl. Keen, 2003; Krist, 2010).

Daher entwickeln wir gegenwärtig ein neues Paradigma, welches nicht nur bei Kindern unter fünf Jahren anwendbar ist, sondern auch noch – im Gegensatz zu den bei Säuglingsstudien üblichen Methoden – die Messung und Interpretation von RZ erlaubt (Krüger, 2011). In einem ersten Schritt reduzierten wir die kognitiven Anforderungen der Aufgabe, indem wir den Kindern nicht mehr abverlangten, eine Entscheidung bezüglich der Deckungsgleichheit von zwei oder mehr Objekten zu treffen. Stattdessen war es die Aufgabe der Probanden, das Abbild eines Objektes auf dem kürzesten Wege gerade zu stellen (i.S.v. aufrecht ausrichten). Dahinter steht die Überlegung, dass die Probanden zur Durchführung dieser Aufgabe das Objekt erst im Geiste gerade drehen.

In einem Experiment ließen wir drei Jahre alte Kinder diese Aufgabe an einem Touchscreen bearbeiten. Bei der Auswahl des Reizmaterials wurde darauf geachtet, dass die verwendeten Bilder immer ein eindeutiges Unten und Oben hatten. Jedes Objekt wurde immer gleichzeitig zweimal auf dem Touchscreen präsentiert. Einmal in der gerade ausgerichteten Zielstellung und einmal rotiert. Die Kinder wurden aufgefordert, das rotierte Objekt auf dem kürzesten Wege wieder gerade zu drehen. Dazu konnten sie das Objekt virtuell durch das Entlangziehen des Fingers auf einem umschließenden Rahmen drehen. Bei den Kindern, die überzufällig häufig den richtigen (kürzeren) Weg auswählten, um das Objekt gerade zu drehen, fand sich auch ein linearer Zusammenhang zwischen der Winkeldisparität und der RZ (hier: das erste Aufsetzen des Fingers auf dem Touchscreen), wie er bei der von Shepard und Metzler (1971) beschriebenen mentalen Rotation für eine analoge mentale Transformation kennzeichnend ist.

Einschränkend muss angeführt werden, dass auch nach diesem ersten erfolgreichen Experiment das Paradigma noch weiter evaluiert wird und zusätzlich noch Alternativerklärungen für das Ergebnis überprüft werden müssen, bevor es für die

Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Vorstellung und Motorik modifiziert und eingesetzt werden kann.

### **Schlussfolgerungen**

Es ist unzweifelhaft, dass es Wechselwirkungen zwischen motorischen Prozessen und der Vorstellung sowohl bei Säuglingen (z.B. Schwarzer et al., 2010a, 2010b), bei Kindern (z.B. Funk et al., 2005) als auch bei Erwachsenen (z.B. Schwartz & Black, 1999) gibt. Dies konnten wir für Kinder und Erwachsene auch in unseren eigenen Studien bestätigen (Krüger & Krist, 2009a, 2009b). Ebenso wenig bezweifeln wir, dass bei Kindern diese Wechselwirkungen der Vorstellung auch förderlich sein können (z.B. Jansen, Lange & Heil, 2011; vgl. Jansen, Titze & Heil, 2009). Auch in unserer Studie zur externalen Unterstützung bei der räumlichen Orientierung schnitten die Kinder in der Motorbedingung deutlich besser ab als bei der reinen Vorstellung (Krüger & Krist, 2011, Exp. 1).

Allerdings zeigte sich in dieser Studie auch, dass die motorische Stützung der mentalen Transformation einer rein perzeptuellen Unterstützung nicht überlegen war (Krüger & Krist, 2011, Exp. 1 und 2). Und auch in den Fällen, bei denen wir einen motorischen Einfluss auf die mentale Rotation bei Kindern nachweisen konnten, war dieser bei den Erwachsenen robuster und bei den Kindern eher variabel ausgeprägt (Krüger & Krist, 2009a, 2009b).

Deswegen muss in Erwägung gezogen werden, das auf Piagets Theorie der kognitiven Entwicklung (Piaget 1936/1952, 1937/1954) beruhende Modell - des aus der Motorik entstandenen Denkens - zu verwerfen. Im Folgenden werden daher alternative Modelle vorgestellt und deren Bezug zur Befundlage aufgezeigt. Zur Verteidigung Piagets sei an dieser Stelle aber angeführt, dass er zwar den Fokus eindeutig auf die Motorik legte, aber immer von der *Sensumotorik* sprach, so dass die Widerlegung einer motorischen Dominanz

zu Beginn der Ontogenese nicht automatisch diesen gesamten Aspekt seiner Theorie widerlegt (vgl. Reusser, 2006).

### **Flexibilität**

Ein erster Ansatz wäre die flexible Rekrutierung neuronaler Ressourcen. Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Annahme, dass die in den evolutionär älteren Teilen des Großhirns beheimateten Ressourcen (z.B. die Bewegungsplanung in den motorischen Arealen) fest in neuere Aufgabenbereiche (z.B. abstrakte Vorstellung) eingebunden sind, können hier je nach Bedarf verschiedene Ressourcen für ähnliche Aufgaben rekrutiert werden (vgl. Prinz, 1990).

Ein eindrucksvolles Beispiel für eine solche flexible Rekrutierung bei der mentalen Rotation liefert eine Studie mit bildgebenden Verfahren von Kosslyn et al. (2001): Bevor Probanden Aufgaben der mentalen Rotation mit Würfelkombinationen im Positronen-Emissions-Tomographen lösten, wurde ihnen entweder gezeigt wie eine Hand eine solche Kombination manipuliert, oder wie ein Mechanismus eine derartige Kombination bewegt. Nur bei Probanden, die mit der Hand gebahnt wurden, waren bei der Bearbeitung der mentalen Rotationsaufgaben auch überwiegend motorische Areale aktiviert.

Demnach unterliegen die beobachtbaren Motoreffekte bei Kindern starken Schwankungen, weil eine erfolgreiche Einbindung von motorischen Vorgängen in mentale Transformationsprozesse erst im Laufe der Entwicklung erworben wird.

### **Frontalhirnreifung**

Eine Präzisierung des Flexibilitätsansatzes bezieht sich auf die Steuerung der Requirierung verschiedener Ressourcen. Es liegt nahe, dass auch zur mentalen Rotation von Bildern von Händen motorische Areale herangezogen werden (Kosslyn, Digirolamo, Thompson & Alpert, 1998). Motorressourcen können dann die mentale Rotation unterstützen. Ist das der Fall, werden auch physiologische Bewegungseinschränkungen in die Transformation miteinbezogen. Dies kann sich allerdings auch negativ auf die Leistung bei der mentalen

Rotation auswirken, wenn aufgrund dieser Einschränkungen nicht der kürzeste Rotationsweg gewählt wird. Um Motorressourcen optimal nutzen zu können, ist daher eine Steuerung über Hemmung und Aktivierung beteiligter Prozesse durch das Frontalhirn unerlässlich, was Kinder vor Abschluss der Frontalhirnreifung (bis zum ca. 13. Lebensjahr) besonders einschränkt (vgl. Davidson, Amso, Anderson & Diamond, 2006; Diamond, 1991).

Demnach sind die beobachtbaren Motoreffekte bei Erwachsenen stabil und bei Kindern eher variabel (s. Funk et al., 2005; Krüger & Krist, 2009a, 2009b), weil es den Kindern nicht immer gelingt, Motorressourcen zielgerecht für den Transformationsprozess zu requirieren. Deutlich wird vor allem die mangelnde Hemmung auch bei motorischen Interferenzen während der mentalen Rotation: Wenn inkompatible motorische Prozesse gehemmt werden müssten, sind die älteren Probanden den jüngeren deutlich überlegen (s. Frick, Daum, Walser et al., 2009; vgl. Sack et al., 2007).

### **Intuitive Physik**

Eine weitere – meines Wissens nach in der Literatur bisher nicht diskutierte - Möglichkeit wurde von Harris (2011) vorgeschlagen: Es wäre denkbar, dass die Projektion physiologischer Bewegungseinschränkungen auf die mentale Rotation von Händen gar nicht mit motorischen Prozessen in Zusammenhang steht, sondern vielmehr das mechanische Wissen über den Bewegungsapparat widerspiegelt. Ähnlich wie man sich den Ablauf einer Uhr vorstellt, könnte man sich auch die Bewegung des Körpers in einer analogen mentalen Repräsentation als rein mechanischen Vorgang konstruieren.

Zwar wäre dieser Ansatz eine elegante Erklärung für den Befund, dass bei den fünf bis sechs Jahre alten Kindern ein Motoreffekt nur bei der rechten Hand sichtbar wurde (Krüger & Krist, 2009a, Exp. 2) – mit den Bewegungsmöglichkeiten dieser Hand sind sie nämlich besser vertraut als mit denen der linken; aber diesem Ansatz widersprechen die Befunde bildgebender Verfahren. Diese Befunde zeigen eindeutig, dass sowohl speziell bei der mentalen Rotation von Händen motorische Areale eine Rolle spielen (Kosslyn et al., 1998),



als auch allgemein bei der mentalen Rotation motorische Areale involviert sein können (Deutsch, Bourbon, Papanicolaou & Eisenberg, 1988; Kosslyn et al., 2001). Trotzdem wäre es interessant zu überprüfen, ob es möglich ist eine mentale Rotationsaufgabe so zu gestalten, dass die Probanden mechanische Bewegungseinschränkungen in ihren mentalen Transformationen berücksichtigen.

### **Timing-Responsive Representations**

Ein Ansatz, der sich im Schwerpunkt auf die Erklärung der externalen Unterstützung der Vorstellung (auch durch motorische Prozesse) bezieht, sind die *timing-responsive representations* (Schwartz & Black, 1999; Schwartz & Holton, 2000; vgl. Huber & Krist, 2004). Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass bestimmte Formen dynamischer Repräsentationen für externe Triebfedern sensibel sind. Unterteilt man eine mentale Repräsentation ähnlich einer Computeranimation in Unterschritte, so geben diese Triebfedern den Takt vor, in dem diese Unterschritte ablaufen. Oder, anderes ausgedrückt, jede Zustandsveränderung in der mentalen Repräsentation entspricht einer Zustandsveränderung in der Umwelt. Dabei wird deutlich, dass als solche Triebfedern nicht nur motorische Prozesse, wie das eigenhändige Drehen der Scheibe, sondern auch nicht-motorische Vorgänge, wie allein die Drehung der Scheibe oder das Drehen der Scheibe durch den Versuchsleiter, in Frage kommen (s. Krüger & Krist, 2011). Somit wird erkennbar, wie verschiedene Formen externer Vorgänge die Vorstellung stützen können, ohne primär mit dem motorischen System zusammenzuhängen. Mit diesem Ansatz kann auch erklärt werden, warum in einzelnen Fällen eine motorische Unterstützung anderen Formen überlegen sein kann (s. Frick, Daum, Wilson et al., 2009): Bei einer eigenständigen Bewegung kontrolliert das Individuum auch die Geschwindigkeit der Veränderung der Umwelt und kann damit diese für die Geschwindigkeit der mentalen Repräsentation optimieren. Dies könnte man dadurch belegen, indem man Probanden eine nicht motorisch fundierte Manipulation der Umgebung einräumt (vgl. Wexler et al., 1998).

**Fazit**

Die unseren Studien zugrunde liegenden empirischen Befunde sind weder mit einem radikalen Embodiment-Modell, wie es zum Beispiel von Gibbs (2005) vertreten wird, noch mit dem (neo-)Piagetanischen Modell der Entwicklung des Denkens aus der Motorik vereinbar, ohne zusätzliche Annahmen in diese Modelle aufzunehmen.

Meines Erachtens ist es daher wichtig zum einen die hier ansatzweise vorgestellten alternativen Modelle weiter auszubauen und zum anderen die Untersuchungsparadigmen für Säuglinge und Kleinkinder weiterzuentwickeln, um eine solidere Datenbasis aufbauen zu können, die darüber Aufschluss gibt, welche Rolle die Motorik in dieser frühen Phase der kognitiven Entwicklung spielt.

### Literatur

- Bower, T. G. R. (1966). Slant perception and shape constancy in infants. *Science*, *151*, 832-834.
- Baillargeon, R. (2004). Infants' physical world. *Current Directions in Psychological Science*, *13*(3), 89-94.
- Baillargeon, R. & Carey, S. (in press). Core cognition and beyond: The acquisition of physical and numerical knowledge. In: S. Pauen & M. Bornstein (Eds.), *Early childhood development and later achievement*. London: Cambridge University Press.
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C. & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, *44*, 2037-2078.
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insights into the meaning of object concept development. In S. Carey & R. Gelman (Hrsg.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition* (S. 67-110). New Jersey: Erlbaum.
- Deutsch, G., Bourbon, W. T., Papanicolaou, A. & Eisenberg, H. (1988). Visuospatial tasks compared via activation of regional cerebral blood flow. *Neuropsychologia*, *26*, 445-452.
- Estes, D. (1999). Young children's awareness of their mental activity: The case of mental rotation. *Child Development*, *69*(4), 1345-1360.
- Frick, A., Daum, M. M., Walser, S. & Mast, F. W. (2009). Motor processes in children's mental rotation. *Journal of Cognition and Development*, *10*, 18-40.
- Frick, A., Daum, M. M., Wilson, M. & Wilkening, F. (2009). Effects of action on children's and adults' mental imagery. *Journal of Experimental Child Psychology*, *104*, 34-51.
- Funk, M., Brugger, P. & Wilkening, F. (2005). Motor processes in children's imagery: The case of mental rotation of hands. *Developmental Science*, *8*, 402-408.

- Gezer, Ş. (2009, July). „*Modified false belief task*“ with 3-year-old children. Poster presented at the 11th European Congress of Psychology, Oslo, Norway
- Gibbs, R. W. (2005). *Embodiment and cognitive science*. New York: Cambridge University Press.
- Gibbs, R. W. (2008). Images schemas in conceptual development: What happened to the body? *Philosophical Psychology*, 21, 231-239.
- Haeckel, E. (1866). *Generelle Morphologie der Organismen*. Berlin: Georg Reimer.
- Harris, P. (2011, April). How does imagination facilitate problem solving? [Diskussant]. In: A. S. Joh & V. K. Jaswal (Chairs), *How does imagination facilitate problem-solving?* Symposium conducted at the biennial meeting of the Society for Research in Child Development (SRCD), Montreal, Canada.
- Huber, S. & Krist, H. (2004). When is the ball going to hit the ground? Duration estimates, eye movements, and mental imagery of object motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(3), 431-444.
- Jansen, P., Lange, L. & Heil, M. (2011). The influence of juggling on mental rotation performance in children. *Biomedical Human Kinetics*, 3, 18-22.
- Jansen, P., Titze, C. & Heil, M. (2009). The influence of juggling on mental rotation performance in children. *International Journal of Sport Psychology*, 40(2), 351-359.
- Keen, R. (2003). Representation of objects and events: Why do infants look so smart and toddlers so dumb? *Current Directions in Psychological Science*, 12, 79-83.
- Killackey, H. P. (1995). Evolution of the human brain: A neuro-anatomical perspective. In: M. S. Gazzaniga (Hrsg.). *The cognitive neurosciences* (S. 1243-1253). Cambridge, MA: MIT Press.
- Kosslyn, S. M., Digirolamo, G. J., Thompson, W. L. & Alpert, N. M. (1998). Mental rotation of objects versus hands: Neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35, 151-161.

- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Wraga, M. & Alpert, N. M. (2001). Imagining rotation by endogenous versus exogenous forces: Distinct neural mechanisms. *Neuroreport*, *12*, 2519-2525.
- Krist, H. (2010). Development of intuitions about support beyond infancy. *Developmental Psychology*, *46*, 266-278.
- Krist, H., Fieberg, E. L. & Wilkening, F. (1993). Intuitive physics in action and judgment: The development of knowledge about projectile motion. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory and cognition*, *29*, 952-966.
- Krist, H. & Krüger, M. (2011) *Towards a new method for bridging the gap between "smart" infants and "dumb" preschoolers*. Manuscript submitted for publication.
- Krüger, M. (2011). *Analogue Mental Transformations in Three-year-olds: Introducing a New Mental Rotation Paradigm Suitable for Young Children*. Manuscript submitted for publication.
- Krüger, M., König, K., Meyer, S. & Krist, H. (2010). Mental transformation of hands: How does stimuli perspective influence mental transformation in adults? [Abstract]. In: Christian Frings, Axel Mecklinger, Dirk Ventura & Hubert Zimmer (Hrsg.), *Beiträge zur 52. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP)*. 22. bis 24. März 2010 in Saarbrücken (S. 263). Lengerich: Pabst.
- Krüger, M. & Krist, H. (2009a). Imagery and motor processes - when are they connected? The mental transformation of body parts in development. *Journal of Cognition and Development*, *10*(4), 239-261.
- Krüger, M. & Krist, H. (2009b). Verknüpfung von Vorstellung und Motorik in der Entwicklung: Die mentale Transformation bei Darstellungen von Händen [Integration of imagery and motor processes in development: Mental transformation with pictures of hands]. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, *41*(4), 198-206.

- Krüger, M. & Krist, H. (2011). *Does the Motor System Facilitate Spatial Cognition? Motor Effects on Spatial Imagery in Human Development*. Manuscript submitted for publication.
- Marmor, G. S. (1975). Development of kinetic images: When does the child first represent movement in mental images? *Cognitive Psychology*, 7, 548-559.
- Mash, C., Arterberry, M. E. & Bornstein, M. H. (2007). Mechanisms of visual object recognition in infancy: Five-month-olds generalize beyond the interpolation of familiar views. *Infancy*, 12(1), 31-43.
- Moore, D. S. & Johnson, S. P. (2008). Mental rotation in human infants. A sex difference. *Psychological Science*, 19(11), 1063-1066.
- Parsons, L. M. (1987). Imagined spatial transformations of one's hands and feet. *Cognitive Psychology*, 19, 178-241.
- Parsons, L. M. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 709-730.
- Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children* (M. Cook, Trans.). New York: International Universities Press. (Original work published 1936)
- Piaget, J. (1954). *Construction of reality in the child* (M. Cook, Trans.). New York: Basic Books. (Original work published 1937)
- Piaget, J. (1988). *Einführung in die genetische Erkenntnistheorie* (F. Herborth, Übers.). Frankfurt a. M.: Suhrkamp. (Originalarbeit erschienen 1970)
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1967). *The child's conception of space* (F. J. Langdon & J. L. Lunzer, Trans.). New York: W. W. Norton & Company. (Originalarbeit erschienen 1948)

- Platt, M. L. & Spelke, E. S. (2009). What can developmental and comparative cognitive neuroscience tell us about the adult human brain? *Current Opinion in Neurobiology*, *19*, 1-5.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In O. Neumann & W. Prinz (Eds.), *Relationships between perception and action* (pp. 167-201). Heidelberg: Springer.
- Putz, R. & Pabst, R. (Hrsg.). (1993). *Atlas der Anatomie des Menschen* (20. Aufl., Band 1, Kopf, Hals, obere Extremität). München: Urban & Schwarzenberg.
- Quaiser-Pohl, C., Rohe, A. M. & Amberger, T. (2010). The solution strategy as an indicator of the developmental stage of preschool children's mental-rotation ability. *Journal of Individual Differences*, *31*(2), 95-100.
- Quinn, P. C. & Liben, S. L. (2008). A sex difference in mental rotation in young infants. *Psychological Science*, *19*(11), 1067-1070.
- Reginensi, L. (2004). On the status of logic in Piaget. *International Social Science Journal*, *181*, 439-454.
- Reusser, K. (2006). Jean Piagets Theorie der Entwicklung des Erkennens. In: W. Schneider & F. Wilkening (Hrsg.), *Theorien, Modelle und Methoden der Entwicklungspsychologie* (Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C, Theorie und Forschung, V. Entwicklungspsychologie, Vol. 1, S. 91-189). Göttingen: Hogrefe.
- Rieser, J. J., Garing, A. E. & Young, M. F. (1994). Imagery, action, and young children's spatial orientation: It's not being there that counts, it's what one has in mind. *Child Development*, *65*, 1262-1278.
- Sack, A. T., Lindner, M. & Linden. D. E. J. (2007). Object- and direction-specific interference between manual and mental rotation. *Perception & Psychophysics*, *69*(8), 1435-1449.

- Schwartz, D. L. & Black, T. (1999). Inferences through imagined actions: Knowing by simulated doing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(1), 116-136.
- Schwartz, D. L. & Holton, D. L. (2000). Tool use and the effect of action on the imagination. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26(6), 1655-1665.
- Schwarzer, G., Freitag, C. & Buckel, R. (2010a). *Mental Rotation in 9-month-old infants: The role of gender and self-produced locomotion*. Manuscript submitted for publication.
- Schwarzer, G., Freitag, C. & Buckel, R. (2010b). Mentale Rotation bei 9-monatigen Säuglingen: Die Rolle von Geschlecht und selbstinduzierter Bewegung [Abstract]. In: Christian Frings, Axel Mecklinger, Dirk Ventura & Hubert Zimmer (Hrsg.), *Beiträge zur 52. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP)*. 22. bis 24. März 2010 in Saarbrücken (S. 103). Lengerich: Pabst.
- Sekiyama, K. (1982). Kinesthetic aspects of mental representation in the identification of left and right hands. *Perception & Psychophysics*, 32, 89-95.
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Simons, D. J. & Wang, R. F. (1998). Perceiving real-world viewpoint changes. *Psychological Science*, 9, 315-320.
- Sinha, C. G. (1999). Theories of symbolization and development. In: A. Lock & C. R. Peters (Hrsg.), *Handbook of Human Symbolic Evolution* (S. 483-500). Oxford: Blackwell.
- Wang, R. F. & Simons, D. J. (1999). Active and passive scene recognition across views. *Cognition*, 70, 191-210.
- Wexler, M., Kosslyn, S. M. & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.



Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin and Review*, 9(4), 625-636.

Wohlschläger, A. & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 397-412.

Wohlschläger, A. (2001). Mental object rotation and the planning of hand movements. *Perception & Psychophysics*, 63(4), 709-718.

