



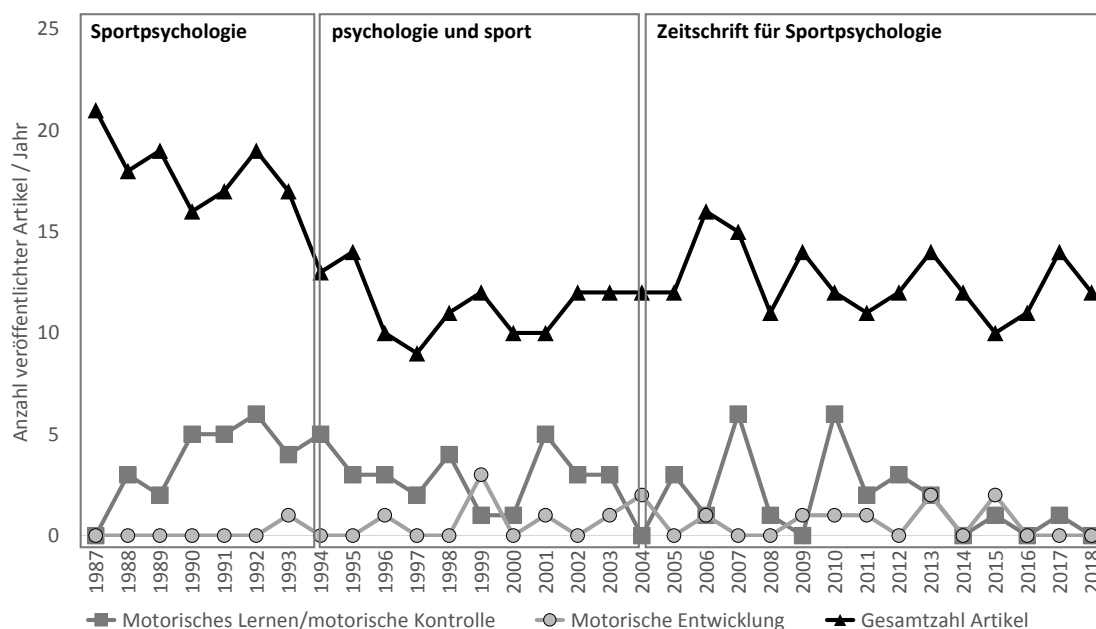
<sup>1</sup>Institut für Sport und Bewegungswissenschaft, Universität Stuttgart  
<sup>2</sup>Institut für Angewandte Bewegungswissenschaften, Technische Universität Chemnitz

**Schlüsselwörter:** motorische Entwicklung, motorisches Lernen, motorische Kontrolle

**Abstract:** Research on motor behavior has a longstanding tradition, with a large number of researchers contributing to a broad and in-depth theoretical understanding. The development of theories mostly occurred in a nonlinear fashion, with rapid growth phases following the publication of important research articles and new theoretical perspectives that have changed the way we conceive motor behavior today. Here, we outline and discuss some of the most innovative and effective theories and developments in the field of motor behavior (divided into its three main branches development, learning, and control) of the past century. In addition, we present early, seminal papers that we consider indispensable when starting to study motor behavior. Looking back should allow us to draw and discuss a direction for the future. The highlighted research topics may (and hopefully will) have an even greater impact on the development of a healthy living environment in the next decades in many areas of society, including sport and movement science, robotics, and various clinical areas.

wie sich die gegenwärtigen Ansätze aus frühen grundlegenden Arbeiten entwickelt haben.

In diesem Beitrag werden bahnbrechende und „geniale“ Forschungsarbeiten der Motorikforschung des letzten Jahrhunderts vorgestellt, in ihren „historischen Rahmen“ eingebettet und diskutiert. Natürlich stellen die vorgestellten Arbeiten nur eine Auswahl da. In Tabelle 1, 2 und 3 werden jedoch auch Strömungen bzw. Arbeiten aufgeführt und eingeordnet, die aufgrund des begrenzten Umfangs eines Zeitschriftenartikels nicht weiter im Text aufgegriffen werden. Ausgewählt wurden empirische Arbeiten, die neue Erklärungsansätze und Sichtweisen auf das motorische Verhalten boten und die sowohl die Theorieentwicklung als auch die Forschungsmethodik und damit die nachfolgende Forschung beeinflusst haben. Zusammen



**Abbildung 1.** Entwicklung der Publikationszahlen zu Themen des motorischen Lernens / der motorischen Kontrolle und der motorischen Entwicklung in der deutschen Sportpsychologie.

geben sie einen Einblick in die motorische Verhaltensforschung, ihre Historie, Bedeutung und ihren Stellenwert. Viele dieser Strömungen kommen aus den USA und Europa. Die deutsche Motorikforschung hat diese aufgegriffen, jedoch nur in begrenztem Umfang auch in u. a. der Zeitschrift für Sportpsychologie wiedergegeben (siehe Abb. 1).

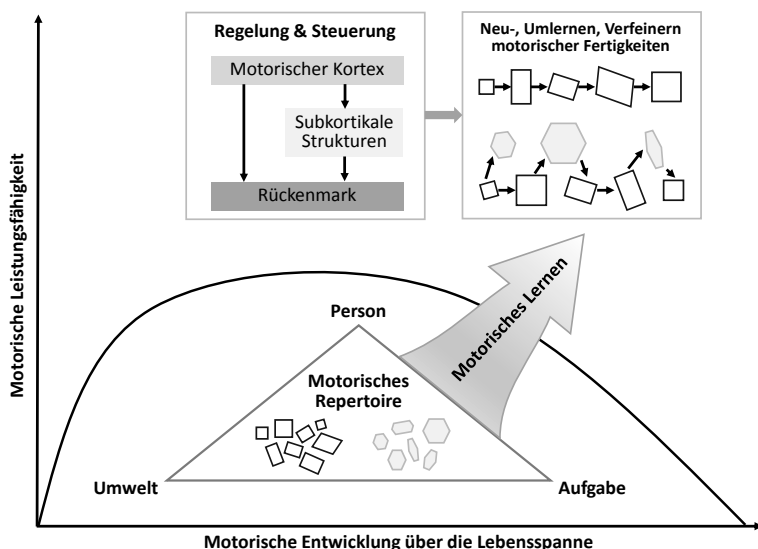
## Entwicklung der Theorien zum motorischen Verhalten: Ein kurzer historischer Überblick

Bewegung ist der einzige Weg mit der Umwelt aktiv zu interagieren. Der Mensch ist vermutlich im Vergleich zu anderen Spezies mit dem leistungsfähigsten motorischen System – insbesondere in Bezug auf die feinmotorische Kontrolle (Manipulation kleiner Gegenstände, Herstellung von Werkzeugen, präzise Wurfbewegung) – ausgestattet. Wir besitzen eine bemerkenswerte Fähigkeit, neue motorische Fertigkeiten, wie beispielsweise das Fahrradfahren oder das Jonglieren, zu erlernen; ebenso bemerkenswert ist, dass wir diese Fertigkeiten über die gesamte Lebensspanne abrufen können. Die Leichtigkeit, mit der wir diese Fertigkeiten ausüben und unsere Bewegungsfähigkeiten nutzen, täuscht über ihre überwältigende Planungs- und Ausführungskomplexität hinweg. Wie also koordinieren sich das zentrale Nervensystem und das muskulo-skelettale System, um Bewegungen mit einer

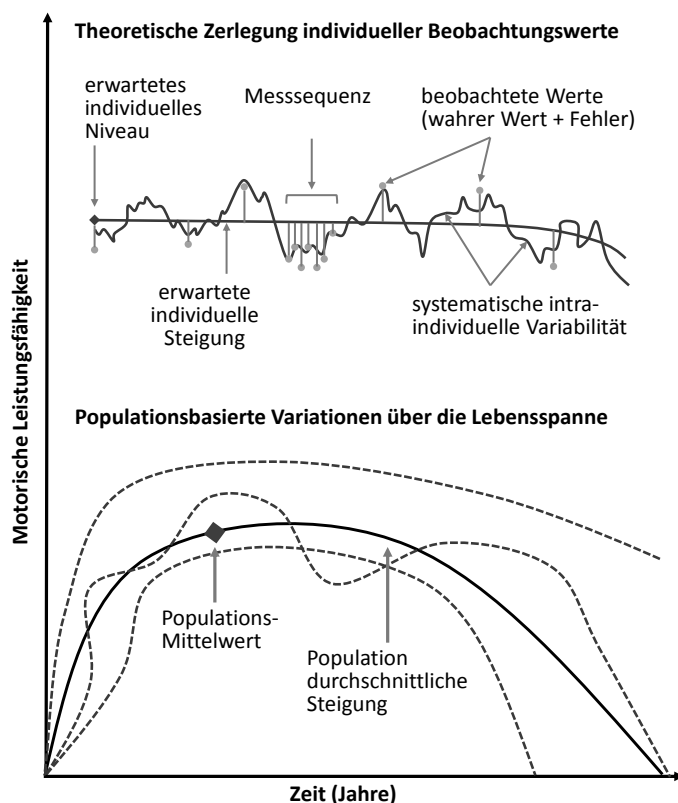
hohen zeitlichen und räumlichen Genauigkeit zu produzieren?

Im letzten Jahrhundert wurde diese Frage – das Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen der Motorik über die Lebensspanne (Ulrich & Reeve, 2005) – überwiegend von Psychologinnen und Psychologen und Physiologinnen und Physiologen bearbeitet, vereinzelt auch von Bewegungswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern. Während in der Psychologie das motorische Verhalten seit den 1950er Jahren kein eigenständiges Forschungsfeld mehr darstellt (bestenfalls beeinflusst durch Theorien zum Gedächtnis und zu exekutiven Funktionen) (Rosenbaum, 2005), kamen in der Physiologie überwiegend Tierexperimente zum Einsatz (Matthews, 2004). Allerdings ist dank bildgebender neurowissenschaftlicher Methoden auch in der Physiologie und Psychologie wieder eine Hinwendung zum motorischen Verhalten zu beobachten (Feldman, 2015; Jeannerod, 2006; Prinz, Beisert & Herwig, 2013).

In der modernen Bewegungswissenschaft lassen sich heute drei Teildisziplinen zum motorischen Verhalten unterscheiden: die motorische Entwicklung, das motorische Lernen und die motorische Kontrolle. Die motorische Entwicklung bezieht sich auf die kontinuierlichen, altersbedingten Veränderungsprozesse unter Berücksichtigung individueller, umwelt- und aufgabenbedingter Restriktionen. Motorisches Lernen wird als übungs- und erfahrungsbedingte dauerhafte Veränderungen motorischer Kontrollprozesse definiert. Studien zur motorischen Kontrolle untersuchen interne Steuerungs- und Regelungsmechanismen, die



**Abbildung 2.** Motorisches Verhalten über die Lebensspanne. Die Entwicklung des motorischen Repertoires beruht auf dem Erlernen aufgabenspezifischer motorischer Sequenzen (motorische Fertigkeiten).



Anmerkungen: Die untere Abbildung zeigt die Zerlegung wiederholter Messungen in Populationsmittelwerte und Populationssteigungen; die obere Abbildung stellt die Variation individueller Abweichungen von Populationsmittelwerten und Populationssteigungen sowie systematische Variationen (in Abhängigkeit von Zeit) im Unterschied zu zufälligen Fehlern dar (mod. nach Hofer & Piccinin, 2010).

**Abbildung 3.** Universelle und individuelle Entwicklungsveränderungen über die Zeit.

das Erzeugen von räumlich-zeitlich präzisen Bewegungen ermöglichen (siehe Abb. 2).

## Motorische Entwicklung

Das Wort „entwickeln“, das aus dem französischen Wort *développer* in der Mitte des 16. Jahrhunderts hervorging, bedeutet in seiner ursprünglichen Form „sich zu entfalten“. Für das System Mensch bedeutet dies, sich über einen gewissen Zeitraum in einen fortgeschrittenen und effektiveren Zustand zu bringen (Adolph & Robinson, 2015; Malina, 2004). Ein inhärenter Bestandteil der Definition von Entwicklung ist die Veränderung. Daher konzentriert sich die Entwicklungsforschung auf den Prozess der Veränderung des menschlichen Systems im Laufe der Zeit, u. a. werden Populationsmuster dieses Wandels, individuelle Unterschiede in Funktion und Veränderungsrate und/oder die individuelle Dynamik über verschiedene Zeitintervalle hinweg untersucht. Neben der Identifizierung von langfristigen Prädiktoren für Veränderung, ist die Frage von Bedeutung, ob die Art der beobachteten Veränderung sich auf den Mittelwert, also den Bevölkerungsdurchschnitt, oder die Variabilität, also die Unterschiedlichkeit zwischen Individuen, konzentriert (siehe Abb. 3, untere Abbildung).

Forschungsfragen zur generellen motorischen Entwicklung beziehen sich auf die durchschnittliche bzw. universelle (stereotype) Entwicklung. Im Unterschied dazu stehen Fragen der Variabilität bei der Betrachtung individueller Unterschiede im Vordergrund (Thelen & Ulrich, 1991). Universalität beschreibt in diesem Zusammenhang genetische, anatomische, physiologische, psychologische und verhaltensbedingte Verläufe von großer Ähnlichkeit in der menschlichen Entwicklung. Beispielsweise durchlaufen Kinder spezifische motorische Meilensteine (Bayley, 1969; Shirley, 1963) und verbessern ihre Leistung in grundlegenden und sportspezifischen Fertigkeiten (Branta, Haubenstricker & Seefeldt, 1984). Im mittleren Erwachsenenalter beobachten wir Phasen der Stabilität, während ältere Erwachsene typischerweise eine Abnahme der motorischen Leistung zeigen (Stichwort entwicklungspsychologische Betrachtung der gesamten Lebensspanne; Baltes, 1987; siehe Abb. 3, untere Grafik). Forschungsfragen zur in-

**Tabelle 1.** Historische Meilensteine in der motorischen Entwicklung

Theorie / Ansatz	Methodologie	Population	Fähigkeiten / Fertigkeiten	Zentrale Publikationen
<b>Frühe Phase (1787 – 1928)</b>				
kein spezifischer theoretischer Ansatz	Biographien von Babys; längsschnittliche Beobachtungen	Kleinkinder	frühe motorische Meilensteine	u.a. Tiedemann, 1787; Darwin, 1877; Shinn, 1900
<b>Reifungstheoretische Phase – biogenetische Theorien (1928 – 1946)</b>				
Veränderungen erfolgen endogen, nach genetisch festgelegtem Muster; äußere Einflüsse werden nicht berücksichtigt	Zwillingsstudien, längsschnittliche Beobachtungen von Entwicklungssequenzen	Kleinkinder	Meilensteine: fein- & großmotorische Fertigkeiten	u.a. Gesell, 1928; Gesell & Thompson, 1934; Shirley, 1931; McGraw, 1935
<b>Normativ-deskriptive Phase (1947 – 1970)</b>				
Fokus auf Outcome statt Prozess	querschnittliche Untersuchungen Film, Produktscores	Kinder	Fein- & großmotorische Fertigkeiten, Fitness	u.a. Asmussen & Heeboll-Nielsen, 1955; Kephart, 1960; Hellebrandt et al., 1961; Espenschade, 1963; Halverson, 1966; Simons et al., 1974; Bös & Mechling, 1983
<b>Systemtheoretische / prozessorientierte Ansätze – interaktionistische Theorien (seit 1960)</b>				
<u>Informationsverarbeitungsansatz (1970 – 1990)</u>				
Veränderungen erfolgen exogen; Umwelteinflüsse und Lernen beeinflussen Entwicklung	experimentell, Lernen, kulturvergleichend	Kinder, Erwachsene, ältere Erwachsene	Einfache Einzelgelenkbewegungen	u.a. Connolly, 1970; Ridenour, 1974; Clark, 1982; Thomas & French, 1985
<u>Phase der ökologischen Ansätze – handlungstheoretisch / dialektisch (seit 1968)</u>				
<i>Bronfenbrenner's ökosystemisches Entwicklungsmodell:</i> Entwicklung als wechselseitiger interaktionistischer Prozess zwischen Individuum sozialer Umwelt	Theoretische Annahmen	Kinder, Jugendliche	Fitness (konditionelle und koordinative Fähigkeiten)	u.a. Bronfenbrenner, 1968; Baur, 1989; Kemper, 1995
<u><i>Baur's dialektische Entwicklungskonzeption:</i> Individuum hat Möglichkeit, biogenetische Vorgaben auszuschöpfen, indem es sich u.a. mit Umwelt auseinandersetzt</u>				
<u>Phase der ökologischen Ansätze – Systemdynamisch/Perception-Action (seit 1960)</u>				
<i>Gibsons Perception-Action-Ansatz:</i> enge und wechselseitige Kopplung von Wahrnehmung, Kognition und Handlung	Experimentelle Modellierung	Kleinkinder, Schulkinder, ältere Erwachsene (& Patienten)	Einfache Einzelgelenkbewegungen, Fein- & großmotorische Fertigkeiten	Gibson & Walk, 1960; Gibson & Pick, 2000; Gibson, J.J. 1979; Kugler et al., 1982; Thelen, 1986; Thelen & Ulrich, 1991; Newell, 1986; Newell et al., 1993; Konczak et al., 1992; Haywood, Williams & VanSant, 1991; Williams, Haywood, & VanSant, 1998
<i>Kugler et al.'s Dynamic System Approach:</i> Entwicklung durch kontinuierliche Interaktion des Organismus mit allen Ebenen der Umwelt; kein angeborenes Wissen				
<i>Newells Constraint Modell:</i> Bewegungsentwicklung basiert auf Interaktion von Constraints (Individuum, Aufgabe, Umwelt)				

**Tabelle 1.** Historische Meilensteine in der motorischen Entwicklung. (Fortsetzung)

Theorie/Ansatz	Methodologie	Population	Fähigkeiten/ Fertigkeiten	Zentrale Publikationen
<b>Phase der entwicklungsorientierten motorischen Kontrolle (~ 1995 – 2005)</b>				
Gehirn, interne Modelle	Neuronale Aktivierung, Adaptation	Lebensspanne (& Patienten)	Fein- & großmotorische Fertigkeiten	Sporns & Edelman, 1993; Hadders-Algra, 2000, 2010
<b>Embodied Cognition (seit ~2000)</b>				
kontinuierliche Interaktion von Motorik & Kognition	Neuro-funktionales Assessment (TMS, fMRI, EEG, fNIRS; wearable sensors), Modellierung: Intervention (Fitness, Dual-Task)	Lebensspanne (& Patienten)	Fein- & großmotorische Fertigkeiten, Fitness	von Hofsten, 2004; Thelen, 2000; Grimpampi et al., 2016; Masci et al., 2012; Bo et al., 2006; Hillman, Kamijo & Scudder, 2011; Adolph & Hoch, 2019; Schott & Klotzbier, 2018
<b>Gesundheits- und Entwicklungsphase (seit 2008)</b>				
Tatsächliche & wahrgenommene motorische Kompetenz	Intervention, Assessment, Identifikation	Kinder, Jugendliche	Fein- & großmotorische Fertigkeiten, Fitness	Stodden et al., 2008; Goodway & Rudisill, 1996, 1997; Robinson et al., 2015

dividuellen Variabilität beschäftigen sich mit Ursachen und Korrelaten der Variabilität, der flexiblen Anpassung an veränderte Bedingungen, einschließlich der Schaffung neuer Lösungen (Deutsch & Newell, 2005; Thelen & Ulrich, 1991). Einzelne Messzeitpunkte können dabei nur eine ungenaue Schätzung der aktuellen motorischen Leistung eines Individuums sein. Allerdings ermöglichen mikrogenetische Designs die detaillierte Erfassung von Prozessen, die Veränderungen hervorrufen. Dabei werden beispielsweise Kinder oder auch ältere Erwachsene häufig innerhalb eines kurzen Zeitraums mit dem Ziel untersucht, eine absehbar auftretende Veränderung kurz bevor und während diese auftritt abzubilden (Abb. 3, obere Grafik; Hofer, Thorvaldsson & Piccinin, 2012).

Miller (2018) beschreibt die Entwicklungsforschung mit einer einfachen Frage: Wie werden die Menschen so, wie sie sind? Diese Fragestellung hat eine Fülle theoretischer Modelle hervorgebracht mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten, die die Mechanismen und /oder Verläufe der motorischen Entwicklung zu beschreiben und erklären versuchen (siehe Tab. 1).

## Frühe Phase (1787 – 1928)

Die Anfänge der (sport-)psychologischen Entwicklungsforschung haben einen klaren Fokus auf die Verhaltensbeobachtung von Babys und Kleinkindern in ihrer natürlichen Umgebung. Die früheste bekannte „Baby-Biographie“ stammt vom deutschen Philosoph Dietrich Tiedemann (1787), der die ersten 2,5 Lebensjahre seines Sohnes beschrieb, gefolgt von Charles Darwin (1877) und den Beobachtungen seines Erstgeborenen Doddy sowie Milicent Shinn (1900), die ihre Nichte Ruth mehr als zwei Jahre lang beobachtete. In diesen frühen Studien beschrieben Forscherinnen und Forscher die Entwicklung von Kindern aus ihrem unmittelbaren Umfeld (u. a. eigene Kinder, Nichten, Neffen). Es entstanden detailgenaue, längsschnittliche Beschreibungen über den motorischen Fortschritt während der Kindheit. Die Entwicklungsforschung bis in die 1950er Jahre kann auch als das goldene Zeitalter der längsschnittlichen Designs bezeichnet werden.

## Reifungstheoretische Phase (1928 – 1946)

Ziel der Entwicklungsforschung des 20. Jahrhunderts war (zunächst), die beobachtbaren Veränderungen während der motorischen Entwicklung (vor allem) im Kindesalter besser und detaillierter zu beschreiben, und zu verstehen wie diese Entwicklungsveränderungen durch die funktionalen und strukturellen Veränderungen des Gehirns hervorgerufen werden. So bestimmten zu Beginn des vergangenen Jahr-



hundreds Vertreter der sogenannten *Reifungstheorien* bzw. im deutschsprachigen Raum des endogenistischen Ansatzes das entwicklungsorientierte Denken (z.B. „Infancy and Human Growth“, Gesell, 1928; Gesell & Thompson, 1934; Shirley, 1931; prominentester deutscher Vertreter Heinz Rempelin, 1950). Diese Theorien betrachteten die motorische Entwicklung grundsätzlich als angeboren und erblich; demnach geschieht sie nach einem festen inneren Bauplan und beruht auf der neuronalen Reifung des Kortex. Umwelteinflüsse können Entwicklung bestenfalls anstoßen, jedoch ihren Verlauf nicht beeinflussen. Arnold Gesell hat diesen Ansatz konsequent in seinem Labor an der Yale University in einem umfassenden Entwicklungsatlas umgesetzt. Beispielsweise identifizierte er 22 hierarchische Entwicklungsstufen beim Krabbeln, beginnend mit dem Heben des Kopfes in Bauchlage bis hin zum Vierfüßlergang (Gesell, 1928). Mary Shirley (1931) erstellte eine ebenso differenzierte Abfolge von motorischen Entwicklungssequenzen: (1) passive posturale Kontrolle, (2) posturale Kontrolle des gesamten Oberkörpers, (3) aktive Lokomotionsbewegungen, (4) Krabbeln, und (5) koordiniertes Laufen. Diese Entwicklungssequenzen und deren scheinbare Unabhängigkeit von Umweltbedingungen galten für Vertreter des Reifungsansatzes als Beispiel par excellence; jedoch zeigen interindividuelle und kulturelle Vergleiche erhebliche Unterschiede in der zeitlichen und inhaltlichen Abfolge der Bewegungsmuster (Karasik, Adolph, Tamis-LeMonda & Bornstein, 2010). Eine weitere wichtige Wissenschaftlerin dieser Ära war Myrtle McGraw (Neurologisches Institut, Columbia Universität). Obwohl McGraw (1935) von der Untrennbarkeit von genetischer Anlage (neuronale Reifung) und Umwelt (z.B. Einflüsse aus der Familie, Lernanreize) für die Entwicklung überzeugt war, entwarf sie ihre Studie über die vermeintlich eineiigen Zwillinge Jimmy und Johnny, um der Frage nachzugehen, welche der frühen motorischen Fertigkeiten trainiert werden könnten und welche sich eher durch ein festgelegtes Entwicklungsdesign entwickeln. Ein Zwilling, Johnny, wurde täglich in einer Vielzahl von grundlegenden (Sitzen, Gehen) als auch sportspezifischen Fertigkeiten (Schwimmen, Rollschuhlaufen) trainiert. McGraw zeigte, dass, obwohl es einige Auswirkungen auf die Qualität und die Anfangsleistung von Johnnys Bewegungen gab, auf lange Sicht ein intensives Training zu keinem großen Unterschied führte. Diese Ergebnisse wurden von der damaligen Presse als Beleg dafür aufgefasst, dass das Lernvermögen letztlich genetisch gesteuert sei und eine frühe Förderung keinen Vorteil bringe.

### Normativ-deskriptive Phase (1947 – 1970)

Im Vergleich zur vorherigen reifungstheoretischen Phase lag der Schwerpunkt in der dann folgenden *normativ/de-*

*skriptiven Phase* Mitte des 20. Jahrhunderts auf der Beschreibung der grundlegenden motorischen Fertigkeiten von Kindern, vor allem von Kindern im schulpflichtigen Alter. Das verwendete Design war in der Regel ein querschnittliches. Entwicklungssequenzen (u.a. Werfen, Fangen, Springen) wurden auf die gleiche Art und Weise wie die motorischen Meilensteine beschrieben, jedoch mit deutlich biomechanischen Einfluss (Halverson, 1966; Hellebrandt, Rarick, Glassow & Carns, 1961). Neben der qualitativen Beschreibung (Entwicklungsprozess) wurden altersbedingte Veränderungen quantitativer Parameter (u.a. Weite, Schnelligkeit) erhoben (Louvain-Leuven Boys Growth Study: Simons, Beunen & Renson, 1974; Bös & Mechling, 1983; Amsterdam Growth Study: Kemper, 1995). Weiterhin gab es ein zunehmendes Interesse an den physiologischen Veränderungen, die bei Kindern während ihres Wachstums und ihrer Entwicklung auftraten, insbesondere im Zusammenhang mit der körperlichen Fitness (und der Pubertät) (Espenschade, 1963).

### Phase der systemtheoretischen / prozessorientierten Ansätze – interaktionistische Theorien (seit 1960)

Ab den 1960er Jahren gab es eine Wende zu prozessorientierten/systemischen Ansätzen mit dem Informationsverarbeitungsansatz sowie den ökologischen Ansätzen. Letztere werden von Willimczik (2008) unterteilt in konstruktivistische und handlungstheoretische einerseits, und systemdynamische Ansätze sowie den Perception-Action-Ansatz andererseits. Auf eine vertiefende Darstellung der konstruktivistischen und handlungstheoretischen Ansätze (Urie Bronfenbrenner's ökosystemisches Entwicklungsmodell; Jürgen Baur's dialektische Entwicklungskonzeptionen) soll an dieser Stelle verzichtet werden, da diese einer empirischen Überprüfung bisher kaum unterzogen wurden (Willimczik, 2008; Amsterdam Growth Study: Kemper, 1995).

Die *Phase des Informationsverarbeitungs-Ansatzes* war eine Zeit des erneuten Interesses an der motorischen Entwicklung, nicht nur in Bezug auf den Sport in der Schule, sondern auch wieder in der Entwicklungspsychologie. Das Interesse konzentrierte sich auf zugrundeliegende Entwicklungsprozesse. Forscherinnen und Forscher versuchten, Veränderungen im Säuglings- und Kleinkindverhalten durch hypothetische Prozesse im Informationsverarbeitungsansatz zu erklären (u.a. Wahrnehmung, Antwortauswahl, Gedächtnis, Aufmerksamkeit). Diese Prozesse basierten darauf, wie ein Computer Informationen verarbeiten würde (Mensch-Computer-Analogie). Es ist unbestritten, dass Fortschritte in den Bereichen der Computertechnologie, Informatik und künstlichen Intelligenz (KI)

seit den 1950er/60er Jahren eng an die Entwicklung des Informationsverarbeitungsansatzes in der Kognitiven Psychologie (Computermetapher) gebunden sind. So wird der informationstheoretische Ansatz als Meilenstein der modernen kognitiven Psychologie bezeichnet und kognitive Leistung als Ergebnis von Informationsverarbeitungsprozessen konzeptualisiert (Prinz & Müsseler, 2002). Da Computer „programmiert“ werden, war es nicht weiter verwunderlich, dass motorische Fertigkeiten als Ergebnis von „motorischen Programmen“ angesehen wurden (Keele & Summers, 1976; Schmidt, 1975). Methodisch unterschieden sich die Experimente in dieser Zeit in zweierlei Hinsicht von früheren experimentellen Designs. Während das querschnittliche Design erhalten blieb, war Alter nicht mehr die zentrale unabhängige Variable. Da die Beschreibung von Unterschieden über verschiedene Altersgruppen hinweg keine Rückschlüsse darauf zuließ, wie sich die zugrundeliegenden Prozesse tatsächlich ändern könnten richtete sich der Fokus nun auf die Interaktion von Alter und Bedingung (z. B. kompatibler vs. inkompatibler Stimulus). Ein typisches abhängiges Maß war die Zeit, z. B. die Reaktionszeit (RT), die den Effekt verschiedener experimenteller Manipulationen auf Informationsverarbeitungsprozesse mit meist einfachen „Einzelgelenkbewegungen“ (z. B. Tastendruck) darstellen sollte (Stratton & Connolly, 1973). Beispielsweise entschied sich Jane Clark (1982) in einem Experiment zur Antwortselektion nicht nur drei Altersgruppen (Kindergartenkinder, Grundschüler, Erwachsene), sondern auch zwei verschiedene Stimulusbedingungen (kompatibel und inkompatibel) zu untersuchen, wobei die Probanden schnellstmöglich mit einem Tastendruck auf ein Lichtsignal reagieren mussten. Die entsprechenden RTs zeigten, wie lange es für jede Altersgruppe gedauert hat, die Bewegung unter der geforderten Stimulusbedingung zu planen und auszuführen. Wenn sich das statistische Ergebnis nur auf die Haupteffekte von Alter und Bedingung konzentriert hätte, hätte Clark (1982) nur ableiten können, dass Erwachsene schneller waren als ältere Kinder, die bei der Planung dieser Bewegung schneller waren als jüngere Kinder, und dass eine Bedingung (kompatibel) signifikant schneller war als die andere (inkompatibel). In dieser Studie fand die Wissenschaftlerin jedoch einen Interaktionseffekt, bei dem der Unterschied zwischen dem leichten und dem schweren Stimulus bei den jüngeren Kindern viel größer war als bei den älteren Kindern und noch geringer bei den Erwachsenen. Die Interaktion sagt uns, dass es altersbedingte Unterschiede in den zugrundeliegenden Antwortselektionsmechanismen gibt, was bedeutet, dass sich dieser Kontrollmechanismus ändert und daher für einige der offensichtlichen Verhaltensänderungen während der Entwicklung verantwortlich sein kann. Obwohl nicht alle Wissenschaftler dieser Ära den Informationsverarbeitungs-Ansatz für die Erfor-

schung der motorischen Entwicklung als wichtig einstufen, wurde der allgemeine theoretische Rahmen als interaktionistisch und nicht reifungstheoretisch anerkannt und untersucht (Clark & Whittall, 1989). Ein Vermächtnis dieser Zeit ist der Fokus auf zugrundeliegende kognitive Prozesse wie Wahrnehmung, Entscheidungsfindung, Aufmerksamkeit und Erinnerung.

Der Informationsverarbeitungs-Ansatz zur Erforschung der motorischen Entwicklung wurde in den frühen 1980er Jahren durch Peter Kugler, J. A. Scott Kelso und Michael Turvey mit einem neuen Ansatz in Frage gestellt – *der dynamischen Systemtheorie* (Kugler, Kelso & Turvey, 1980, 1982). Kugler und Kollegen erweitern den Ansatz von Nicolai Bernstein (1967) zur Kontrolle der Freiheitsgrade („Degrees of Freedom“; siehe weitere Ausführungen im Abschnitt Motorische Kontrolle und Motorisches Lernen) durch das zentrale Nervensystem (ZNS) um die Komponenten der Selbstorganisationsfähigkeit des ZNS, der Stabilisierung und Destabilisierung von Attraktoren (Muster bzw. geordnete Zustände, die zur Bewältigung alltäglicher Bewegungsanforderungen benötigt werden) sowie der Phasenverschiebung als Ursache neuer Bewegung. Darüber hinaus integrierten Kelso und Kollegen den „ökologischen“ Ansatz von James J. Gibson (1969) und Eleanor Gibson (Gibson & Walk, 1960), die eine direkte Verbindung von Wahrnehmung und Handlung (Perception-Action-Ansatz) annahmen. Die wechselseitige Abhängigkeit dieser Entwicklungsbereiche lässt sich anhand einer Reihe von Experimenten von Eleanor Gibson und ihrer Schüler zeigen (siehe Kasten; Adolph, 1997; 2000; Adolph & Robinson, 2013; Gibson & Walk, 1960; Clark et al., in press).

#### Kategorie: Perception and Action

Gibson, E. J. & Walk, R. D. (1960). The “visual cliff”. *Scientific American*, 202 (4), 64 – 71.

**Hintergrund:** In den frühen 1960 Jahren führten Eleanor Gibson und Richard Walk die Idee ein, dass bedeutungsvolle Wahrnehmung zu Handlungen führt, dass die Umwelt Handlungen anbietet bzw. ermöglicht (Stichwort Affordanz; Gibson, 1979) und dass Wahrnehmungslernen ein Prozess der fortschreitenden Differenzierung und Bereicherung ist. In ihrer klassischen Studie stellten Gibson und Walk (1960) eine fundamentale Frage zur Wahrnehmung und implizit zum Handeln: Sind unsere Wahrnehmungen angeboren oder erlernt? Wäre Wahrnehmung ohne das implizite Wissen sensomotorischer Information aus selbst erzeugten Bewegungen möglich? Um dieser Frage nachzugehen, untersuchten Gibson und Walk mit einer Anordnung, die die Illusion eines Abgrundes erzeugen sollte, den Zusammenhang von Wahrnehmung (hier Tiefenwahrnehmung) und motorischer

Geschicklichkeit (hier Krabbeln) bei Kleinkindern.

**Methode:** Sechsendreißig Säuglinge im Alter von 6 bis 14 Monaten, die gerade mit dem Krabbeln begonnen hatten, wurden mit der visuellen Klippe konfrontiert. Die Säuglinge wurden hierzu auf einer horizontalen, transparenten Glasplatte platziert, stabil genug, um ein darauf platziertes Baby zu halten. Die Vorrichtung wurde durch einen Steg in zwei Teile geteilt. Ein Tuch mit einem Schachbrettmuster, das sich knapp unter der Glasplatte befand, lies es wie eine feste, sichere Fläche aussehen. Unter der anderen Hälfte befand sich ein identisches Schachbrettmuster, allerdings einen knappen Meter tiefer – sodass für ein Baby mit Tiefenwahrnehmung der Eindruck eines Abgrundes entstand.

**Ergebnisse und Diskussion:** Siebenundzwanzig der 36 Babys bewegten sich furchtlos auf der „hohen“ Seite der Klippe, bis auf 3 Kleinkinder überquerten sie jedoch nicht den „tiefen“ Teil, selbst wenn sie von ihren Müttern mit einem bunten Rad auf die andere Seite gelockt wurden. Die Autoren nahmen an, dass die Vermeidung der visuellen Klippe durch die Babys sowohl eine evolutionäre Anpassung war, die zu Vorsicht und Ängstlichkeit führte, als auch einen Lernprozess über ihre Umwelt durch Handlung darstellte. In anschließenden Studien wurde eine reifungsbasierte Erklärung gewählt, wobei Alter (Walk, 1966) oder das Alter der ersten Krabbelbewegungen (Richards & Rader, 1981) als die wichtigsten Prädiktoren des Vermeidungsverhaltens angenommen wurden. Neuere Studien favorisieren eine Lernhypothese (Kretch & Adolph, 2013); diese zeigen, dass trotz schneller Verbesserung der Wahrnehmung der sich notwendigerweise ändernden Affordanzen (siehe auch Abschnitt motorische Kontrolle), das Lernen einer motorischen Fertigkeit (Krabbeln) nicht notwendigerweise zum Erlernen einer anderen Fertigkeit (Gehen) führt. Säuglinge nehmen jede neue Körperhaltung als ein anderes, neues Problem im Raum wahr, dass durch eine einzigartige Kombination von Parametern zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts definiert wird (Adolph & Franchak, 2017). Somit sind die Wahrnehmung von Affordanzen und die motorische Entwicklung von Säuglingen eng miteinander verknüpft.

**Auswirkungen auf die weitere Forschung:** Das Visual-Cliff-Experiment ist eines der frühen, wegweisenden, robusten und häufig zitierten Arbeiten [1.112 Zitate, Januar 2019, Google Scholar] mit einprägsamen Bildern, einem einfachen und eleganten Design sowie wissenschaftlicher Relevanz (Adolph & Kretch, 2012). Eleanor Gibson entwickelte zusammen mit ihrem Ehemann James Gibson einige der wichtigsten theoretischen Arbeiten zur ökologischen Wahrnehmung und zum Lernen im 20. Jahrhundert. In vielerlei Hinsicht führte der An-

satz der ökologischen Psychologie zu Wahrnehmung und Handlung zum Ansatz der Embodied Cognition, der eine starke Verbindung zwischen motorischer und kognitiver Entwicklung annimmt (Needham & Libertus, 2011; für eine ausführliche Diskussion siehe Lobo, Heras-Escribano & Travieso, 2018; Zona, Raab & Fischer, 2018). Im Laufe der motorischen Entwicklung wird das sich entwickelnde System immer wieder „gestört“; dadurch werden neue sensomotorische Strukturen erzeugt und wahrgenommen, und bereiten so die Bühne für die Entwicklung kognitiver Fähigkeiten (höherer Ordnung) vor (Gibson & Pick, 2000; Thelen & Smith, 1994).

Eine Reihe von weiteren Studien zum Perception-Action-Ansatz stammen von Karl Newell, der zeigte, dass sowohl Säuglinge (Newell, McDonald & Baillargeon, 1993) als auch Kinder (Cesari & Newell, 2000) eine ähnliche Anpassung von Greifkonfigurationen auf Objektgrößen wie Erwachsene erkennen lassen. Wieder andere Untersuchungen befassten sich mit dem Zusammenhang zwischen dem Krabbeln oder Gehen von Säuglingen sowie Umwelteinflüssen wie Steigungen (Adolph, 1997), Hindernissen (Stoffregen, Schmuckler & Gibson, 1987) oder Veränderungen in den Körpermaßen (Adolph & Avolio, 2000). Ein weiterer Untersuchungsaspekt bestand darin, die Probanden zu fragen, ob sie das Verhältnis zwischen ihren individuellen Fähigkeiten und einer bestimmten Zusammenstellung von Umweltbedingungen abschätzen können. Die erste, klassische Studie über die Wahrnehmung von Affordanzen biomechanischer, körperbezogener Merkmale wurde bei Erwachsenen durchgeführt (Warren, 1984). In dieser Studie wurden die Probanden gebeten, Bilder von unterschiedlichen Treppen dahingehend zu beurteilen, ob sie diese als besteigbar oder unbeesteigbar wahrnehmen. Erwachsene waren sehr präzise in der Wahrnehmung ihres Handlungsvermögens; ihr Urteil konnte durch ein einfaches Modell der Beinlänge im Verhältnis zur Steighöhe vorhergesagt werden. In einer Folgestudie wiederholten Jürgen Konczak und Kollegen (1992) das Experiment mit älteren Erwachsenen und fanden heraus, dass die wahrgenommene kritische Schwelle zur Bewältigung der Stufen für die älteren Erwachsenen zwar zutreffend, aber durch ein komplexeres Modell als für jüngere Erwachsene vorhergesagt wurde, dass die Kraft der unteren Extremitäten und die Flexibilität beinhaltete (Konczak, Meeuwse & Cress, 1992).

Die Neukonzeption der Erklärungen zur Steuerung und Entwicklung des motorischen Verhaltens durch Kugler et al. (1980, 1982), Newell (1986; Interaktion von Individuums-, Umwelt- und Aufgaben-Constraints) sowie Thelen (1986; „rate-limiting“ constraints) führte zu



grundlegend unterschiedlichen Herangehensweisen in Untersuchungen zur motorischen Entwicklung. Damit standen nun Modelle und Methoden zur Verfügung, mit denen qualitative (non-lineare) Veränderungen, insbesondere während Übergangsphasen von einer zur nächsten Entwicklungsstufe, analysiert werden konnten. Die bedeutendste Forscherin dieser Zeit war sicherlich Esther Thelen, die über zwei Jahrzehnte lang Säuglinge und Kleinkinder untersuchte. In ihren frühen Arbeiten in den späten 1970er Jahren konzentrierte sich Thelen auf kindliche „rhythmische Stereotypen“, unspezifische motorische Reaktionen wie Kick- oder Armbewegungen in Reaktion auf eine Vielzahl von auslösenden Reizen (Thelen, 1979, 1981a, 1981b; Thelen, Bradshaw & Ward, 1981). Es war jedoch 1982 die Arbeit von Thelen und ihrer Kollegin Donna M. Fisher über die rhythmischen Beinbewegungen von Säuglingen sowie weitere Folgestudien (Thelen & Fisher, 1982, 1983; Thelen, Fisher, Ridley-Johnson & Griffin, 1982; Thelen & Ulrich, 1991), die den neuronalen Reifungs-Ansatz für die motorische Entwicklung von Kleinkindern in Frage stellten (siehe Kasten, siehe auch Clark et al., in press).

#### Kategorie: Dynamical Systems

Thelen, E. & Fisher, D. M. (1982). Newborn stepping: An explanation for a "disappearing" reflex. *Developmental Psychology*, 18 (5), 760 – 775.

**Hintergrund:** Thelen und Fisher stellten die Frage, ob Strampelbewegungen und Schritte von Neugeborenen voneinander abwichen oder sie tatsächlich isomorph waren. Das Paradoxe war, dass zwar während der frühen Kindheit die Frequenz des rhythmischen Strampelns zunimmt, der Schreitreflex jedoch in den ersten Lebensmonaten wieder verschwindet. Dieser lässt sich auslösen, indem man ein Neugeborenes so hält, dass seine Füße eine Unterlage berühren. Der Säugling hebt reflexartig erst das eine und dann das andere Bein wie beim Gehen an. Dies veranlasste einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zu der Annahme, dass das Gehen fest als Programm im zentralen Nervensystem verankert sei (Adolph & Franchak, 2017). Thelen und Fisher vermuteten jedoch mechanische Ursachen für das Verschwinden des Schreitreflexes.

**Methode:** Die beiden Wissenschaftlerinnen untersuchten mithilfe einer Bild-für-Bild-Videoanalyse in Kombination mit Elektromyographie (EMG) von vier Muskelgruppen in den Beinen das Strampel- und Schreitverhalten bei acht normal entwickelten Säuglingen im Alter von 5 bis 14 Tagen.

**Ergebnisse und Diskussion:** Anders als der Schreitreflex bleibt das Strampeln über die frühe Kindheit hindurch erhalten (Adolph & Franchak, 2017). Thelen und

Fisher argumentierten, dass mechanische Faktoren und nicht das zentrale Nervensystem für die U-förmige Trajektorie für das Schreiten in aufrechter Position verantwortlich ist. In den ersten Lebensmonaten übertrifft die Zunahme des Fettgewebes an den Beinen typischerweise die Zunahmen in der Muskelkraft. Alternierende Beinbewegungen verschwinden in aufrechter Position, aber nicht in Rückenlage aufgrund der unterschiedlichen Auswirkungen der Schwerkraft. Säuglinge müssen, während sie mit den Füßen auf einer festen Oberfläche aufrecht gehalten werden, ihr Körpergewicht teilweise stützen und gegen die Schwerkraft arbeiten, um ihre Hüfte und ihr Knie zu beugen. Im Liegen haben Säuglinge diese zusätzliche Last nicht, die Schwerkraft unterstützt sogar die Hüftbeugung, indem sie den gebeugten Oberschenkel zur Brust zieht. Im Alter von ca. 8 Monaten haben Säuglinge dann genügend Muskelkraft, um ihre schweren Beine in aufrechter Position anzuheben. In Übereinstimmung mit Thelens und Fishers körperbasierter Argumentation zeigen Säuglinge mit dünneren und damit leichteren Beinen weiterhin aufrechte Schrittbewegungen, wenn Säuglinge mit dickeren/schwereren Beinen den Schreitreflex bereits nicht mehr zeigen. In einem nachfolgenden Experiment bestätigten die Autoren empirisch ihre Hypothese, indem sie an den Knöcheln von Säuglingen, deren Schreitreflex noch vorhanden war, Gewichte anbrachten, was das Verschwinden des Schreitreflexes zur Folge hatte. Wurden diese Kinder jedoch geringerer Schwerkraft im Wasser ausgesetzt, begannen die Babys wieder zu schreiten (Thelen, Fisher & Ridley-Johnson, 1984).

**Auswirkungen auf die weitere Forschung:** Der Einfluss der Studie von Thelen und Fisher sollte nicht unterschätzt werden: Während die Publikation selbst „nur“ 365-mal [Januar 2019, Google Scholar] zitiert wurde, trat ein Schneeballeffekt der Zitation auf: Von den zitierenden Artikeln wurden beispielsweise 11 Artikel 500-mal und weitere 41 Artikel 100-mal oder öfter zitiert. Diese Kettenreaktion nachfolgender Zitate spiegelt den Beginn einer neuen theoretischen Orientierung wider, die von der Studie von Thelen und Fisher ausging und das Studium der motorischen Entwicklung von Kleinkindern sowie der motorischen Entwicklung über die gesamte Lebensspanne hinweg neu belebt hat.

Die Studie von Thelen und Fisher stellte einen Wendepunkt in der Forschung zur motorischen Entwicklung dar. Sie verwendeten biomechanische Methoden, um das motorische Verhalten von Säuglingen zu beobachten. Jedoch studierten sie die Säuglinge in ihrer natürlichen Umgebung, um zwei vermeintlich unterschied-

liche Handlungen – Strampeln und Gehen – zu vergleichen. Ihre Schlussfolgerung war, dass das neugeborene Strampeln sowie das Gehen Manifestationen der gleichen Bewegung waren. Tatsächlich lassen sich für Strampelbewegungen die gleichen Muster für Muskelaktivierungen sowie zeitlich-räumliche Trajektorien finden wie für das aufrechte Gehen. Im selben Jahr veröffentlichten Kugler, Kelso und Turvey (1982) ihre Idee des nichtlinearen dynamischen Systemansatzes zur Erklärung motorischen Verhaltens, und Thelen und Fishers Arbeit lieferten ein empirisches Beispiel für dieses neu aufkommende Paradigma für die motorische Entwicklung (s.u. für motorische Kontrolle).

Im Jahr 2000 veröffentlichte Esther Thelen im *International Journal of Behavioral Development* einen Aufsatz mit dem Titel „Motor development as foundation and future of developmental psychology“. Eine zentrale Aussage des Beitrages ist, dass das Verständnis der motorischen Entwicklung für das Verständnis der Entwicklung als Ganzes entscheidend ist. Wie sie während ihrer gesamten Karriere theoretisch und empirisch überzeugend argumentierte, besteht eine Wechselwirkung zwischen Körper (Motorik) und Geist (Kognition). Somit muss die Forschung zur motorischen Entwicklung den Fokus auf die Interaktion aller Teilsysteme lenken. Sie erstellte eine Agenda für die zukünftige Motorikforschung, die unter anderem die neuronalen Grundlagen der Entwicklung motorischer Fertigkeiten, Embodied Cognition, Kognition und Entwicklung motorischer Fertigkeiten sowie die Neuroplastizität in der Kindheit bis hin zum Seniorenalter umfassen sollte. Mit ihren Ausführungen läutete Thelen zwei neue Perioden in der motorischen Entwicklung ein, die als die Phase der *entwicklungsorientierten motorischen Kontrolle* sowie des *Embodied Cognition* (für eine ausführliche Diskussion der historischen und domain-spezifischen Aspekte siehe Wilson & Foglia, 2017) beschrieben werden können.

### **Phase der entwicklungsorientierten motorischen Kontrolle (~1995 – 2005), Embodied Cognition (~seit 2000) sowie Gesundheits- und Entwicklungsphase (seit 2008)**

Um die Jahrtausendwende traten weitere komplementäre und parallele Trends auf, die nicht unbedingt einem theoretischen Ansatz wie der dynamischen Systemtheorie folgen und auch nicht exklusiv die motorische Entwicklung

im Blick haben. Diese Trends beruhen zum einen auf dem erneuten Interesse an der Bearbeitung motorischer Fragestellungen mit neurowissenschaftlichen Methoden (Phase der entwicklungsorientierten motorischen Kontrolle), zum anderen auf der zu Beginn des neuen Jahrhunderts wachsenden Erkenntnis, dass die Folgen körperlicher Inaktivität uns töten könnte (Phase der entwicklungsbezogenen Public Health Forschung) „Sitzen ist das neue Rauchen“ – mit anderen Worten, unser sitzender Lebensstil führt zu einem vorzeitigen Tod und zwar in der gleichen Geschwindigkeit wie das Rauchen (Clark, 2017). Ein dritter erkennbarer Trend in dieser Periode ist der Embodied Cognition-Ansatz mit einem Fokus auf dem Zusammenhang von motorischer Fertigkeitentwicklung, körperlich-sportlicher Aktivität mit der kognitiven Entwicklung und der schulischen Leistungsfähigkeit. Letzterer soll an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden; vielmehr sei auf die zahlreichen Überblicksarbeiten verwiesen (de Greeff, Bosker, Oosterlaan, Visscher & Hartman, 2018; Loeffler, Raab, & Cañal-Bruland, 2016; Zeng, Ayyub, Sun, Wen, Xiang & Gao, 2017).

Die *Phase der entwicklungsorientierten motorischen Kontrolle* richtet ihren Blick auf zugrundeliegende neuronale Mechanismen in Bezug auf die selbstorganisierenden Eigenschaften von sich entwickelnden und reifenden motorischen Systemen. Der rasante technische Fortschritt in der Erhebung neuronaler Korrelate (d.h. fMRI, EEG, fNIRS) unter Verwendung ausgefeilter analytischer Verfahren, u.a. durch künstliche neuronale Netzwerke, Machine- und Deep Learning (Bassett & Mattar, 2017; Marrus et al., 2018; Morita, Asada & Naito, 2016; Wu, Sharma & Blumenstein, 2017), lässt nun aber genau dies zu (Brown-Lum & Zwicker, 2015; Marrus et al., 2018). Stellvertretend für diese *Phase der entwicklungsorientierten motorischen Kontrolle* sei die Neuronal Group Selection Theory (Hadders-Algra, 2000, 2010; Sporns & Edelman, 1993) erwähnt, die die motorische Entwicklung als einen nicht-linearen Prozess mit verschiedenen Übergangsphasen beschreibt: 1) primäre Variabilität (pränatal bis etwa 6 Monate postnatal; motorisches Verhalten, das sich selbst generiert und nicht mit äußeren Bedingungen abgestimmt wird); 2) sekundäre Variabilität (6–24 Monate; Selektion von Neuronenverbänden, die für eine zielgerichtete Aktivität das effektivste Handlungsmuster produzieren), und 3) adaptive Variabilität (ab 2 Jahren; Anpassung des motorischen Verhaltens an spezifische Situationen). Die Annahme ist, dass in den frühen Entwicklungsstadien die neuronalen Schaltungen nicht präzise „verdrahtet“ sind, um bestimmte Fertigkeiten auszuführen, sondern das Gehirn Variantenschaltungen (strukturelle Variabilität) mit dynamischen Eigenschaften enthält. Das heißt, diese Schaltkreise bilden selektiv neuronale Gruppen, die die Organisation von Synergien im Gehirn als funktionale Ein-

heiten der Bewegungssteuerung (koordinative Strukturen) berücksichtigen. Einer der Vorzüge dieses Ansatzes ist es, dass die spontane Anpassungsfähigkeit der koordinativen Struktur als Reaktion auf biomechanische und ökologische Veränderungen berücksichtigt wird. Genetische Faktoren spielten bei der dynamischen Systemtheorie nur eine begrenzte Rolle, während nun bei der Neuronal Group Selection Theory genetische Informationen, epigenetische Kaskaden<sup>1</sup> und Erfahrung eine gleichermaßen wichtige Rolle für die motorische Entwicklung spielen. Sie lässt sich damit als interaktionistischer Ansatz verstehen (Hadders-Algra, 2000, 2010).

Die Phase der entwicklungsbezogenen Public Health Forschung begann mit Wissenschaftlerinnen wie Jacqueline Goodway und Mary Rudisill, die den Zusammenhang zwischen wahrgenommener und tatsächlicher motorischer Kompetenz in den Fokus nahmen (Goodway & Rudisill, 1996, 1997), wobei ihr Anliegen hauptsächlich auf die Gestaltung geeigneter Interventionen zur Förderung motorischer Fertigkeiten ausgelegt war (Branta & Goodway, 1996; Hamilton, Goodway & Haubenstricker, 1999). Ein deutlicher Schub dieser Forschungsrichtung wurde durch die Veröffentlichung des Artikels *A developmental perspective on the role of motor skill competence in physical activity: an emergent relationship* (Stodden et al., 2008) eingeleitet, der die Interaktion von körperlich-sportlicher Aktivität, motorischer Kompetenz und Gesundheit (Körperkonstitution) hervorhebt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wie auch politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger haben erhebliche Anstrengungen unternommen, um die Teilnahme an körperlich-sportlicher Aktivität aufgrund des zunehmenden Übergewichts und dessen negativer gesundheitlicher Folgen zu erhöhen. Vor 2008 wurden körperliche Aktivität und ihre Determinanten hauptsächlich aus psychosozialer Sicht untersucht (Harter, 1999; Weiss & Ferrer-Caja, 2002). Obwohl diese Rahmenmodelle ein besseres Verständnis von körperlicher Aktivität ermöglicht haben, haben sie die Rolle der motorischen Entwicklung darin nicht ausreichend berücksichtigt. David Stodden und Kollegen (Stodden et al., 2008; späteres Update von Robinson et al., 2015) schlugen ein Modell vor, das die positive als auch negative Spirale von körperlich-sportlicher Aktivität bzw. Inaktivität aufzeigte. Die Autoren nehmen an, dass Kinder mit einer höheren tatsächlichen motorischen Kompetenz ein höheres Maß an wahrgenommener motorischer Kompetenz haben und somit eher aktiv sind, was wiederum ihr Risiko für Übergewicht und Fettleibigkeit verringert.

## Motorische Kontrolle und Motorisches Lernen

Eine strikte Trennung der Teilgebiete Motorische Entwicklung, Motorische Kontrolle und Motorisches Lernen ist sehr schwierig; dies gilt insbesondere für die Trennung von Kontrolle und Lernen. Viele der Konzepte wurden nicht ausschließlich für die Anwendung in dem einen oder anderen Bereich entwickelt. Vielmehr ist es oft notwendig, die Anwendbarkeit der verschiedenen Theorien in beiden Bereichen zu überprüfen, beziehungsweise ergeben sich aus bestimmten Sichtweisen zur Motorischen Kontrolle gleichzeitig auch grundlegende Annahmen zum Motorischen Lernen. Nicht umsonst finden sich häufig dieselben Autorinnen und Autoren in der grundlagentheoretischen Beschreibung und experimentellen Überprüfung bestimmter Konzepte zu Kontrolle und Lernen von Bewegungen, wenn diese denselben übergeordneten Theoriebezug haben. So führte der US-Psychologe Paul Fitts (1954) beispielsweise wegweisende empirische Untersuchungen zur Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit des motorischen Systems durch. Etwa ein Jahrzehnt später entwickelte Fitts mit seinem Kollegen Michael Posner (Fitts & Posner, 1967) ein Stufenmodell des motorischen Lernens, das dementsprechend einen starken Bezug zur Informationsverarbeitung hat und Lernprozesse in i) kognitive, ii) assoziative und iii) autonome Phasen gliedert. Ebenso finden sich auch in vielen grundlagentheoretischen Arbeiten zum motorischen Lernen, beispielsweise in denen von Jack A. Adams (1971) oder Richard A. Schmidt (1975), gleichzeitig Erklärungsansätze zur Kontrolle von Bewegungen, da die Betrachtungsweise der Lernprozesse auch stark von den Kontrollstrukturen der Bewegung (z.B. Open- oder Closed-Loop) abhängt. Dennoch werden die Motorische Kontrolle und das Motorische Lernen im folgenden Textteil sowie in den Tabellen getrennt betrachtet. Gemeinsamkeiten im Theoriebezug werden im Text hervorgehoben und sind vor allem anhand der Überlappungen in der Terminologie zu erkennen. Auch lässt sich nicht die gleiche strenge historische Abhandlung der verschiedenen Strömungen wie noch bei der motorischen Entwicklung einhalten, da doch einige der neuen Ansätze zum einen aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen stammen und zum anderen an der ein oder anderen Stelle eine zeitliche Überlappung aufweisen.

Zunächst soll die für das Themengebiet wegweisende Arbeit des sowjetischen Neurophysiologen Nikolai Alex-

<sup>1</sup> Sequentielle räumliche und zeitliche Wechselwirkungen, die zur Differenzierung und / oder Morphogenese bestimmter Zellen, Gewebe und Organe führen (Hall & Hörstadius, 1988).



androwitsch Bernstein vorgestellt werden. Ein Großteil der Arbeiten von Bernstein zur Kontrolle und zum Lernen von Bewegungen wurde zwischen den 1920er und 1960er Jahren auf Russisch und Deutsch publiziert. Erst 1967 wurde eine Sammlung ausgewählter Werke Bernsteins ins Englische übersetzt und damit einem breiteren Publikum zugänglich gemacht. Bernstein gilt als einer der ersten, der das grundlegende Problem der Bewegungskontrolle (und damit auch des motorischen Lernens) erfasste und sowohl neuro- als auch verhaltenswissenschaftlich beschrieb. Das von Bernstein postulierte Problem der Freiheitsgrade („Degrees of Freedom“ Problem) menschlicher Bewegungen verdeutlicht in seiner Essenz die Redundanz der Freiheitsgrade des Bewegungssystems und die daraus entstehende Komplexität, die sich für die Steuerung selbst einfacher Bewegungen ergibt (f. engl. Übersetzung Bernsteins früher Arbeiten, s. Bernstein, 1967). Der Begriff der Freiheitsgrade stammt aus der Mechanik und beschreibt die Anzahl der unabhängig voneinander veränderbaren Bewegungsmöglichkeiten eines Systems (im motorischen System des Menschen zum Beispiel die Drehachsen der Gelenke). Die grundlegende Frage Bernsteins lautet, wie es trotz der Redundanz der Freiheitsgrade (und der daraus entstehenden theoretisch unendlichen Zahl an Lösungsmöglichkeiten für ein und dieselbe Bewegung) gelingt, Bewegungen adäquat zu kontrollieren und stabil auszuführen. Beispielsweise hat der menschliche Arm sieben mechanische Freiheitsgrade, wenn man die Gelenke von der Schulter bis zum Handgelenk betrachtet. Dieselbe Position und Orientierung der Hand kann somit durch verschiedenen Kombinationen der Gelenkwinkel erreicht werden. Verhaltens- und neurowissenschaftliche Untersuchungen des motorischen Systems haben gezeigt, dass das System die Redundanz der vielen Kombinationsmöglichkeiten tatsächlich bis zu einem gewissen Grad ausnutzt (Latash, Scholz & Schoner, 2007). Selbst im Fall außergewöhnlich gut koordinierter Ausführung gleicher Bewegungen, bei denen augenscheinlich kein Unterschied in der Bewegungsausführung zu erkennen ist, ist bei genauerer Analyse mitunter eine hohe Variabilität auf bestimmten Ebenen des Systems erkennbar. Diese grundlegende Erkenntnis bildet den Dreh- und Angelpunkt der modernen Motorikforschung und deshalb auch für die im folgenden Kapitel beschriebene Entwicklung des Forschungsgebiets.

## Motorische Kontrolle

Die wichtigsten Strömungen aus dem Forschungsgebiet der motorischen Kontrolle des letzten Jahrhunderts sowie deren wichtigsten Vertreter sind in Tabelle 2 zusammen-

gefasst. Auf der neuromotorisch niedrigsten Ebene der Hierarchie motorischer Kontrollprozesse werden Bewegungen im Rückenmark gesteuert. Auch historisch betrachtet, stehen Untersuchungen zur sogenannten spinalen Bewegungssteuerung am Beginn der Entwicklung des Forschungsgebiets. Im frühen 20. Jahrhunderts veranlasste die Debatte über den histologischen Aufbau des Nervensystems den englischen Mediziner Sir Charles Scott Sherrington zu einer neuen Sichtweise auf die Funktion und Mechanismen von Reflexen (Burke, 2007). Mit der Veröffentlichung seiner Vorlesungsunterlagen (Sherrington, 1906) lieferte Sherrington eine grundlegende Betrachtung der integrativen Mechanismen des (sensomotorischen) Nervensystems, die noch heute ihre Anwendung findet. Dazu zählt insbesondere die Entdeckung des Phänomens der reziproken Inhibition, also der gleichzeitigen Hemmung antagonistischer Muskeln bei der reflektorisch gesteuerten Erregung der agonistischen Muskulatur. Darüber hinaus beschreibt Sherrington noch zahlreiche weitere Phänomene, bei denen er reflektorische Innervationsmuster, also die spinale Verschaltung sensorischer und motorischer Neurone, als Ursache von Bewegung annahm; wie sich später herausstellte nicht immer zurecht. Der rhythmischen Abfolge von Flexion und Extension, wie bei Schreit- oder Kratzbewegungen (von Sherrington als Schreit- oder Kratz-Reflex bezeichnet) liegt beispielsweise keine sukzessive Abfolge von Reflexen zugrunde, sondern vielmehr ein auf spinaler Ebene lokalisiertes neuronales Netz, dass auch ohne die Verarbeitung sensorischer Informationen selbstständig ablaufen kann. Das Prinzip solcher sogenannter Central Pattern Generators (CPG; engl.: zentrale Mustergeneratoren) wurde bereits wenige Jahre nach der Veröffentlichung von Sherringtons „Integrative Action of the Nervous System“ entdeckt. Graham Brown (1911) führte dazu Untersuchungen an einer deafferenzierten Katze (d.h., operative Durchtrennung der dorsalen Rückenmarkswurzeln unterhalb des 11. Brustwirbelkörpers) durch und konnte zeigen, dass die rhythmische Abfolge der Schreitbewegung, wenngleich augenscheinlich schlechter koordiniert, auch ohne intakte Nervenfasern stattfinden kann. Die Funktion propriozeptiver Informationsverarbeitung sah Brown deshalb eher in der graduellen Anpassung der CPG an wechselnde Umwelthanforderungen. In der Folge entwickelten sich im Laufe des 20. Jahrhunderts verschiedene Konzepte zu der prinzipiellen Funktionsweise motorischer Steuerungsmechanismen, die häufig zwei unterschiedlichen Strömungen zugeordnet werden: i) Closed-Loop Modelle, bei denen reflektorische Steuerungsmechanismen und ii) Open-Loop Modelle, bei denen zentrale Programme als Grundlage der Bewegungskontrolle angenommen werden (Hossner, Müller & Voelcker-Rehage, 2013; Schmidt & Lee, 2011).



**Tabelle 2.** Übersicht der verschiedenen Strömungen und zugehörigen Teilgebiete des Forschungsgebiets der motorischen Kontrolle

Theorie	Kurzbeschreibung	Zentrales Paradigma	Population	Zentrale Publikationen
<b>Arbeiten mit physiologischem Schwerpunkt (seit 1906)</b>				
Reflexe	Modulation von Reflexbahnen als Basis von Willkürmotorik	Sherrington (1906): Beobachtung und Beschreibung von Reflexen Dewhurst (1967): Elektromyographische Messung von Reflexantworten bei plötzlichen Änderungen der äußeren Kraft	Tiere (z. B. Hunde, Katzen) gesunde Erwachsene	Sherrington, 1906; Dewhurst, 1967
Central Pattern Generators (CPG)	Neuronale Netzwerke, die auf spinaler Ebene (insbes. rhythmische) Bewegungsabläufe (z. B. Gangmuster) kodieren	Nach Deafferenzierung und Durchtrennung der dorsalen Spinalnerven bei Katzen sind noch einige Zeit nach der Operation Abfolgen von Muskelkontraktionen, die denen von Schreitbewegungen gleichen, zu erkennen.	Tiere (z. B. Katzen)	Brown, 1911; Forssberg et al., 1980
Somatotope Organisation	Projektionen der motorischen Areale zeigen räumliche Trennung im motorischen Kortex	Elektrische Stimulation des motorischen Kortex (z. B. während Operation am offenen Schädel) ruft motorische Antwortreaktionen hervor	Humanexperimente (während Operationen am offenen Schädel), Tiere (Primaten)	Penfield & Boldrey, 1937; Graziano et al., 2002
Mirror Neurons	Nervenzellen, die sowohl bei der Bewegungsausführung, als auch Bewegungsbeobachtung aktiv sind	Einzelzelleleitungen im F5 Areal (prämotorischem Kortex) bei Primaten während Bewegungsausführung (Greifen) und -beobachtung derselben Bewegung	Tiere (Primaten)	Di Pellegrino et al., 1992; Rizzolatti & Craighero, 2004
<b>Spinale Steuerungsmodelle (seit 1948)</b>				
Kybernetik	Theoretisches Feld; Regelkreismodelle als Grundlage der Steuerung von Mensch und Maschine	Theoretische Grundlagenarbeit	–	Wiener, 1948
Servo- (oder Equilibrium Point-) Modelle	Bewegungskontrolle über Feedbackschleifen auf Rückenmarksebene; Equilibrium Point Modelle: hypothetische Punkte aus der Kombination von Muskelänge und äußerer Kraft	Feldman (1966): Beobachtung von Gelenkwinkelentscheidungen nach passiven Bewegungen bei Menschen Bizzi (1993): Aufzeichnung von Zugkräften nach passiver Auslenkung von Froschbeinen; Erstellung daraus resultierender Kraftfelder	Gesunde Erwachsene, Patienten mit Spastik Tiere (z. B. Frösche)	Merton, 1953; Feldman, 1966; Bizzi, Mussa-Ivaldi, Giszter, 1991; McIntyre & Bizzi 1993; Levin & Feldman, 1994
<b>Motorische Programme (seit 1935)</b>				
Response-Chaining Hypothese	Muskelkontraktionen als Antwort auf bestimmte innere und äußere Reize. Komplexe Bewegungen als Aneinanderreihung von sensorischer Information und muskulärer Antwortreaktion	Theoretische Grundlagenarbeit	–	James (1890)
Bewegungsformeln bzw. Engramme	Bewegungsabläufe sind in Form von Engrammen (fest vernetzte neuronale Strukturen) zentral gespeichert	Theoretische Grundlagenarbeit basierend auf neurophysiologischen und verhaltenswissenschaftlichen Beobachtungen (Chronofotografie, Kymocyclografie)	Gesunde Erwachsene	Bernstein, 1967 (Originalpublikation auf Russisch 1935)
Problem serieller Bewegungen	Widerlegt Annahme der Response-Chaining-Hypothese als Basis serieller Bewegungen	Serielle Bewegungsmuster bei Patient mit Verlust von sensorischen Nervenbahnen der unteren Extremität als Folge einer Schussverletzung	Deafferenzierter Patient nach Schussverletzung	Lashley, 1917, 1951

**Tabelle 2.** Übersicht der verschiedenen Strömungen und zugehörigen Teilgebiete des Forschungsgebiets der motorischen Kontrolle (Fortsetzung)

Theorie	Kurzbeschreibung	Zentrales Paradigma	Population	Zentrale Publikationen
Generalisierte Motorische Programme	Konzept der Schemata, Weiterentwicklung der Idee motorischer Programme. Grundannahme: Bewegungsmuster werden als übergeordnete Klassen von Bewegung gespeichert	Theoretische Grundüberlegungen auf Basis derer Experimente zum motorischen Lernen durchgeführt wurden	Gesunde Erwachsene	Schmidt, 1975
Internale Modelle	Forward-Modell; sensorische Konsequenzen einer Bewegung werden bereits vor Beendigung der Bewegung vorhergesagt	Bewegungsmuster in extern wirkendem Kraftfeld	Gesunde Erwachsene Computermodelle	Shadmehr & Mussa-Ivaldi, 1994; Wolpert, 1997; Shadmehr & Wise, 2005
<b>Informationsverarbeitungsansätze</b>				
Fitts Law (Verarbeitungs-geschwindigkeit)	Schwierigkeit einer Aufgabe (und damit auch Bewegungs-geschwindigkeit) steigt logarithmisch mit der Kombination aus Bewegungsamplitude und Präzisionsanforderung	Fitts tasks: Präzisionsaufgaben, systematische Variation der Bewegungsamplitude und Präzisionsanforderung	Gesunde Erwachsene (mittlerweile auch Patienten, bspw. Schlaganfall)	Fitts, 1954
Hicks Law bzw. Hick-Hyman Law (Entscheidungs-geschwindigkeit)	Logarithmischer Zusammenhang zwischen der Anzahl verschiedener Antwortmöglichkeiten bei Stimulus-Response Aufgaben und der Dauer der Entscheidungsfindung	Reaktionszeitaufgaben, systematische Variation des Umfangs der Information (z.B. die Anzahl zur Auswahl stehender Items)	Gesunde Erwachsene	Hick, 1952; Hyman, 1953
Tau (τ) bzw. Time-To-Contact Hypothesen	Vorhersage sensorischer Konsequenzen (und Integration in motorische Handlungsmuster) über Größenänderung der Projektion von Objekten auf Retina	Raum, in dem Versuchsteilnehmer auf stabiler nicht beweglicher Fläche stehen, die Wände jedoch auf Schienen vor- und zurückgeschoben werden können	Gesunde Kinder und Erwachsene	Lee, 1976; Lee, 1998; Savelsbergh, Whiting & Bootsma, 1991
Ökologischer Ansatz zur Wahr-nehmungs-Hand-lungs-Kopplung	Direkte wechselseitige Abhängigkeit von Perzeption (v.a. visuell) und motorischer Handlung. Affordanzen: Möglichkeit der motorischen Handlungsspiel-räume, die bestimmte Objekte bzw. Situationen bereitstellen	Theoretische Grundlagenarbeit	-	Gibson, 1979
Two-Stream Hypothese	Visuelle Informationen werden über zwei „Ströme“ im Gehirn verarbeitet. ventraler Strom: kognitive Verarbeitung von wahrgenommenen visuellen Informationen dorsaler Strom: motorische Verarbeitung von Informationen	Illusionsexperimente und Studien an Patienten mit Störungen der visuellen Informationsverarbeitung (visuelle Agnosie oder optische Ataxie)	Patienten mit Störungen der visuellen Informationsverarbeitung, (visuelle Agnosie oder optische Ataxie)	Ungerleider & Mishkin, 1982; Goodale & Millner, 1992
<b>Systemdynamische Ansätze (seit 1980)</b>				
Synergetik	Umfassende Theorie: Selbstorganisation komplexer System, Entstehung geordneter Muster (z.B. Bewegungsmuster) aus scheinbar chaotischen Zuständen	Haken-Kelso-Bunz Modell gekoppelter Fingerbewegungen. Stabile Attraktoren bei 0° und 180° relative Phase	Gesunde Erwachsene	Haken, Kelso & Bunz, 1985; Kelso & Schöner 1988
Uncontrolled Manifold Hypothese	Phänomen der funktionalen Variabilität in der Bewegungs-ausführung: Stabilität aufgabenspezifischer Variable (z.B. Position der Hand bei Greifbewegung) in Relation zur Variabilität der an Bewegung beteiligten Freiheitsgrade (z.B. Gelenkstellungen)	Scholz und Schöner, 1999: Transfer vom Sitzen zum Stehen. Beobachtung der Bewegungsvarianz der Trajektorien des Körperschwerpunktes in Relation zur Variabilität in den Gelenken	Gesunde Erwachsene	Scholz & Schöner, 1999; Latash, Scholz & Schöner, 2007

## Kybernetische Modelle

Die theoretische Grundlage zu den Closed-Loop (oder Regelkreis-) Modellen lieferte der Mathematiker Norbert Wiener (1948). Das von ihm begründete Feld der Kybernetik beschäftigt sich mit Regelkreisen als Prinzip der Steuerung. In solch einem Regelkreis werden gegenwärtige Systemzustände (der Ist-Wert) mit einem gewünschten Endzustand (dem Soll-Wert) abgeglichen. Wenn beide Werte nicht übereinstimmen, steuert das System zur Erreichung des Soll-Wertes nach. Die in der Folge von Patrick A. Merton (1953) konzipierte Servo-Hypothese stellt die erste kybernetische Regelkreistheorie mit konkretem Bezug zur motorischen Kontrolle dar. Merton ging davon aus, dass der Soll-Wert der Muskellänge über die  $\gamma$ -Motoneurone kodiert und der Ist-Wert, also die tatsächliche Muskellänge, über die Muskelspindel detektiert wird, um dann die beiden Werte nach und nach über den Weg spinaler Reflexe anzugleichen. Einer späteren experimentellen Überprüfung hielt die Servo-Hypothese jedoch nicht stand (Latash, 2008; Vallbo, 1970). Schwachpunkt ist, dass das Modell nicht die gleichzeitige Aktivierung von  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Motoneuronen erklärt (Vallbo, 1970). Außerdem ist die bei experimentellen Untersuchungen tatsächlich erreichte Muskelspannung kleiner als die Spannung, die theoretisch nötig wäre, damit davon ausgegangen werden kann, dass der spinale Dehnreflex die alleinige Grundlage der regelkreisgesteuerten Bewegungskontrolle ist (Latash, 2008). Aufbauend auf Mertons ursprünglicher Hypothese wurden aber weitere Modelle entwickelt, mit dem Ziel die ursprünglichen Unzulänglichkeiten zu beheben, sogenannte Equilibrium Point (EP; engl. Gleichgewichtspunkt) Modelle. Dazu gehören die Modelle von Anatol Feldman (Feldman, 1966, 1986) und Emilio Bizzi (Bizzi, Mussa-Ivaldi & Giszter, 1991). Feldman formulierte in seinem auf physiologischen Messdaten beim Menschen basierenden  $\lambda$ -Modell die Annahme, dass ein EP zur Kontrolle der Längenänderung eines Muskels dient. Dieser ergibt sich aus einer Länge ( $\lambda$ ) des Muskels, ab der ein Dehnreflex ausgelöst wird, und der äußeren Kraft, die auf den Muskel wirkt. Im Gegensatz dazu erklärt Bizzi den Mechanismus zur Erreichung des EPs im  $\alpha$ -Modell mit den mechanischen Masse-Federeigenschaften (eine hervorragende Zusammenfassung der unterschiedlichen EP Konzepte findet sich bei McIntyre und Bizzi, 1993).

## Motorische Programme

Als „Gegenstück“ zu den Closed-Loop Theorien, bei denen die Reflexregulation als zentraler Bestandteil der Bewegungskontrolle angenommen wird, entwickelten sich Open-Loop Theorien, bei denen zentrale Mechanismen im Mittelpunkt stehen und motorische Programme als grundlegender Kontrollmechanismus angenommen werden. Abgesehen von CPG, die in bestimmten Fällen bereits auf spinaler Ebene nachgewiesen werden konnten

(Brown, 1911; Forssberg, Grillner, Halbertsma & Rossignol, 1980) ist der Nachweis motorischer Programme auf der Ebene des Großhirns bedeutend schwieriger. In vielen Arbeiten zu motorischen Programmen wird daher eine verhaltenswissenschaftliche Überprüfung dieser theoretischen Konzepte vorgenommen. William James (1890) bot mit der Response-Chaining Hypothese einen frühen Erklärungsansatz zur Bewegungskontrolle auf Grundlage von open-loop Steuerungsmechanismen. James ging davon aus, dass muskuläre Kontraktionen infolge von bestimmten externen und internen Informationen entstehen. Die sensorische Information infolge der initialen Muskelkontraktion dient laut James ihrerseits wieder als Information für die nachfolgende Bewegung. Komplexe Bewegungen entstünden durch die Aneinanderreihung sukzessiver Antwortketten. Bernstein hingegen argumentierte bereits 1935 für die Existenz motorischer Programme (bei Bernstein Bewegungsformen genannt) bzw. sogenannter Engramme. Ein Engramm bezeichnet hypothetische, strukturelle bzw. funktionelle Anpassungen im Nervensystem, die beispielsweise mit einer bestimmten Erinnerung verbunden sind. Eine empirische Grundlage, die für die Existenz von Engrammen (und gegen die Response Chaining Hypothese) sprach, bot Karl Lashley bereits einige Jahre vorher. Lashley beschäftigte sich mit einem Patienten, der als Folge einer Schussverletzung einen Verlust der sensorischen Bahnen im Knie aufwies (Lashley, 1917). Lashley zeigte hingegen, dass sein Patient trotz fehlender sensorischer Information sehr wohl komplexe Bewegungssequenzen ausführen konnte. Daraus schlussfolgerte er, dass der Ablauf einer Bewegungssequenz bereits zentral repräsentiert sein muss (Lashley, 1951), verwendete jedoch noch nicht den Begriff eines motorischen Programms. Unter anderem von Lashleys Arbeit beeinflusst, formulierte Steven W. Keele (1968, S.387) eine erste umfassende Definition motorischer Programme als eine Menge an Anweisungen für die Muskelaktivierung, die bereits vor Beginn der Bewegungsinitiierung vorliegt und die unabhängig von sensorischer Informationsverarbeitung ablaufen kann. Richard A. Schmidt (1975) zeigte jedoch, so attraktiv Keeles Definition auch klingen mag, zwei grundlegende Schwächen auf. Nämlich, dass i) die Menge an Bewegungsabläufen, die ein Individuum beherrscht, so zahlreich ist, dass die Speicherkapazität des Nervensystems für das Abspeichern aller Einzelbewegungen (mit allen daran beteiligten Muskelkontraktionen) nicht ausreichen würde und ii) das Lernen neuer Bewegungsabläufe dadurch nicht erklärt werden kann. Als direkte Antwort darauf formulierte Schmidt (1975) die Theorie der Generalisierten Motorischen Programme (GMP). Dabei ging er davon aus, dass Bewegungen nicht als spezifische unveränderbare Programme abgespeichert werden, sondern eher als abstrakte Schemata oder Klassen aus denen je

nach Bedarf konkrete Spezifikationen für eine Bewegung extrahiert werden können. Klaus Roth (1989) differenzierte auf Basis der Schematheorie das Entscheidungsverhalten im Sport in eine Was-Entscheidung (Entscheidung für ein bestimmtes GMP) und eine Wie-Entscheidung (Entscheidung für eine situations- und zielangemessene Programmvariante). Die Modularitätshypothese von Ernst Hossner (1995) baut ebenfalls auf der GMP-Theorie auf und versteht Fertigkeitserwerbungen als situativ angepasste Zusammenstellung von Motorikmodulen bzw. Technikbausteinen (z.B. Laufweg zum Ball anpassen). Auf diese Technikbausteine soll nach dem Baukastenprinzip zurückgegriffen werden.

Einer der größten Nachteile motorischer Programmtheorien ist, dass diese häufig auf theoretischen Überlegungen und Verhaltensdaten basieren. Neurophysiologische Korrelate motorischer Programme auf Ebene des Großhirns wurden bisher so gut wie gar nicht identifiziert. Zwar konnten Wilder Penfield und Edwin Boldrey bereits 1937 durch Elektrostimulation, die sie während der Operation bei Personen am offenen Schädel durchführten, eine somatotopische Organisation der primären sensorischen und motorischen Kortex nachweisen. Dies führte später zu der bekannten Abstraktion zur somatotopischen Organisation der Motorik, dem Homunkulus (Penfield, 1958). Jedoch waren die motorischen Antworten in Penfields Studien nicht zielgerichtet und hatten mit spezifischen Bewegungsprogrammen wenig zu tun. Erst Anfang der 2000er Jahre konnten Graziano, Taylor, Moore und Cooke (2002) zeigen, dass eine länger andauernde (500 ms) Stimulation des prämotorischen Kortex beim Affen tatsächlich zielgerichtete Bewegungsabläufe, wie etwa eine Fressbewegung, bei der die Hand zum Mund geführt und der Mund gleichzeitig geöffnet wird, auslöst. Interessanterweise wurde die Bewegung bei Stimulation desselben Areals mit demselben Ziel durchgeführt auch wenn die Anfangsposition der Hand verändert wurde. Es wurde geschlossen, dass sich die somatotopischen Karten des motorischen Kortex nicht auf bestimmte Muskelgruppen beziehen, sondern auf Geschwindigkeiten und Positionen im Raum, d.h. auf potenzielle Ziele von Bewegungen im körperrahmen Greifraum.

### Interne Modelle

Analog zu den motorischen Programmen aus dem Sprachgebrauch der motorischen Verhaltenswissenschaften ist in der Neurowissenschaft häufig von internen Modellen die Rede (Francis & Wonham, 1976). Interne Modelle beinhalten Systeme bei denen erwartete sensorische Konsequenzen einer Bewegung im Bewegungsverlauf mit den tatsächlichen Konsequenzen abgeglichen werden und so schnelle Adaptionen während der Bewegungsausführung zulassen, sogenannte Feedforward-Systeme. Interne Mo-

delle bieten daher einen Erklärungsansatz wie Feedback auch bei besonders schnell ausgelösten ballistischen Bewegungen in den Bewegungsablauf integriert werden kann (Wolpert, Ghahramani & Jordan, 1995). Experimentell nachgewiesen wurde das Prinzip der Feedforward-Steuerung (oder Reafferenzprinzip) von Erich von Holst bereits in der Mitte des 20. Jahrhunderts in zahlreichen Arbeiten an unterschiedlichen Lebewesen (von Holst & Mittelstaedt, 1950). Im späteren Verlauf des 20. Jahrhunderts und bis heute wurden eine Vielzahl der Arbeiten, hier vor allem von dem britischen Neurowissenschaftler Daniel Wolpert durchgeführt (Wolpert, Ghahramani & Jordan, 1995). Interne Modelle werden auch häufig genutzt um motorische Kontrolle auf Ebene der Neuroinformatik zu erklären (Wolpert, 1997). Die theoretischen Grundannahmen solcher Modelle wurden aber zum Teil mit verhaltenswissenschaftlichen Methoden überprüft (siehe Kasten).

#### Kategorie: Programmtheorien / Interne Modelle

Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, 14 (5 Pt 2), 3208 – 3224. [2351 Zitationen, Januar 2019, Google Scholar]

**Hintergrund:** In ihrem stark theoriegeleiteten Experiment untersuchten Shadmehr und Mussa-Ivaldi die Repräsentation von Bewegungsmustern und wie sich diese durch die unerwartete Änderung dynamischer Bedingungen (hier des externen Kraftfeldes) verändern. Basierend auf der Idee eines internen Feedforward-Modells nahmen die Autoren an, dass dauerhafte Änderungen des dynamischen Kraftfelds in das interne Modell übernommen werden.

**Methode:** Die Probanden im Experiment von Shadmehr und Mussa-Ivaldi führten zweidimensionale Armbewegungen aus, indem sie ein Manipulandum bewegten. Das Manipulandum konnte dabei externe, der Bewegung entgegenwirkende, unterstützende, sowie seitwärts wirkende Kräfte erzeugen. Aufgabe der Probanden war es, das Manipulandum zu verschiedenen Zielen zu bewegen. Die Bewegungen wurden dabei von zwei unterschiedlichen Ausgangspositionen, initialen Gelenkwinkelstellungen, ausgeführt. Das vom Manipulandum erzeugte externe Kraftfeld wurde zum einen auf Basis der Geschwindigkeit und Richtung des Endpunktes (Griffposition) bestimmt, was einer Änderung der mechanischen Viskosität der Umgebung entspricht, und zum anderen auf Basis der Geschwindigkeit des Ellbogen- und Schultergelenks, was einer Änderung der mechanischen Viskosität der intern wirkenden Kräfte entspricht.

**Ergebnisse und Diskussion:** Die Ergebnisse zeigten, dass Veränderungen im externen Kraftfeld zunächst zu



Veränderungen in der kinematischen Bewegungsausführung führten. Ähnliche Veränderungen der kinematischen Trajektorien konnten auch für simulierte Daten, unter der Annahme eines unveränderten internen Modells, gezeigt werden. Nach mehreren hundert Übungsdurchgängen, in einem veränderten dynamischen Feld zeigte sich jedoch, dass sich die ursprünglichen kinematischen Trajektorien langsam wiedereinstellen. Dies spricht für eine Anpassung (Update) des internen Modells an das neue Kraftfeld. Die Autoren zeigten außerdem, dass Änderungen in den dynamischen Eigenschaften der Gelenkdrehmomente transferiert werden können. Die Ergebnisse sprechen dafür, dass der Bewegungskontrolle ein internes Feedforward-Modell, basierend auf den dynamischen Eigenschaften der Gelenkdrehmomente, zugrunde liegt.

### Modelle der Informationsverarbeitung

Neben den oben beschriebenen grundlegenden Konzepten der Organisation motorischer Kontrolle wurden in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auch eine Vielzahl an Untersuchungen durchgeführt und Theorien entwickelt, die sich eher mit spezifischen verhaltenswissenschaftlichen Besonderheiten sowie der Verarbeitung sensorischer Informationen während der Bewegung beschäftigen. Die von Fitts (1954) experimentell abgeleitete Formel zur Informationskapazität des motorischen Systems (Fitt's Law) ist beispielsweise seither ein „Dauerbrenner“ und seine experimentellen Paradigmen und Resultate finden heute noch Anwendung, um Fragen zur Informationsverarbeitung zu untersuchen. Fitts-Task Experimente mit optischen Täuschungen werden beispielsweise häufig verwendet, um Unterschiede in der motorischen und kognitiven Verarbeitung visueller Informationen (die sogenannte „Two-Stream Hypothese“) zu untersuchen (Knol, Huys, Sarrazin, Spiegler & Jirsa, 2017). Etwas weniger populär, jedoch nicht weniger bahnbrechend, ist der von William E. Hick (1952) experimentell nachgewiesene logarithmische (ähnlich wie bei Fitt's Law) Zusammenhang zwischen Informationsgehalt eines Signals und Dauer der Entscheidungsfindung. David Lee (1976) wiederum untersuchte, auf welche Art und Weise visuelle Informationen verarbeitet werden und motorische Handlungen daraus abgeleitet werden. Er zeigte modellhaft, dass man anhand der Größenänderung der Projektion eines Objektes auf der Retina sehr einfach den Zeitpunkt des Kontaktes (Time to Contact) mit diesem Objekt berechnen kann. Daraus leitete Lee (1976, 1998) ab, dass die Integration visueller Informationen in den motorischen Handlungsablauf voraussichtlich über die Variable Tau ( $\tau$ ) geschieht. Eine grundlegende Theorie zur dynamischen Interaktion zwischen visueller Wahrnehmung und motorischer Handlung

wurde kurze Zeit später von James Gibson (1979) in seinem Werk „An ecological approach to perception and action“ beschrieben. Diese Interaktion von Wahrnehmung und Handlung in dem Sinne, dass die Information der Wahrnehmung direkt die motorische Handlung beeinflusst und umgekehrt („Locomotion and Manipulation [...] are controlled not by the brain, but by information, that is, by seeing oneself in the world.“, Gibson, 1979, S.225) wird von manchen Autoren bereits als grundlegendes Postulat der dynamischen Systemtheorie gesehen (Kugler et al., 1980; Sternad, 2000).

### Dynamische Systemtheorien

Mit dem Konzept der „Coordinative Structures“ stellt die Arbeit von Kugler, Kelso und Turvey (1980) einen wichtigen Meilenstein in der Entstehung der dynamischen Systemtheorie der motorischen Kontrolle dar. Im drastischen Gegensatz zu den bis dato vorherrschenden programmorientierten und kybernetischen Konzepten der Motorik, bei denen feste Verschaltungen und Programme die grundlegende Modellannahme bilden, steht bei der systemdynamischen Vorstellung die Formierung sogenannter dissipativer Strukturen im Mittelpunkt (Kugler et al., 1980). Der Begriff der dissipativen Struktur kommt aus der Physik und beschreibt Systeme, die fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht existieren. Auf neuromuskulärer Ebene werden solche koordinativen Strukturen auch Synergien genannt (Latash & Zatsiorsky, 2016).

Entsprechend wurde auch die vom deutschen Physiker Hermann Haken (1977) entwickelte Theorie zur Selbstorganisation geordneter Zustände in komplexen dynamischen Systemen als Synergetik bezeichnet. Den Transfer auf das Feld der Bewegungswissenschaft maßgeblich vorangetrieben haben der Neurowissenschaftler J. A. Scott Kelso in Zusammenarbeit mit Hermann Haken (Haken, Kelso & Bunz, 1985) und auch dessen Schüler Gregor Schöner (Kelso & Schöner, 1988). Das Haken-Kelso-Bunz Modell gekoppelter Fingerbewegungen (Haken et al., 1985) wurde dabei vielfach experimentell untersucht, um grundlegende Annahmen der Theorie zu überprüfen.

#### Kategorie: Dynamische Systemtheorien

Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 15 R1000–R1004, [1729 Zitationen, Januar 2019, Google Scholar]

**Hintergrund:** Mit seiner Arbeit zu plötzlich auftretenden Phasenübergängen bei rhythmischen bimanuellen Bewegungen legte Kelso die experimentelle Grundlage für die Überprüfung von Annahmen und Hypothesen, die sich aus der systemdynamischen Sichtweise der Bewe-

gungskontrolle ergaben. Kelso sah einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen dem neu entstandenen Theoriefeld der Synergetik (Haken, 1977), der systemdynamischen Betrachtungsweise menschlicher Koordination (Kugler et al., 1980) und seinen experimentell gewonnenen Erkenntnissen.

**Methode:** Die Probanden in Kelso's Experiment hatten die Aufgabe gegenläufige (antiphasische) zyklische Flexions-Extensionsbewegungen in beiden Handgelenken zu erzeugen. Dabei wurden die jeweiligen Gelenkwinkel kontinuierlich aufgezeichnet. Sukzessive wurde die Frequenz der Bewegungszyklen erhöht.

**Ergebnisse und Diskussion:** Bei allen Versuchsteilnehmer\_innen ließ sich beobachten, dass ab einer (individuellen) kritischen Frequenz das gegenläufige Bewegungsmuster nicht mehr aufrechterhalten werden konnte und ein plötzlicher Wechsel in Richtung eines gleichläufigen (inphasischen) Bewegungsmusters stattfand. Zum Zeitpunkt des Phasenübergangs traten zudem kurzzeitig starke Bewegungsschwankungen, sogenannte Fluktuationen auf. Die Ergebnisse wurden von Kelso mit Blick auf die dynamische Systemtheorie so eingeordnet, dass die beiden unterschiedlichen Bewegungsmuster verschiedene Ordnungszustände im motorischen System abbilden und der plötzliche Phasenübergang (also der Transfer von einem Ordnungszustand in den anderen) nach Prinzipien verläuft, die bereits bei anderen physikalischen (z.B. Laser) und biologischen Systemen (z.B. Schwarmverhalten) gezeigt werden konnten (Haken, 1977). Die Entstehung geordneter Muster in Abhängigkeit eines (oder mehrere) Kontrollparameter kann dabei ebenso verdeutlicht werden wie beispielsweise Fluktuationen (bzw. eine erhöhte Variabilität) oder die Hysterese des Systems (das Verweilen in einem gegenwärtigen geordneten Zustand) in der Nähe des Phasenübergangs.

Zwar kann das Haken-Kelso-Bunz Modell als ein wenig alltagsnahes Paradigma gesehen werden, das den Übertrag auf das gesamte Spektrum der menschlichen Motorik schwierig macht, die Prinzipien der dynamischen Systemtheorie sind jedoch auch schon bei anderen Bewegungsmustern aufgezeigt worden, wie z. B. der Hysterese-Effekt beim Übergang vom Gehen zum Laufen und umgekehrt (Diedrich & Warren, 1995). Mit der vielfachen Überprüfung des Konzepts der Synergetik scheint die Entwicklung der dynamischen Systemtheorie menschlicher Bewegung jedoch bei weitem noch nicht abgeschlossen. In den letzten Jahren wurden die systemdynamischen Ansätze dahingehend erweitert, dass das Rauschen in der Signalverarbeitung auf den verschiedenen Ebenen des Systems (Faisal, Selen & Wolpert, 2008) und die damit verbundene

Bewegungsvariabilität (Davids, Bennett & Newell, 2006) theoretisch beschrieben wird. In diesem Zusammenhang wird die „Uncontrolled-Manifold-Hypothese“ (UCM; Latash et al., 2007; Scholz & Schöner, 1999), welche das Auftreten aufgabenspezifischer Bewegungsstabilität bei gleichzeitiger Variabilität der elementaren, an der Bewegung beteiligten Variablen des motorischen Systems, beschreibt, mit hoher Wahrscheinlichkeit den nächsten großen Meilenstein in der Erforschung der menschlichen Motorik darstellen.

## Motorisches Lernen

Die Untersuchungen zum Motorischen Lernen zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren, im Unterschied zu den physiologischen Untersuchungen zu Reflexen (Sherrington, 1906) oder CPG's (Brown, 1911) eher verhaltenswissenschaftlich geprägt. Die erste, in der Folge häufig nachgewiesene, charakteristische Lernkurve mit der Ausbildung eines Lernplateaus nach einer steilen Anfangsphase wurde beispielsweise von William Bryan und Noble Harter (1897) dokumentiert. Bryans Student Harter dokumentierte dafür über mehrere Wochen die Geschwindigkeit, in der neu angestellte Morsebeamte der Western Union Company fehlerfrei Nachrichten senden und empfangen konnten. George S. Snoddy (1926) konnte daraufhin zeigen, dass sich solche Lernkurven mathematisch vor allem über eine Power-Funktion modellieren lassen (siehe Kasten). Später machte Edward Crossman (1959) anhand der Leistungszuwächse von Zigarettendrehern deutlich, dass ein solches „Power-Law of Practice“ die Veränderungen der Leistung auch über mehrere zehntausend Übungsdurchgänge hinweg beschreiben kann. Auf Basis der beobachteten Verhaltensänderungen entwickelten verschiedene Autoren Modelle, die versuchen den Lernverlauf über die Zeit zu beschreiben. Solche Modelle differenzieren häufig zwei oder drei Lernstufen. Bernstein (1967) beispielsweise beschrieb in seinem dreistufigen Modell insbesondere Änderungen in der Art und Weise wie die Freiheitsgrade kontrolliert werden (1. Freiheitsgrade einfrieren; 2. Freiheitsgrade lösen; 3. Einbeziehen und Ausnutzen der mechanischen Trägheitseigenschaften des motorischen Systems in der Bewegung). Fitts und Posner (1967) hingegen fokussierten sich in ihrem ebenfalls dreistufigen Modell (1. Kognitive Phase; 2. Assoziative Phase; 3. Autonome Phase) vor allem auf Änderungen in der kognitiven Kontrolle und benötigten Aufmerksamkeit. Ann Gentile (1972) unterschied zwischen einer initialen Lernphase, bei der die generelle Idee einer Bewegung gelernt wird (ebenfalls unter Einbezug kognitiver Kontrollprozesse) sowie einer späten Lernphase in der die Bewegung automatisiert und variabel an wechselnde Bedingungen an-

gepasst werden kann. Solche Stufenmodelle wurden auch in der deutschsprachigen Literatur entwickelt, beispielsweise das Dreistufenmodell von Kurt Meinel und Günther Schnabel (1998), welches das Erlernen von 1. Grobkoordination und 2. Feinkoordination sowie 3. die Stabilisierung und variable Verfügbarkeit von Bewegung unterscheidet.

#### Kategorie: Lernverläufe

Snoddy, G. S. (1926). Learning and stability: A psycho-physiological analysis of a case of motor learning with clinical applications. *Journal of Applied Psychology*, 10 (1), 1–36. [334 Zitationen, Januar 2019, Google Scholar]

**Hintergrund:** Im Rahmen seiner klinischen Arbeit beschäftigte sich der Psychologe George S. Snoddy mit motorischen Störungen, in erster Linie um die klinische Relevanz daraus abzuleiten. Snoddy's Ergebnisse beeinflussten aber auch grundlegend das theoretische Verständnis motorischer Lernprozesse (zu einer Zeit, in der empirische Untersuchungen zu motorischen Lernprozessen praktisch nicht existent waren), was diese Arbeit ebenfalls zu einem Meilenstein der Motorikforschung macht.

**Methode:** Als klinische Tests kamen in Snoddy's Labor häufig sogenannte „Mirror-Tracing“ Aufgaben zum Einsatz. Dabei bekommen Patienten die Aufgabe bestimmte Formen nachzuzeichnen, z.B. eine sternförmige Bahn so schnell wie möglich nachzufahren ohne dabei an den Rand der Bahn zu stoßen. Die visuelle Kontrolle der eigenen Bewegung wird dabei nur über einen Spiegel zugänglich gemacht. Die Summe der Fehler und die benötigte Zeit reflektiert die Leistung eines Durchgangs. Insgesamt führten die Versuchsteilnehmer\_innen 20 Durchgänge der experimentellen Aufgabe aus. Zusätzlich kontrollierte Snoddy die Pausenzeit, indem er die Probanden drei Gruppen zuwies, welche entweder keine Pause, eine Minute Pause oder einen kompletten Tag Pause zwischen den einzelnen Durchgängen einlegten.

**Ergebnisse und Diskussion:** Eine der entscheidenden Erkenntnisse der Arbeit war, dass die Lernkurven (bzw. Änderungen der Ausführungsleistung  $C$ ) über eine Power-Funktion mit der Formel  $C = Bx^n$  beschrieben werden können. Die Koeffizienten  $B$  und  $n$  sind dabei Konstanten, die den Wert der Leistung zum Anfangszeitpunkt sowie die Steigung der Lernkurve beschreiben und  $x$  bezieht sich auf die Zahl der Übungsdurchgänge. Dieses sogenannte „Power-Law of Practice“ konnte in weiterführenden Studien zu unterschiedlichen Lernexperimenten wiederholt nachgewiesen werden (allerdings ist der Fit entweder zu Beginn oder gegen Ende der Lernkurve eher gering). Die Untersuchung der Relevanz der Pausenzeit zeigte, dass sich längere Pausenzeiten (bei

gleichbleibender absoluter Übungsdauer) positiv auf den Lernfortschritt auswirken.

#### Behaviourismus

Das frühe 20. Jahrhundert war außerdem gekennzeichnet von behavioristischen Lernexperimenten zum sogenannten assoziativem Lernen. Beim assoziativen Lernen werden Verknüpfungen (Assoziationen) zwischen zwei Elementen, z.B. einem Reiz und einer Reaktion betrachtet. Die wohl berühmtesten Untersuchungen in diesem Feld wurden vom Nobelpreisträger Ivan Pavlov durchgeführt, bei der er die Aktivität der Speichelsekretion von Hunden mit vorher nicht damit verknüpfte Stimuli assoziiert hat (Pavlov, 1927). Ausgangspunkt seiner Experimente war die Beobachtung – eigentlich hat er Studien zur Physiologie der Verdauung durchgeführt –, dass der Speichelfluss laborgewohnter Hunde bereits einsetzte, wenn die Vorbereitungen zur Fütterung begannen. Pavlov gilt damit als Vater der klassischen Konditionierung. Klassische Konditionierung wurde seitdem in unterschiedlichsten Paradigmen (z.B. Lidschlusskonditionierung, Konditionierung emotionaler Reaktionen) untersucht. Auch wurde in der Folge untersucht, was genau bei der Konditionierung gelernt wird, inwiefern diese inhibiert und die konditionierte Reaktion gelöscht werden kann. Einsatzgebiete sind außerhalb der Motorikforschung bspw. drogeninduzierte physiologische Reaktionen. Im Säuglingsalter ist der Prozess der klassischen Konditionierung insofern von Bedeutung, als er dazu beiträgt, dass der Säugling erkennt, welche Begebenheiten im Alltag gewöhnlich miteinander in Verbindung stehen.

Parallel zu Pavlov führte Edward Thorndike (1898) in den USA Experimente zu Verhaltensweisen von Tieren durch. Er befasst sich nicht mit einfachen Reiz-Reaktion-Zusammenhängen, sondern untersuchte die Verhaltensweisen von Tieren, beispielsweise von Katzen, um an Futter zu gelangen. Aufgrund seiner Beobachtungen postulierte er, dass Tiere durch Versuch und Irrtum lernen. Über die Zeit treten Situationen, denen ein befriedigender Zustand (Belohnung, z.B. Futter) folgt, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auf als solche denen ein aversiver Zustand folgt, so dass schließlich eine Situations-Reaktions-Verknüpfung gebildet wird (Gesetz des Effekts).

Das operante Konditionieren (oder instrumentelle Lernen), dass in der Folge von Burrhus Frederic Skinner beobachtet wurde, grenzt sich vom klassischen Konditionieren ab, da nun nicht mehr reagierendes Verhalten gezeigt wird, sondern das Verhalten stärker der Kontrolle des Versuchsleiters / Trainers unterliegt. Typische Lernexperimente sind das Gang- oder Labyrinthlernen von Tieren oder Hebeldrücken und Scheibenpicken. Beim instrumentellen Lernen kann erwünschtes Verhalten verstärkt (posi-



tiv [Gabe des Verstärkers; angenehme Konsequenzen] oder negativ [Entfernen eines unangenehmen Reizes; unangenehme Konsequenzen bleiben aus]) und unerwünschtes Verhalten bestraft (positiv [Gabe des Bestrafungsreizes, unangenehme Konsequenz] oder negativ [Entfernen eines Reizes, angenehme Konsequenz bleibt aus]) werden.

### Implizites Lernen

Findet Lernen statt, ohne dass der Lernende darüber Kenntnis hat (unbewusster, beiläufiger Prozess des Wissenserwerbs) und verbalisierbare Erkenntnis über das gelernte Verhalten erworben hat, wird dies als Implizites Lernen bezeichnet (French, 1998; Reber, 1993). Eine für die Motorikforschung wegweisende Studie war sicherlich die von Masters aus dem Jahr 1992. Masters (1992) untersuchte die Bedeutung impliziten und expliziten Wissens über die Bewegungsausführung und die Leistung in Drucksituationen am Beispiel des Golf Puttens. Er konnte zeigen, dass Personen mit einem großen expliziten Wissen in Drucksituationen schlechter abschneiden; vermutlich da durch eine explizite Bewegungssteuerung die automatisierte Bewegungsausführung gestört ist. Auch wurde implizites Lernen in Experimenten zum motorischen Sequenzlernen untersucht (z.B. Pew, 1974). Werden einem Probanden immer wieder (hierfür sind mehrere hundert Versuche notwendig) mehrere Elemente nacheinander präsentiert, so bilden die Personen Assoziationen zwischen den Elementen, so genannte Chunks. Mehrere Elemente, die (implizit) zu Chunks zusammengefasst werden, zeichnen sich durch kürzere Reaktionszeiten aus (Miller, 1956).

### Lernen durch Beobachtung

Wer ein neues Verhalten, z.B. eine Sporttechnik, erlernt, erwirbt die Grundlagen häufig durch Nachahmen. Dies wird unter dem Begriff Beobachtungslernen, Lernen am Modell oder Imitationslernen zusammengefasst. Demnach basiert Lernen auf der Beobachtung anderer Personen, die als Modell dienen und deren Verhalten imitiert wird. Im Unterschied zu den bisher vorgestellten Lerntheorien finden in der Theorie des Modelllernens kognitive Prozesse Berücksichtigung. Die Theorie des Modelllernens wurde vom kanadischen Psychologen Albert Bandura unter dem Begriff „sozial-kognitive Theorie“ postuliert. Auch die Physiologie unterstützt die Annahme des Modelllernens. In den frühen 1990er Jahren entdeckte der italienische Neurowissenschaftler Giacomo Rizzolatti sogenannte Spiegelneurone (mirror neurons), eine spezielle Klasse visuomotorischer Neurone im prämotorischen Kortex, die bei der Bewegungsbeobachtung aktiv sind. Seine Erkenntnisse gewann er zunächst eher zufällig während Einzelzellableitungen im Bereich F5 (dieser entspricht ei-

nem Teil des lateralen Prämotorischen Kortex beim Menschen) von Makaken (di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese & Rizzolatti, 1992). Auch beim Menschen scheint es den Spiegelneuronen ähnliche Neurone zu geben. So ist mittlerweile die Erkenntnis als gesichert, dass bei der Bewegungsbeobachtung ähnliche Gehirnregionen aktiv sind wie bei der tatsächlichen Bewegungsausführung (Hardwick, Caspers, Eickhoff & Swinnen, 2018). Die genaue Aufgabe der Spiegelneurone ist jedoch bis heute umstritten und neben der Annahme, dass Spiegelneuronen am Imitationslernen beteiligt sind, gehen die Experten auch davon aus, dass sie eine wichtige Rolle beim Verstehen von Bewegungen spielen (Rizzolatti & Craighero, 2004).

### Programmorientierte Theorien motorischen Lernens

Parallel zu der Frage, wie motorische Kontrollprozesse zentral organisiert sind (d.h. Programmtheorien) entwickelten sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auch theoretische Annahmen wie sich diese Kontrollprozesse entwickeln bzw. wie diese gelernt werden. Jack A. Adams (1971) kreierte seine Closed-Loop Theorie des motorischen Lernens basierend auf empirischen Beobachtungen langsamer Bewegungen, bei denen direktes Feedback als Konsequenz des Bewegungsergebnisses entscheidend für die motorischen Lernprozesse war. Dementsprechend bildeten sensorische Feedbackschleifen das Kernelement seiner Theorie. Richard Schmidt und Janice White (1972) erkannten jedoch schnell die Limitationen in Adams' Theorie, insbesondere beim Transfer auf schnelle ballistische Bewegungen, bei denen Feedbackschleifen nicht unmittelbar an der Bewegungsausführung beteiligt sind. Zusätzlich sind auch hier zwei logische Limitationen motorischer Programmtheorien anzunehmen: 1. Das Speicherproblem, also limitierende Speicherkapazitäten, wodurch ein Abspeichern jeder einzelnen Bewegung als eigenständiges „Programm“ praktisch unmöglich wird; und 2. Das Neuigkeitenproblem, worin das Ausführen einer neuen Bewegung (die noch nie zuvor durchgeführt wurde und deshalb auch kein motorisches Programm besitzt) in Frage gestellt wird. In zwei Experimenten testeten Schmidt und White (1972) sowie Schmidt und Wrisberg (1973, siehe Kasten) systematisch die abgeleiteten Vorhersagen. Als Antwort auf die logischen und empirischen Unzulänglichkeiten entwickelte Schmidt (1975) seine Schematheorie zum Erlernen abstrakter Bewegungsschemata um motorische Programme variabel zu skalieren (z.B. in Amplitude und Geschwindigkeit). Schmidt ging von zwei sich separat entwickelten Schemata aus, i) dem Wiedergabeschema (Recall) für die Bewegungssteuerung nach Open-Loop Kontrollprinzipien und ii) dem Wiedererkennungsschema (Recognition); ein Feedforward-Modell mit den erwarteten sensorischen Konsequenzen der Bewegung. Über einen Fehlererkennungsmechanismus werden die erwartete



ten mit den tatsächlichen sensorischen Konsequenzen abgeglichen und die Schemata dementsprechend angepasst. Die Idee eines an Bewegungskontrolle und -lernen beteiligten Feedforward-Modells wurde auch in der deutschsprachigen sportmotorischen Literatur aufgegriffen. So geht Hoffmann (1993) in seinem Konzept der Antizipativen Verhaltenskontrolle davon aus, dass bei gegebener Ausgangssituation und gegebener Antwort, die Kopplung zwischen Ausgangsposition Antwort und Effekt verstärkt wird, wenn die antizipierten Verhaltenseffekte mit dem tatsächlichem Verhalten übereinstimmen.

#### Kategorie: Programmtheorien

Schmidt, R. A. & Wrisberg, C. A. (1973). Further tests of Adams' Closed-Loop Theory: Response-produced feedback and the error detection mechanism. *Journal of Motor Behavior*, 5 (3), 155–164. [33 Zitationen, Januar 2019, Google Scholar]

**Hintergrund:** In seiner Closed-Loop Theorie des motorischen Lernens postulierte Adams' (1971) die Existenz zweier unterschiedlicher Repräsentationsstränge einer Bewegung innerhalb eines i) Wiedergabe- und ii) Wiedererkennungsschemas. Für Adams stellte der erste Strang ein grobes motorisches Programm dar, das die generellen Koordinaten der Bewegung kodiert und der zweite eine Repräsentation der sensorischen Konsequenzen. Der Abgleich der tatsächlichen und erwarteten sensorischen Konsequenzen führt nach Adams zu motorischen Lernprozessen. Für Schmidt ergaben sich aus dieser Theorie klare Hypothesen, die er in verschiedenen Experimenten überprüfte. Dabei waren für ihn vor allem ballistische Positionierungsbewegungen interessant, da bei diesen, aufgrund der Dauer der Verschaltung von Feedbackschleifen, der Wahrnehmungsstrang keine Rolle bei der Bewegungsentstehung spielen konnte.

**Methoden:** Die Studienteilnehmer\_innen (insgesamt nahmen 54 Studierende der Universität Michigan) bekamen die Aufgabe einen Hebel auf einer Schiene in genau 200 ms ca. 60 cm von einer Position zu einer anderen zu schieben. Die temporale Abweichung von der Zielvorgabe galt dabei als Maß der Qualität der Bewegungsausführung. Die Probanden führten insgesamt 45 Übungsdurchgänge durch. Nach jedem der ersten 20 Durchgänge erhielten die Probanden explizite Information zu ihrem Bewegungsergebnis (Knowledge of Results, KR), während der weiteren 25 Durchgängen erhielten sie kein Feedback. In zwei Gruppen manipulierten die Autoren dabei, ob den Probanden sensorisches Feedback (sowohl visuell und auditiv) der Bewegung zur Verfügung stand oder nicht.

**Ergebnisse und Diskussion:** Trotz der unterschiedlichen Qualität der sensorischen Informationen waren

die Lernfortschritte beider Gruppen innerhalb der ersten 20 Übungsdurchgängen (KR) ähnlich. Auch nachdem beiden Gruppen KR vorenthalten wurde, zeigte sich zwar eine Verschlechterung in der Ausführungsleistung beider Gruppen, es konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen festgestellt werden. Dieses Ergebnis widersprach Adams' Idee, dass der Wahrnehmungsstrang, über einen Abgleich der tatsächlichen mit den erwarteten sensorischen Konsequenzen einer Bewegung, grundlegend für das motorische Lernen ist. Wenige Jahre später entwickelte Schmidt (1975) seine Schematheorie des motorischen Lernens, die auf der einen Seite die bereits vorhandenen Stärken aus Adams' Theorie übernahm, jedoch auf der anderen Seite Open-Loop Prozesse als Grundlage der Bewegungssteuerung voraussetzt.

Die theoretischen Arbeiten zum Bewegungslernen aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (Adams, 1971; Schmidt 1975) waren insofern wegweisend, da sie eine Vielzahl an Untersuchungen zur Folge hatten, die einerseits die Vorhersagen der Theorie testeten und aus denen andererseits auch direkte praktische Empfehlungen für das Bewegungslernen abgeleitet wurden. Insbesondere die Frage, wie häufig bzw. in welcher Frequenz externes KR Bewegungslernen positiv beeinflusst, wurde in verschiedenen Studien untersucht (Wrisberg & Wulf, 1997; Wulf, Lee & Schmidt, 1994). Eine Vorhersage der Schematheorie bezieht sich darauf, dass variables Üben zu breiter angelegten Schemata führt und daher vor allem bei offenen Bewegungsfertigkeiten bzw. Transferaufgaben von Vorteil ist, da hier auf eine Vielfalt an Relationen zwischen Bewegungsergebnis und Parametereinstellung aus dem Wiedergabeschema zurückgegriffen werden kann. Schon 1972 postulierte Battig, das Konzept der Kontextuellen Interferenz. In ihrer darauf aufbauenden Studie, bei der Probanden eine Bewegungsaufgabe bei gleicher Aufgabenvariabilität entweder in geblockter oder randomisierter Abfolge durchführten, konnten Shea und Morgan (1979) zeigen, dass ein randomisiertes Üben (Kontextuelle Interferenz) zu besseren Behaltenseffekten (sofern Retention randomisiert getestet wurde) und Transferleistungen führte.

#### Systemdynamische Betrachtung von Lernprozessen

Erklärungsansätze und empirische Untersuchungen zum motorischen Lernen finden sich auch in der dynamischen Systemtheorie. Schöner, Zanone und Kelso (1992) zeigten die Entstehung neuer koordinierte Bewegungsmuster bzw. Attraktoren am Beispiel des Haken-Kelso-Bunz-Modells (Haken et al., 1985). Kostrubiec, Tallet und Zanone

(2006) untersuchten ebenfalls wie Probanden neue relative Phasen (siehe Kasten zur Kategorie „Dynamische Systemtheorien“ im Kapitel „Motorische Kontrolle“) bei zyklischen bimanuellen Fingerbewegungen erlernten, also relative Phasen jenseits der bereits stabilen 0° Inphase und 180° Antiphase (z. B. 90° oder 135°). Die Autoren beobachteten, dass bereits existierende stabile relative Phasen das motorische Lernen beeinflussen können, falls die bestehenden und neugelernten relativen Phasen kompetitiv sind. Dabei zeigte sich, dass neue relative Phasen in manchen Fällen spontan entstehen, also ein altes Koordinationsmuster plötzlich durch ein Neues abgelöst wird (Kostrubiec, Zanone, Fuchs & Kelso, 2012). In der Betrachtungsweise der dynamischen Systemtheorie wird durch motorisches Lernen langfristig die „Potentiallandschaft“ verändert. Durch die Entstehung neuer Attraktoren (und die Auflösung bereits bestehender) können stabile Zustände plötzlich durch neue abgelöst werden (Newell, Liu & Mayer-Kress, 2001).

### Neurophysiologische Ansätze

Parallel zur verhaltenswissenschaftlichen Betrachtung des Lernens, wurde Lernen und Plastizität auch auf (Neuro-)Physiologischer Ebene erforscht. Bereits 1949 stellte der Psychologe Donald Olding Hebb die Hebbsche Lernregel auf. Hierbei gilt, wenn ein Neuron A ein Neuron B der Art erregt, das Neuron B Aktionspotenziale bildet, so wird die Synapse von A auf B verstärkt. D. h., bei einer nachfolgenden Erregung des Neurons A wird es aufgrund metabolischer Veränderungsprozessen an den Synapsen wahrscheinlicher, dass auch B erregt wird. Dieser Befund wird mit dem Theorem „what fires together, wires together“ gekennzeichnet. Spezialformen dieses Lernens findet man im Kleinhirn als überwachtetes Lernen (Wolpert, Miall, & Kawato, 1998) und in den Basalganglien als Belohnungslernen (Schultz, Dayan, & Montague, 1997). Erste systematische Nachweise, dass auch im erwachsenen Gehirn noch strukturelle Änderungen stattfinden stammen aus der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. In der Motorikforschung spiegelt sich diese Frage bis in die 1990er Jahre unter dem Sprichwort „Was Hänschen nicht Lernt, lernt Hans nimmer mehr“ und in der Diskussion zum besten motorischen Lernalter wider (womit der Kreis zur Motorischen Entwicklung wieder geschlossen wäre).

## Zusammenfassende Betrachtung

Ziel des Beitrags war es, einen Überblick über die Strömungen der Motorikforschung und seiner Teilbereiche Motorische Entwicklung, Motorische Kontrolle und Moto-

risches Lernen seit Beginn des 20. Jahrhunderts zu geben. Jedes Teilgebiet hat eine wissenschaftliche Grundlage von substanzieller Größe geschaffen. Ursprünglich in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen (u. a. Physik, Physiologie, Psychologie, Sportunterricht) entstanden, konvergieren diese drei Teilbereiche nun zu dem großen Bereich des motorischen Verhaltens. Dieser Trend begann in den 1980er Jahren für die motorische Kontrolle und die motorische Entwicklung, als beide Bereiche die gleichen theoretischen Grundlagen (z. B. Informationsverarbeitungsansatz, dynamische Systemtheorie) verwendeten. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts gewinnt insbesondere die motorische Kontrolle mit ihrem Fokus auf die neuronalen Mechanismen, die der motorischen Leistungsfähigkeit und dem Lernprozess zugrunde liegen, eindeutig an Bedeutung.

Viele dieser Strömungen haben in die deutsche Motorikforschung Eingang gefunden und auch deutsche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben mit wegweisenden Artikeln ihren Beitrag hierzu geleistet (Baur, 1989; Bös & Mechling, 1983; Hossner, 1995; Konczak, Jansen-Osmann & Kalveram, 2003; Roth, 1989; Schöllhorn 1998; Schöner, 1989; Willimczik & Roth, 1983; Wollny, 2002; Wulf, 2013; Wulf & Lewthwaite, 2016). Die geringe Anzahl von Beiträgen zu diesen Themengebieten in der Zeitschrift für Sportpsychologie (s. Abb. 1) mag verschiedenste Gründe haben. Sicherlich trägt auch die massive Internationalisierung der deutschen sportpsychologischen und bewegungswissenschaftlichen Forschung sowie die Karriereplanung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern hierzu bei, dass viele Originalarbeiten von deutschsprachigen Autorinnen und Autoren nicht (mehr) in der Zeitschrift für Sportpsychologie, sondern in englischsprachigen Zeitschriften veröffentlicht werden.

Trotz des großen Vorteils motorische Verhaltensweisen direkt beobachten zu können, begannen Wissenschaftler erst Anfang des letzten Jahrhunderts die motorische Entwicklung – auch experimentell – zu untersuchen. Die Theorien zur motorischen Entwicklung haben sich insbesondere dahingehend verändert, dass sie zum einen neue Strömungen aus Disziplinen wie Psychologie, Embryologie, Neurologie und Biologie aufgegriffen haben und zum anderen deren Überprüfbarkeit durch den Einsatz moderner Technologien (u. a. Hochgeschwindigkeitskameras, Wearable Sensors, Virtual Reality, fNIRS, EEG) und Analysemöglichkeiten (z. B. maschinelle Lernalgorithmen, 3D-Techniken) verbessert haben. Dies hat die Hinwendung von einer bloßen Beschreibung motorischer Fertigkeiten zu Themenfeldern wie den neuronalen Aspekten der motorischen Fertigkeitsentwicklung, Plastizität, Embodied Cognition, oder auch kritischen und sensitiven Phasen in der Interaktion von motorischer und kognitiver

**Tabelle 3.** Übersicht der verschiedenen Strömungen und zugehörigen Teilgebiete des Forschungsgebiets des motorischen Lernens

Theorie	Kurzbeschreibung	Zentrales Paradigma	Population	Zentrale Publikationen
<b>Assoziationslernen / Behaviorismus (1898 bis heute)</b>				
Lernen durch Versuch und Irrtum, Gesetz des Effekts	Reaktionen, die wiederholt zu positiven Konsequenzen führen werden verstärkt (Versuch und Irrtum, Gesetz des Effekts)	Problemkäfige aus denen sich Katzen durch Drücken von Hebeln oder Ziehen von Seilzügen befreien konnten	Tiere (Katzen)	Thorndike, 1898
Klassische Konditionierung	Reflexe rufen auf bestimmten (konditionierten) Reiz hin immer gleiche Reaktionen hervor Assoziation neutralen Stimulus mit konditionierter Reaktion	Experimente zum Speichelfluss (unkonditionierte Reaktion): Ursprünglich neutraler Reiz (Glocke) wird wiederholt mit Futter (unkonditionierter Reiz) präsentiert und erwirbt Fähigkeit (konditionierter Reiz) Speichelfluss auszulösen (konditionierte Reaktion)	Tiere (Hunde)	Pavlov, 1927
Operante Konditionierung (instrumentelles / mechanistisches Lernen)	Neue Verhaltensweisen werden in Abhängigkeit davon gelernt, ob bestimmte Assoziation von Stimulus und Reaktion belohnt oder bestraft wird	Skinnerbox: Tauben bekamen in konstanten Zeitintervallen Futterpellets. Sie verhielten sich als ob kausale Beziehung zwischen Futtergabe und Verhalten bestünde → Verstärkung des Verhaltens durch Belohnung	Tiere (Tauben, Mäuse, Ratten)	Skinner, 1938
<b>Lernverläufe (1897 – heute)</b>				
Lernphasen und Lernverläufe	Kontinuierliche Lernkurven (Power-Law of Practice, Exponentialfunktionen, S-Shaped Learning Functions)	Kontinuierliche Dokumentation der Ausführungsleistung motorischer Fertigkeiten im Lernverlauf und mathematische Modellierung der Lernkurve	Gesunde Erwachsene	Bryan & Harter, 1897; Snoddy, 1926; Crossman, 1959
Lernstufen	Lernen als zwei bzw. dreistufiger Prozess mit Fokus auf unterschiedlichen Domänen (z. B. Änderungen kognitiver Kontrolle) und Phänomenen (Einfrieren und Lösen von Freiheitsgraden)	Eher Beschreibungen phänomenologischer Besonderheiten als eigenständige Theorie	–	Bernstein, 1967; Fitts & Posner, 1967; Gentile, 1972; Meinel & Schnabel, 1998
<b>Kognitive Ansätze (1965 bis heute)</b>				
Theorie der Antizipativen Verhaltenskontrolle, motorisches Sequenzlernen	Stärke der Assoziation zwischen willkürlichem Verhalten und antizipiertem Effekt ist entscheidend für Verhalten in bestimmten Situationen, um intendierte Ereignisse in Umwelt zu erzeugen	Theoretische Überlegungen	–	Hoffmann, 1993
Implizites Lernen	Wissen wird erworben, ohne dass Lernende darüber Kenntnis erlangen	Künstliche Grammatiken, beim Problemlösen	Gesunde Erwachsene	Reber, 1967
Beobachtungslernen, Lernen am Modell, sozialkognitives Lernen, Imitationslernen	Lernen basiert auf stellvertretenden Erfahrungen, die durch Beobachtung anderer Personen gemacht werden; soziale Folgen erwünschten / unerwünschten Verhaltens werden berücksichtigt	Kinder sahen Filme zu aggressiven Verhaltensweisen. Nach Film zeigten Kinder ähnliche aggressive Handlungen wie beobachtet.	Kinder	Bandura, 1965 & 1976; Miller & Dollard, 1941
Hierarchische Kontrollprozesse	Prozesse der Open-Loop- und hierarchischen Steuerung	Relais-Steueraufgabe mit drei verschiedenen Anzeigebedingungen	Erwachsene	Pew, 1974

**Tabelle 3.** Übersicht der verschiedenen Strömungen und zugehörigen Teilgebiete des Forschungsgebiets des motorischen Lernens (Fortsetzung)

Theorie	Kurzbeschreibung	Zentrales Paradigma	Population	Zentrale Publikationen
OPTIMAL (Optimizing Performance Through Intrinsic Motivation and Attention for Learning) Theorie	Kombination von Aufmerksamkeit (externer Fokus) und Motivation (Autonomie & gesteigerte Erwartungen) zur Steigerung von Lernen und Leistung	Experimente zu Feedback, wahrgenommener Aufgabenschwierigkeit, optische Illusion, Fähigkeitskonzept, Belohnung etc.	Gesunde Erwachsene, Parkinson-patienten	Wulf & Lewthwaite, 2016
<b>Programmorientierte Theorien motorischen Lernens (1971 bis 1995)</b>				
Closed Loop	Fortlaufende Verfeinerung der sensomotorischen Feedback-Kontrolle mit Ziel der Regulation des Bewegungsfehlers	Langsame feedbackintensive Nachverfolgungsaufgaben (z. B. Pursuit Rotor Task)	Gesunde Erwachsene	Adams, 1971
Schematheorie	Lernen von Recall & Recognition Schemata für Erwerb generalisierter motorischer Programme	Schnelle ballistische Positionierungsbewegungen, systematische Variation der sensorischen Informationen und Rückmeldung über Bewegungsergebnis (Knowledge of Results)	Gesunde Erwachsene	Schmidt & White, 1972; Schmidt & Wrisberg, 1973; Schmidt, 1975
<b>Lernbedingungen / Informationsverarbeitung (1979 – heute)</b>				
Kontextuelle Interferenz	Übungspläne: Verteiltes und massiertes Üben / Part und Whole-Practice / Übungsvariabilität (s. Schematheorie)	Erlernen von drei motorischen Bewegungsmustern	Gesunde Erwachsene	Shea & Morgan, 1979
Augmented Feedback / Rückmeldung / Guidance Hypothese / Valenz	Intrinsische und extrinsische Rückmeldungen, Feedback, Knowledge of Results/Performance	Armflexionsaufgabe mit unterschiedlichem Feedback (Feedback nach 5%, 10 % Abweichung zum Soll-Wert, Kontrollgruppe mit steigendem Feedback)	Gesunde Erwachsene	Salmoni, Schmidt & Walter, 1984; Sherwood & Canabal, 1988; Wulf, Schmidt & Deubel, 1993
Instruktion / Aufmerksamkeitsfokus: Constraint action Hypothese / Bewegungsregeln, Analogien	Ausrichtung des Aufmerksamkeitsfokus (Internal vs. external)	Posturale Kontrollaufgaben (z. B. Skisimulator, Stabilometer), später auch Golf	Gesunde Erwachsene	Wulf, Hoß & Prinz, 1998; Wulf, McNevin & Shea, 2001; Wulf, 2013
Sensomotorische Adaptation	Beteiligung sensorischer, motorischer & neuronaler Prozesse bei der Anpassung von Bewegungsmustern an veränderte äußere Bedingungen	Armbewegung mit visuellen Feedback unter verschiedenen Bedingungen	Gesunde Erwachsene	Kagerer, Contreras-Vidal & Steilmach, 1997; Shadmehr & Moussavi, 2000
Optimal-Challenge Point Theory	Lernen steht im Zusammenhang mit Aufgabencharakteristik und Qualifikationsniveau der Person	Theoretische Überlegungen zur Gestaltung von Trainingsprozessen	Kinder und Studierende	Guadagnoli & Lee, 2004; Brady's, 1998; Herbert, Landin & Solomon, 1996
<b>Systemdynamische Ansätze (1989 bis heute)</b>				
Dynamische Systemtheorie	Bewegungslernen ist durch Änderungen in der Potentiallandschaft gekennzeichnet. Neue Attraktoren & stabile Zustände entstehen infolge des Lernens. Lernprozesse finden unter dynamischen Wechselwirkungen auf allen Systemebenen statt (z.B. einzelne Zellen und neuronale Netzwerke). Verhaltensänderungen können sich spontan (i.e. Bifurkation) einstellen.	Haken-Kelso-Bunz-Modell gekoppelter Fingerbewegungen. Neue relative Phasen können gelernt werden. Lernprozess wird von intrinsischer Dynamik bestimmt	Gesunde Erwachsene	Schöner, 1989; Schöner, Zanone & Kelso, 1992; Kostrubiec, Zanone, Fuchs & Kelso, 2012; Newell, Liu & Mayer-Kress, 2001



**Tabelle 3.** Übersicht der verschiedenen Strömungen und zugehörigen Teilgebiete des motorischen Lernens (Fortsetzung)

Theorie	Kurzbeschreibung	Zentrales Paradigma	Population	Zentrale Publikationen
Differenzielles Lernen	Übertragung der dynamischen Systemtheorie in Praxis des Bewegungslernens (nicht unumstritten); durch Variation der Bewegungsausführung (Fehlerlernen) wird System breites Spektrum möglicher Lösungen dargeboten.	Frühe Studien insbesondere in Leichtathletik (z.B. Erlernen einer Kugelstoßbewegung); Vergleich klassischer Übungsreihen (z.B. vom Einfachen zum Schweren) mit differenziellen (ständige Variation verschiedener Parameter)	Gesunde Erwachsene	Schöllhorn, 1998; Beckmann & Schöllhorn, 2006
<b>Neurophysiologische Ansätze (1949 bis heute)</b>				
Mirror Neurons	Spezifische Neuronen im visuomotorischen System sind bei Bewegungsbeobachtung aktiv	Wenn Affe anderen Affen beobachtet, der seinen Arm zum Greifen austreckt, feuern Neuronen in prämotorischen Kortex	Tiere (Primaten)	Rizzolatti & Craighero, 2004
Hebbsches Lernen	Wenn Neuron A ein Neuron B der Art erregt, das Neuron B Aktionspotenziale bildet, so wird Synapse von A auf B verstärkt	Experimente zu Veränderungen der synaptischen Übertragung zwischen Neuronen, Theoretische Überlegungen	Einzelzellableitungen	Hebb, 1949
Belohnungslernen	Im mesolimbischen System, dopaminerge Neurone	Konditionierungsexperimente	Tiere (Primaten), Patient_innen	Schultz et al., 1997

Entwicklung möglich gemacht (Anderson, 2018). Diese Hinwendung zu einer offenen, disziplinübergreifenden Entwicklungswissenschaft ermöglicht die systematische Untersuchung der fünf W-Fragen (Lerner, 2006): (1) Welche Merkmale von (2) welchen Individuen in Bezug zu (3) welchen Kontextbedingungen bringen zu (4) welchen Zeitpunkten (5) welche Entwicklungen hervor? Nur auf der Basis der Beantwortung dieser Fragen wird es möglich sein, effektive Präventions- und Interventionsansätze zur Förderung motorischer, kognitiver, psychischer und emotionaler Kompetenzen über die Lebensspanne planen können.

Wie aus diesem Beitrag hervorgeht, ist eine exakte Beschreibung der motorischen Kontrollmechanismen beim Menschen bis heute nicht gelungen. Der aktuelle Entwicklungsstand in der Robotikforschung (z. B. bei der Imitation des menschlichen Gangs) macht dies besonders deutlich. So sind die Bewegungen humanoider Roboter noch weitgehend „unmenschlich“ und veranschaulichen sehr schön das Forschungsdefizit im Bereich motorischer Kontrolle. Die ingenieurwissenschaftliche Herangehensweise bestimmte Optimierungsprinzipien als Grundlage der Bewegungskontrolle anzunehmen, wie z.B. eine Minimierung des Rucks (Flash & Hogan, 1985) oder auch der Drehmomentänderung im Gelenk (Uno, Kawato & Suzuki, 1989), scheint zwar bei isolierten Bewegungen gut zu funktionieren, sobald allerdings Redundanzen in der Organisation der Freiheitsgrade auftreten und dadurch (theoretisch) unendlich viele Lösungen für dasselbe Bewegungsergebnis möglich sind, scheint der Raum dieser unterschiedlichen Möglichkeiten auch bis zu einem gewissen Grad ausgenutzt zu werden (Latash, 2012). Das Problem der Freiheitsgrade und der daraus resultierenden Variabilität in der Bewegungsausführung und im Bewegungsergebnis scheint nach wie vor zentral. Die Uncontrolled-Manifold-(UCM)-Hypothese (Scholz & Schöner, 1999) bietet hier eine Möglichkeit der Operationalisierung. Der Lösungsraum kann demnach berechnet und die Stabilität eines Bewegungsergebnisses in Relation zur Variabilität der Organisation betrachtet werden. Sie ermöglicht damit eine dezidierte Betrachtung der Variabilität auf allen Ebenen des Bewegungssystems und die Unterscheidung zwischen funktionaler und dysfunktionaler Variabilität in der Bewegungsausführung. Dieses Konzept wird sicherlich – gepaart mit neuronalen Modellierungen und neurophysiologischen Methoden – auch in Zukunft eines der großen Themen der Motorikforschung sein.

Auch im Bereich Motorisches Lernen lassen sich unterschiedliche konzeptuelle Herangehensweisen unterscheiden (s. Tab. 3); und nicht alle Lernkonzepte stehen widerspruchsfrei nebeneinander. Zudem sind die Betrachtungsebene der Konzepte und die betrachteten Lernparadigmen sehr unterschiedlich. Deutlich wird dies z.B.

in der unterschiedlichen Auffassung neurowissenschaftlicher und motorischer Definitionen von Lernen und Kontrolle. Rein physiologisch betrachtet beinhaltet jede Bewegungskontrolle immer auch ein „Wiedererlernen“ der Bewegung selbst und damit sind Lernen und Kontrolle nicht eindeutig trennbar. Theorien und Modelle haben unterschiedliche Betrachtungsebenen (z.B. Zelle, Zellverbände, Muskelsynergien, Individuum) und Abstraktionsniveaus und damit unterschiedliche Erklärungswerte. Die Einbeziehung unterschiedlicher Betrachtungsebenen und Teildisziplinen ermöglicht eine umfassende Betrachtung des Phänomens Lernen. Darüber hinaus werden in aktuellen theoretischen Strömungen auch Zustände und Eigenschaften des Individuums ins Zentrum der Betrachtung gerückt. So ist der Ausgangspunkt der OPTIMAL Theorie von Wulf (Wulf & Lewthwaite, 2016) die Annahme, dass die Motivation des Individuums, seine Erwartungen und seine Autonomie im Übungsprozess, und der Aufmerksamkeitsfokus des Individuums die motorische Leistung und das motorische Lernen maßgeblich beeinflussen. Zurückgeführt wird diese Annahme nicht nur auf verhaltens-, sondern auch auf neurophysiologische Erklärungsansätze und Befunde. Die OPTIMAL Theorie ist ein Beispiel wie unterschiedliche Faktoren und Betrachtungsweisen zur Erklärung eines Phänomens zusammengeführt werden können, um so einen ganzheitlicheren Blick auf ein Phänomen zu ermöglichen. Gerade in der Untersuchung des Zusammenspiels der verschiedenen Faktoren und deren kombinierten Effekt hinsichtlich der Verbesserung motorsicher Lernprozesse liegt kurz- und mittelfristig erheblicher Forschungsbedarf mit beträchtlicher praktischer Relevanz.

Zukünftige Motorikforschung wird von einer multi- oder sogar interdisziplinären Betrachtung des Gegenstandsbereichs profitieren. Die Neurophysiologie erklärt das Phänomen dabei auf einer anderen Betrachtungsebene als Theorien zur Informationsverarbeitung oder die Systemdynamik. Zukünftige Modelle und Theorien, bei denen sich die verschiedenen Ansätze gegenseitig befruchten (können), insbesondere in Form von übergeordneten Theorien, haben das Potential die Entwicklung, Kontrolle und das Lernen menschlicher Bewegung auf verschiedenen Ebenen des Verhaltens umfassender zu beschreiben und vorherzusagen.

## Literatur

- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111 – 150.
- Adolph, K. E. (1997). Learning in the development of infant locomotion. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 62.
- Adolph, K. E. (2000). Specificity of learning: Why infants fall over a veritable cliff. *Psychological Science*, 11, 290 – 295.
- Adolph, K. E. & Avolio, A. M. (2000). Walking infants adapt locomotion to changing body dimensions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26, 1148 – 1166.
- Adolph, K. E. & Franchak, J. M. (2017). The development of motor behavior. *WIREs Cognitive Science*, 8, e1430. <https://doi.org/10.1002/wcs.1430>
- Adolph, K. E. & Hoch, J. E. (2019). Motor development: Embodied, embedded, enculturated, and enabling. *Annual Review of Psychology*, 70, 141 – 164.
- Adolph, K. E. & Kretch, K. S. (2012). Infants on the edge: Beyond the visual cliff. In A. Slater & P. Quinn (Eds.), *Developmental psychology: Revisiting the classic studies* (pp. 36 – 55). London: Sage Publications.
- Adolph, K. E. & Robinson, S. R. (2013). The road to walking: What learning to walk tells us about development. In P. Zelazo (Ed.), *Oxford handbook of developmental psychology* (Vol. 1, pp. 403 – 443). NY: Oxford University Press.
- Adolph, K. E. & Robinson, S. R. (2015). Motor development. In R. M. Lerner (Series Ed.), L. Liben & U. Müller (Vol. Eds.), *Handbook of child psychology and developmental science: Vol. 2. Cognitive processes* (7th ed., pp. 114 – 157). New York: Wiley.
- Anderson, D. (2018). Motor development: Far more than just the development of motor skills. *Kinesiology Review*, 7, 99 – 114.
- Asmussen, E. & Heebøll-Nielsen, K. (1955). Dimensional analysis of physical performance and growth in boys. *Journal of Applied Physiology*, 7, 593 – 603.
- Baltes, P. B. (1987). Theoretical propositions of lifespan developmental psychology on the dynamics between growth and decline. *Developmental Psychology*, 23, 611 – 626.
- Bandura, A. (1965). Influence of models' reinforcement contingencies on the acquisition of imitative responses. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1, 589 – 595. <https://doi.org/10.1037/h0022070>
- Bandura, A. (1976). *Lernen am Modell: Ansätze zu einer sozial-kognitiven Lerntheorie*. Stuttgart: Klett.
- Bassett, D. S. & Mattar, M. G. (2017). A network neuroscience of human learning: potential to inform quantitative theories of brain and behavior. *Trends in Cognitive Science*, 21, 250 – 264.
- Battig, W. F. (1972). Intratask interference as a source of facilitation in transfer and retention. In R. F. Thompson & J. F. Voss (Eds.), *Topics in learning and performance* (pp. 131 – 159). New York: Academic Press.
- Baur, J. (1989). *Körper- und Bewegungskarrieren*. Schorndorf: Hofmann.
- Bayley, N. (1969). *Manual for the Bayley Scales of Infant Development*. New York: The Psychological.
- Beckmann, H. & Schöllhorn, W. I. (2006). Differenzielles Lernen im Kugelstoßen. *Leistungssport*, 36 (4), 44 – 50.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Oxford, New York: Pergamon Press.
- Bizzi, E., Mussa-Ivaldi, F. & Giszter, S. (1991). Computations underlying the execution of movement: A biological perspective. *Science*, 253 (5017), 287 – 291. <https://doi.org/10.1126/science.1857964>
- Bo, J., Contreras-Vidal, J. L., Kagerer, F. A. & Clark, J. E. (2006). Effects of increased complexity of visuo-motor transformations on children's arm movements. *Human Movement Science*, 25, 553 – 567.
- Bös, K., & Mechling, H. (1983). *Dimensionen sportmotorischer Leistung*. Schorndorf: Hofmann.
- Brady, F. (1998). A Theoretical and Empirical Review of the Contextual Interference Effect and the Learning of Motor Skills. *Quest*, 50, 266 – 293. <https://doi.org/10.1080/00336297.1998.10484285>

- Branta, C. F. & Goodway, J. D. (1996). Facilitating social skills in urban school children through physical education. *Peace and Conflict: Journal of Peace Psychology*, 2, 305.
- Branta, C., Haubenstricker, J. & Seefeldt, V. (1984). Age changes in motor skill during childhood and adolescence. In R. L. Terjung (Ed.), *Exercise and sport science reviews* (Vol. 12, pp. 467–520). Lexington, MA: Collamore.
- Bronfenbrenner, U. (1968). Early deprivation: a cross-species analysis. In G. Newton & S. Levine (Eds.), *Early experience and behavior*. Springfield, Ill.: Charles C. Thoma.
- Brown, T. G. (1911). The intrinsic factors in the act of progression in the mammal. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 84, 308–319. <https://doi.org/10.1098/rspb.1911.0077>
- Brown-Lum, M. & Zwicker, J. G. (2015). Brain imaging increases our understanding of Developmental Coordination Disorder: A review of literature and future directions. *Current Developmental Disorders Reports*, 2, 131–140.
- Bryan, W. L. & Harter, N. (1897). Studies in the physiology and psychology of the telegraphic language. *Psychological Review*, 4, 27–53.
- Burke, R. E. (2007). Sir Charles Sherrington's the integrative action of the nervous system: A centenary appreciation. *Brain*, 130 (Pt 4), 887–894. <https://doi.org/10.1093/brain/awm022>
- Cesari, P. & Newell, K. M. (2000). The body scaling of grip configurations in children aged 6–12 years. *Developmental Psychobiology*, 36, 301–310.
- Clark, J. E. (1982). The role of response mechanisms in motor skill development. In J. A. S. Kelso & J. E. Clark (Eds.), *The development of movement control and coordination* (pp. 151–173). London: John Wiley.
- Clark, J. E. (2017). Pentimento: A 21st century view on the canvas of motor development. *Kinesiology Review*, 6, 232–239.
- Clark, J. E., Bardid, F., Getchell, N., Robinson, L. E., Schott, N. & Whittall, J. (in press). Reflections on the evolution of motor development research: Six studies that changed the field. *Journal of Motor Learning and Development*.
- Connolly, K. J. (1970). *Mechanisms of motor skill development*. New York: Academic Press.
- Crossman, E. (1959). A theory of the acquisition of speed-skill. *Ergonomics*, 2, 153–166.
- Darwin, C. (1877). Biographical sketch of an infant. *Mind*, 2, 285–294.
- Davids, K., Bennett, S. & Newell, K. M. (2006). *Movement system variability*. Stanningley, UK: Human Kinetics.
- Deutsch, K. M. & Newell, K. M. (2005). Noise, variability, and the development of children's perceptual-motor skills. *Developmental Review*, 25, 155–180.
- Dewhurst, D. J. (1967). Neuromuscular control system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BME-14* (3), 167–171. <https://doi.org/10.1109/TBME.1967.4502494>
- Diedrich, F. J. & Warren, W. H., Jr. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 183–202.
- Espenshade, A. S. (1963). Restudy of relationships between physical performances of school children and age, height, and weight. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 34, 144–153.
- Faisal, A. A., Selen, L. P. & Wolpert, D. M. (2008). Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, 9, 292–303. <https://doi.org/10.1038/nrn2258>
- Feldman, A. G. (1966). On the functional tuning of the nervous system in movement control or preservation of stationary pose. II. Adjustable parameters in muscles. *Biofizika*, 11, 498–508.
- Feldman, A. G. (1986). Once More on the Equilibrium-Point Hypothesis ( $\lambda$  Model) for Motor Control. *Journal of Motor Behavior*, 18, 17–54.
- Feldman, A. G. (2015). *Referent control of action and perception. Challenging controversial theories in behavioral neuroscience*. New York: Springer.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381–391.
- Fitts, P. M. & Posner, M. I. (1967). *Human performance*. Belmont, CA: Brooks/Cole Pub. Co.
- Flash, T. & Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5, 1688–1703. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.05-07-01588.1985>
- Forssberg, H., Grillner, S., Halbertsma, J. & Rossignol, S. (1980). The locomotion of the low spinal cat. II. Interlimb coordination. *Acta Physiologica Scandinavica*, 108, 283–295.
- Francis, B. A. & Wonham, W. M. (1976). The internal model principle of control theory. *Automatica*, 12, 457–465. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(76\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0005-1098(76)90006-6)
- French, P. A. (1998). One concept, multiple meanings: On how to define the concept of implicit learning. In M. A. Stadler & P. A. Frensch (Eds.), *Handbook of implicit learning* (pp. 47–104). Thousand Oaks: Sage.
- Gentile, A. M. (1972). A working model of skill acquisition with application to teaching. *Quest*, 17, 3–23.
- Gesell, A. (1928). *Infancy and human growth*. New York: Macmillan.
- Gesell, A. & Thompson, H. (1934). *Infant behavior: Its genesis and growth*. New York: McGraw-Hill.
- Gibson, E. J. & Pick, A. D. (2000). *An ecological approach to perceptual learning and development*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Gibson, E. J. & Walk, R. D. (1960). The “visual cliff”. *Scientific American*, 202, 64–71.
- Gibson, J. J. (1969). *Principles of perceptual learning and development*. New York, NY: Appleton Century Crofts.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston, MA: Houghton, Mifflin and Company.
- Goodale, M. A. & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20–25.
- Goodway, J. D. & Rudisill, M. E. (1996). Influence of a motor skill intervention program on perceived competence of at-risk African American preschoolers. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 13, 288–301.
- Goodway, J. D. & Rudisill, M. E. (1997). Perceived physical competence and actual motor skill competence of African American preschool children. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 14, 314–326.
- Graziano, M. S., Taylor, C. S., Moore, T. & Cooke, D. F. (2002). The cortical control of movement revisited. *Neuron*, 36, 349–362.
- Greeff, J. W. de, Bosker, R. J., Oosterlaan, J., Visscher, C. & Hartman, E. (2018). Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: a meta-analysis. *Journal of Science & Medicine in Sport*, 21, 501–507.
- Grimpampi, E., Masci, I., Pesce, C. & Vannozzi, G. (2016). Quantitative assessment of developmental levels in overarm throwing using wearable inertial sensing technology. *Journal of Sports Science*, 34, 1759–1765.
- Guadagnoli, M. A. & Lee, T. D. (2004). Challenge point: A framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 36, 212–224.
- Hadders-Algra, M. (2000). The neuronal group selection theory: An attractive framework to Explain variation in normal motor development. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42, 566–572.
- Hadders-Algra, M. (2010). Variation and variability: Key words in human motor development. *Physical Therapy*, 90, 1823–1837.



- Haken, H. (1977). *Synergetics – An Introduction: nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry, and biology*. Berlin; New York: Springer.
- Haken, H., Kelso, J. A. & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347 – 356. <https://doi.org/10.1007/BF00336922>
- Hall, B. K. & Hörstadius, S. (1988). *The neural crest*. London: Oxford Science Publications.
- Halverson, L. E. (1966). Development of motor patterns in young children. *Quest*, 6, 44 – 53.
- Hamilton, M., Goodway, J. & Haubenstricker, J. (1999). Parent-assisted instruction in a motor skill program for at-risk preschool children. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 16, 415 – 426.
- Hardwick, R. M., Caspers, S., Eickhoff, S. B. & Swinnen, S. P. (2018). Neural correlates of action: Comparing meta-analyses of imagery, observation, and execution. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 94, 31 – 44. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.08.003>
- Harter, S. (1999). *The construction of the self: A developmental perspective*. New York: Guilford.
- Haywood, K. M., Williams, K. & VanSant, A. (1991). Qualitative assessment of the backswing in older adult throwing. *Research Quarterly of Exercise & Sport*, 62, 340 – 343.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. New York: Wiley & Sons.
- Hellebrandt, F. A., Rarick, G. L., Glassow, R. & Carns, M. L. (1961). Physiological analysis of basic motor skills: I. Growth and development of jumping. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 40, 14 – 25.
- Hebert, E. P., Landin, D. & Solmon, M. A. (1996). Practice schedule effects on the performance and learning of low- and high-skilled students: an applied study. *Res Q Exerc Sport*, 67 (1), 52 – 58. <https://doi.org/10.1080/02701367.1996.10607925>
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 11 – 26.
- Hillman, C. H., Kamijo, K. & Scudder, M. (2011). A review of chronic and acute physical activity participation on neuroelectric measures of brain health and cognition during childhood. *Preventive Medicine*, 52 Suppl 1, S21 – 28.
- Holst, E. von & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip: Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie. *Naturwissenschaften*, 37, 464 – 476.
- Hofer, S. M. & Piccinin, A. M. (2010). Toward an integrative science of life-span development and aging. *Journal of Gerontology B: Psychological Sciences & Social Sciences*, 65B, 269 – 278.
- Hofer, S. M., Thorvaldsson, V. & Piccinin, A. M. (2012). Foundational issues of design and measurement in developmental research. In B. Laursen, T. D. Little, & N. A. Card (Eds.), *Handbook of developmental research methods* (pp. 788 – 790). New York: Guilford Press.
- Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen: Hogrefe.
- Hofsten, C. von (2004). An action perspective on motor development. *Trends in Cognitive Science*, 8, 266 – 272.
- Hossner, E.-J. (1995). *Module der Motorik*. Schorndorf: Hofmann.
- Hossner, E.-J., Müller, H. & Voelcker-Rehage, C. (2013). Koordination sportlicher Bewegungen: Sportmotorik. In A. Güllich & M. Krüger (Hrsg.), *Sport: Das Lehrbuch für das Sportstudium* (S. 211 – 267). Berlin: Springer.
- Hyman, R. (1953). Stimulus information as a determinant of reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 45, 188 – 196. <https://doi.org/10.1037/h0056940>
- James, W. (1890). *The principles of psychology, in two volumes*. New York, NY: Henry Holt and Company.
- Jeannerod, M. (2006). *Motor cognition: What actions tell the self*. Oxford: Oxford University Press.
- Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L. & Stelmach, G. E. (1997). Adaptation to gradual as compared with sudden visuo-motor distortions. *Experimental Brain Research*, 115, 557 – 561.
- Karasić, L. B., Adolph, K. E., Tamis-LeMonda, C. S. & Bornstein, M. (2010). WEIRD walking: Cross-cultural differences in motor development. *Behavior and Brain Sciences*, 33, 95.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70, 387 – 403. <https://doi.org/10.1037/h0026739>
- Keele, S. W. & Summers, J. G. (1976). Structure of motor programmes. In G. E. Stelmach (Ed.), *Motor control: Issues and trends* (pp. 109 – 142). New York: Academic Press.
- Kelso, J. A. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology*, 246, R1000 – 1004. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1984.246.6.R1000>
- Kelso, J. A. S. & Schöner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7, 27 – 46.
- Kemper, H. C. C. (1995). *The Amsterdam Growth Study. A longitudinal analysis of health, fitness, and lifestyle*. Champaign-Urbana: Human Kinetics.
- Kephart, N. (1960). *The slow learner in the classroom*. Columbus, OH: C.E. Merrill Books.
- Knol, H., Huys, R., Sarrazin, J.-C., Spiegler, A. & Jirsa, V. K. (2017). Ebbinghaus figures that deceive the eye do not necessarily deceive the hand. *Scientific Reports*, 7, 3111. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02925-4>
- Konczak, J., Jansen-Osmann, P. & Kalveram, K. T. (2003). Development of force adaptation during childhood. *Journal of Motor Behaviour*, 35, 41 – 52.
- Konczak, J., Meeuwssen, H. J. & Cress, M. E. (1992). Changing affordances in stair climbing: the perception of maximum climbability in young and older adults. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 691 – 697.
- Kostrubiec, V., Tallet, J. & Zanone, P.-G. (2006). How a new behavioral pattern is stabilized with learning determines its persistence and flexibility in memory. *Experimental Brain Research*, 170, 238 – 244.
- Kostrubiec, V., Zanone, P.-G., Fuchs, A. & Kelso, J. A. S. (2012). Beyond the blank slate: Routes to learning new coordination patterns depend on the intrinsic dynamics of the learner – experimental evidence and theoretical model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 222. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00222>
- Kretch, K. S. & Adolph, K. E. (2013). Cliff or step? Posture-specific learning at the edge of a drop-off. *Child Development*, 84, 226 – 240.
- Kugler, P., Kelso, J. A. S. & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (Vol. 1, pp. 3 – 47). New York, NY: North-Holland.
- Kugler, P. N., Kelso, J. S. & Turvey, M. T. (1982). On the control and co-ordination of naturally developing systems. In J. A. S. Kelso & J. E. Clark (Eds.), *The development of movement control and co-ordination* (pp. 5 – 78). New York, NY: Wiley.
- Lashley, K. S. (1917). The accuracy of movement in the absence of excitation from the moving organ. *American Journal of Physiology*, 43, 169 – 194.
- Lashley, K. S. (1951). The problem of serial order in behavior. In L. A. Jeffress (Ed.), *Cerebral mechanisms in behavior. The Hixon Symposium* (pp. 112 – 146). New York, NY: Wiley.
- Latash, M. L. (2012). The bliss of motor abundance. *Experimental Brain Research*, 217, 1 – 5.
- Latash, M. L. (2008). Evolution of motor control: From reflexes and motor programs to the equilibrium-point hypothesis. *Journal of Human Kinetics*, 19 (19), 3 – 24.



- Latash, M. L., Scholz, J. P. & Schöner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*, 11, 276 – 308.
- Latash, M. L. & Zatsiorsky, V. M. (2016). *Biomechanics and motor control: Defining central concepts*. Amsterdam: Academic Press.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5, 437 – 459. <https://doi.org/10.1068/p050437>
- Lee, D. N. (1998). Guiding movement by coupling taus. *Ecological Psychology*, 10, 221 – 250. <https://doi.org/10.1080/10407413.1998.9852683>
- Lerner, R. M. (2006). Developmental science, developmental systems, and contemporary theories of human development. In W. Damon (Eds.), *Handbook of child psychology* (Vol. 1, pp. 1 – 17). New York, NY: Wiley.
- Levin, M. F. & Feldman, A. G. (1994). The role of stretch reflex threshold regulation in normal and impaired motor control. *Brain Research*, 657, 23 – 30.
- Lobo, L., Heras-Escribano, M. & Travieso, D. (2018). The history and philosophy of ecological psychology. *Frontiers in Psychology*, 9: 2228. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02228>
- Loeffler, J. L., Raab, M. & Canal Bruland, R. (2016). A lifespan perspective on embodied cognition. *Frontiers in Psychology*, 7: 845. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00845>
- Malina, R. M. (2004). Motor Development during infancy and early childhood: Overview and suggested directions for research. *International Journal of Sport and Health Science*, 2, 50 – 66.
- Marras, N., Eggebrecht, A. T., Todorov, A., Elison, J. T., Wolff, J. J., Cole, L. et al. (2018). Walking, gross motor development, and brain functional connectivity in infants and toddlers. *Cerebral Cortex*, 28, 750 – 763.
- Masci, I., Vannozzi, G., Getchell, N. & Cappozzo, A. (2012). Assessing hopping developmental level in childhood uses wearable inertial sensor devices. *Motor Control*, 16, 317 – 328.
- Masters, R. S. W. (1992). Knowledge, nerves and know-how: The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British Journal of Psychology*, 83, 343 – 358.
- Matthews, P. B. C. (2004). Historical analysis of the neural control of movement from the bedrock of animal experimentation to human studies. *Journal of Applied Physiology*, 96, 1478 – 1485.
- McGraw, M. B. (1935). *Growth: A study of Johnny and Jimmy*. New York, NY: Appleton-Century-Crofts.
- McIntyre, J. & Bizzi, E. (1993). Servo hypotheses for the biological control of movement. *Journal of Motor Behavior*, 25, 193 – 202.
- Meinel, K. & Schnabel, G. (1998). *Bewegungslehre – Sportmotorik: Abriß einer Theorie der sportlichen Motorik unter pädagogischem Aspekt*. Berlin: Sportverlag.
- Merton, P. A. (1953). Speculations on the servo-control of movement. In J. Malcolm & J. A. B. Gray (Eds.), *Ciba Foundation Symposium – The Spinal Cord* (pp. 247). Boston: Little, Brown and Co.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81 – 97.
- Miller, N. E. & Dollard, J. (1941). *Social learning and imitation*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Miller, S. A. (2018). *Developmental research methods* (5th ed.). Thousand Oaks: Sage.
- Morita, T., Asada, M. & Naito, E. (2016). Contribution of neuroimaging studies to understanding development of human cognitive brain functions. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 464. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00464>
- Needham, A. & Libertus, K. (2011). Embodiment in early development. *WIREs Cognitive Science*, 2, 117 – 123.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pp. 341 – 360). Boston: Martin Nijoff.
- Newell, K. M., Liu, Y.-T. & Mayer-Kress, G. (2001). Time scales in motor learning and development. *Psychological Review*, 108, 57 – 82.
- Newell, K. M., McDonald, P. V. & Baillargeon, R. (1993). Body scale and infant grip configuration. *Developmental Psychobiology*, 26, 195 – 205.
- Pavlov, I. P. (1927). *Conditioned reflexes: an investigation of the physiological activity of the cerebral cortex*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Pellegrino, G. di, Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: A neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91, 176 – 180.
- Penfield, W. (1958). *The excitable cortex in conscious man*. Springfield, IL: C.C. Thomas.
- Penfield, W. & Boldrey, E. (1937). Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain*, 60, 389 – 443. <https://doi.org/10.1093/brain/60.4.389>
- Pew, R. W. (1974). Levels of analysis in motor control. *Brain Research*, 71 (2 – 3), 393 – 400.
- Prinz, W., Beisert, M. & Herwig, A. (2013). *Action Science. Foundations of an emerging discipline*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Prinz, W. & Müsseler, J. (2002). Psychologie als Wissenschaft. In Müsseler, J. & Prinz, W. (Hrsg.) *Lehrbuch Allgemeine Psychologie* (S. 1 – 12). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Reber, A. S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 6, 855 – 863.
- Reber, A. S. (1993). *Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious*. New York, NY: Oxford University Press.
- Rempelin, H. (1950). *Die seelische Entwicklung in der Kindheit und Reifezeit. Grundlagen und Erkenntnisse der Kindes- und Jugendpsychologie*. München: Reinhardt.
- Richards, J. E. & Rader, N. (1981). Crawling-onset age predicts visual cliff avoidance in infants. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 382 – 387.
- Ridenour, M. (1974) Influence of object size, speed, and direction on the perception of a moving object. *Research Quarterly. American Alliance for Health, Physical Education and Recreation*, 45, 293 – 301.
- Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169 – 192. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Robinson, L. E., Stodden, D. F., Barnett, L. M., Lopes, V. P., Logan, S. W., Rodrigues, L. P. & D'Hondt, E. (2015). Motor competence and its effect on positive developmental trajectories of health. *Sports Medicine*, 45, 1273 – 1284.
- Rosenbaum, D. A. (2005). The Cinderella of Psychology. The neglect of motor control in the science of mental life and behavior. *American Psychologist*, 60, 308 – 317.
- Roth, K. (1989). *Taktik im Sportspiel. Zum Erklärungswert der Theorie generalisierter motorischer Programme für die Regulation komplexer Bewegungshandlungen*. Schorndorf: Hofmann.
- Salmoni, A. W., Schmidt, R. A. & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95, 355 – 386.
- Savelsbergh, G. J., Whiting, H. T. & Bootsma, R. J. (1991). Grasping tau. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 315 – 322.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225 – 260.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (5th ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A. & White, J. L. (1972). Evidence for an error detection mechanism in motor skills: A test of Adams' closed-loop theory. *Journal of Motor Behavior*, 4, 143 – 153.

- Schmidt, R. A. & Wrisberg, C. A. (1973). Further tests of Adams' closed-loop theory: Response-produced feedback and the error detection mechanism. *Journal of Motor Behavior*, 5, 155 – 164.
- Schöllhorn, W. I. (1998). *Systemdynamische Betrachtung komplexer Bewegungsmuster im Lernprozess. Prozessorientierte Strukturierung der Entwicklung eines Bewegungsablaufs mit Hilfe biomechanischer Beschreibungsgrößen*. Frankfurt a.M.: Lang.
- Scholz, J. P. & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, 126, 289 – 306.
- Schöner, G. (1989). Learning and recall in a dynamic theory of coordination patterns. *Biological Cybernetics*, 62, 39 – 45. <https://doi.org/10.1007/BF00217659>
- Schöner, G., Zanone, P. G. & Kelso, J. (1992). Learning as change of coordination dynamics: Theory and experiment. *Journal of Motor Behavior*, 24, 29 – 48.
- Schott N. & Klotzbier T. (2018). The motor-cognitive connection: Indicator of future developmental success in children and adolescents?! In R. P. Bailey, R. Meeusen, S. Schäfer-Cerasari & P. Tomporowski (Eds.), *Physical activity and educational achievement: Insights from exercise neuroscience* (pp.111 – 129). New York, NY: Routledge.
- Schultz, W., Dayan, P. & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275, 1593 – 1599.
- Shadmehr, R. & Mussa-Ivaldi, F. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience*, 14, 3208 – 3224. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.14-05-03208.1994>
- Shadmehr, R. & Wise, S. P. (2005). *The computational neurobiology of reaching and pointing: A foundation for motor learning*. Cambridge, MA, US: MIT Press.
- Shea, J. B. & Morgan, R. L. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and memory*, 5, 179 – 187.
- Sherrington, C. S. (1906). *The integrative action of the nervous system*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Sherwood, D. E. & Canabal, M. Y. (1988). The effect of practice on the control of sequential and simultaneous actions. *Human Performance*, 1, 237 – 260.
- Shinn, M. W. (1900). *The biography of a baby*. Boston, MA: Houghton Mifflin.
- Shirley, M. M. (1931). *The first 2 years: A study of twenty-five babies*. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- Shirley, M. M. (1963). The motor sequence. In D. Wayne (Ed.), *Readings in child psychology* (pp.72 – 82). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Simons, J., Beunen, G. & Renson, R. (1974). *The Louvain Boys Growth Study*. Leuven: Dept. Physical Education, Catholic University Leuven.
- Skinner, B. F. (1938). *The behavior of organisms: an experimental analysis*. New York, NY: Appleton-Century.
- Snoddy, G. S. (1926). Learning and stability: A psychophysiological analysis of a case of motor learning with clinical applications. *Journal of Applied Psychology*, 10, 1 – 36.
- Sporns, O. & Edelman, G. M. (1993). Solving Bernstein's problem: A proposal for the development of coordinated movement by selection. *Child Development*, 65, 960 – 981.
- Sternad, D. (2000). Debates in dynamics: A dynamical systems perspective on action and perception. *Human Movement Science*, 19, 407 – 423. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(00\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(00)00024-5)
- Stodden, D. F., Goodway, J. D., Langendorfer, S. J., Robertson, M. A., Rudisill, M. E., Garcia, C. & Garcia L. E. (2008) A developmental perspective on the role of motor skill competence in physical activity: An emergent relationship. *Quest*, 60, 290 – 306.
- Stoffregen, T. A., Schmuckler, M. A. & Gibson, E. J. (1987). Use of central and peripheral optical flow in stance and locomotion in young walkers. *Perception*, 16, 113 – 119.
- Stratton, P. M. & Connolly, K. J. (1973). Discrimination by newborns of the intensity, frequency and temporal characteristics of auditory stimuli. *British Journal of Psychology*, 64, 219 – 232.
- Thelen, E. (1979). Rhythmical stereotypies in normal human infants. *Animal Behaviour*, 27, 699 – 715.
- Thelen, E. (1981a). Kicking, rocking, and waving: Contextual analysis of rhythmical stereotypies in normal human infants. *Animal Behaviour*, 29, 3 – 11.
- Thelen, E. (1981b). Rhythmical behavior in infancy: An ethological perspective *Developmental Psychology*, 17, 237 – 257.
- Thelen, E. (1986). Development of coordinated movement: Implications for early development. In H. T. A. Whiting & M. G. Wade (Eds.), *Motor skill acquisition in children* (pp. 107 – 124). Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- Thelen, E. (2000). Motor development as foundation and future of developmental psychology. *International Journal of Behavioral Development*, 24, 385 – 397.
- Thelen, E., Bradshaw, G. & Ward, J. A. (1981). Spontaneous kicking in month-old infants: Manifestation of a human central locomotor program. *Behavioral and Neural Biology*, 32, 45 – 53.
- Thelen, E. & Fisher, D. M. (1982). Newborn stepping: An explanation for a "disappearing" reflex. *Developmental Psychology*, 18, 760 – 775.
- Thelen, E. & Fisher, D. M. (1983). The organization of spontaneous leg movements in newborn infants. *Journal of Motor Behaviour*, 15, 353 – 377.
- Thelen, E., Fisher, D. M. & Ridley-Johnson, R. (1984). The relationship between physical growth and a newborn reflex. *Infant Behavior & Development*, 7, 479 – 493.
- Thelen, E., Fisher, D. M., Ridley-Johnson, R. & Griffin, N. J. (1982). Effects of body build and arousal on newborn infant stepping. *Developmental Psychobiology*, 15, 447 – 453.
- Thelen, E. & Smith, L. B. (1994). *A dynamical systems approach to the development of cognition and action*. Bradford Books: MIT Press.
- Thelen, E. & Ulrich, B. D. (1991). Hidden skills: A dynamic systems analysis of treadmill-elicited stepping during the first year. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 56, (1, Serial No. 223).
- Thomas, J. R. & French, K. E. (1985). Gender differences across age in motor performance: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 98, 260 – 282.
- Thorndike, E. L. (1898). Animal intelligence: An experimental study of the associative processes in animals. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 2 (4), i. – 109.
- Tiedemann, D. (1787). *Beobachtungen ueber die Entwicklung der Seelenfaehigkeiten bei Kindern*: Mit Einleitung sowie mit e. Literaturverz. zur Kinderpsychologie. Altenburg: Bonde
- Ulrich, B. D. & Reeve, T. G. (2005). Studies in motor behavior: 75 years of research in motor development, learning, and control. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 76, 62 – 70.
- Ungerleider, L. G. & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. *Cambridge: MIT Press*, 4, 549 – 586.
- Uno, Y., Kawato, M. & Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multi-joint arm movement. *Biological Cybernetics*, 61, 89 – 101. <https://doi.org/10.1007/BF00204593>
- Vallbo, Å. B. (1970). Discharge patterns in human muscle spindle afferents during isometric voluntary contractions. *Acta Physiologica Scandinavica*, 80, 552 – 566. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1970.tb04823.x>

- Walk, R. D. (1966). The development of depth perception in animals and human infants. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 31 (5, Serial No. 107), 82 – 108.
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 683 – 703.
- Weiss, M. R. & Ferrer-Caja, E. (2002). Motivational orientations and sport behavior. In T. S. Horn (Ed.), *Advance in sport psychology* (2nd ed., pp. 101 – 183). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics; or control and communication in the animal and the machine*. Oxford, UK: Wiley.
- Williams, K., Haywood, K. & VanSant, A. (1998). Changes in throwing by older adults: A longitudinal investigation. *Research Quarterly in Exercise & Sport*, 69, 1 – 10.
- Willimczik, K. (2008). (Sport-)Motorische Entwicklung. In W. Schlicht & B. Strauß (Hrsg.), *Grundlagen der Sportpsychologie* (Enzyklopädie der Psychologie, Serie Sportpsychologie, Bd. 1, S. 297 – 373). Göttingen: Hogrefe.
- Willimczik, K. & Roth, K. (1983). *Bewegungslehre*. Reinbek: Rowohlt.
- Wilson, R. A. & Foglia, L. (2017). “Embodied Cognition”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Spring 2017 Edition. Retrieved from <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/embodied-cognition/>
- Wollny, R. (2002). Motorische Entwicklung in der Lebensspanne. Warum lernen und optimieren manche Menschen Bewegungen besser als andere? Schorndorf: Hofmann.
- Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends Cognitive Science*, 1 (6), 209 – 216. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(97\)01070-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(97)01070-X)
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z. & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269, 1880 – 1882.
- Wolpert, D. M., Miall, R. C. & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Science*, 2, 338 – 347.
- Wrisberg, C. A. & Wulf, G. (1997). Diminishing the effects of reduced frequency of knowledge of results on generalized motor program learning. *Journal of Motor Behavior*, 29, 17 – 26.
- Wu, D., Sharma, N. & Blumenstein, M. (2017). Recent advances in video-based human action recognition using deep learning: A review. In IEEE (Eds.), *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCN)* (pp. 2865 – 2872). IEEE.
- Wulf, G. (2013). Attentional focus and motor learning: A review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 6, 77 – 104.
- Wulf, G., Höß, M. & Prinz, W. (1998). Instructions for motor learning: Differential effects of internal versus external focus of attention. *Journal of Motor Behavior*, 30, 169 – 179.
- Wulf, G., Lee, T. D. & Schmidt, R. A. (1994). Reducing knowledge of results about relative versus absolute timing: Differential effects on learning. *Journal of Motor Behavior*, 26, 362 – 369.
- Wulf, G. & Lewthwaite, R. (2016). Optimizing performance through intrinsic motivation and attention for learning: The OPTIMAL theory of motor learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23, 1382 – 1414.
- Wulf, G., McNevin, N. & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a function of attentional focus. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54, 1143 – 1154.
- Wulf, G., Schmidt, R. A. & Deubel, H. (1993). Reduced feedback frequency enhances generalized motor program learning but not parameterization learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19, 1134 – 1150.
- Zeng, N., Ayyub, M., Sun, H., Wen, X., Xiang, P. & Gao, Z. (2017). Effects of physical activity on motor skills and cognitive development in early childhood: A systematic review. *BioMed Research International*, 2017: 2760716.
- Zona, C. I., Raab, M. & Fischer, M. H. J. (2018). Embodied perspectives on behavioral cognitive enhancement. *Journal of Cognitive Enhancement*. 1 – 17. <https://doi.org/10.1007/s41465-018-0102-3>

#### Nadja Schott

Universität Stuttgart  
Institut für Sport und Bewegungswissenschaft  
Allmandring 28  
70569 Stuttgart  
[nadja.schott@inspo.uni-stuttgart.de](mailto:nadja.schott@inspo.uni-stuttgart.de)