

Wolfgang Schöllhorn, Patrick Hegen & Alexander Eekhoff

Differenzielles Lernen und andere motorische Lerntheorien

DIFFERENTIAL LEARNING AND OTHER MOTOR LEARNING THEORIES

Zusammenfassung

Das differenzielle Lernen wurde aus der allgemeinen Systemdynamik hergeleitet (Schöllhorn, 1999; Schöllhorn, i. D.) und hat mittlerweile in verschiedensten Bereichen nationale und internationale Bestätigung erfahren. Wesentliche Vorhersagen zur Individualität und Situationsspezifität wurden bestätigt. Probleme des Bewegungslernens, die für gelöst schienen und damit für ausgewählte Entwicklungsrichtungen blind machten, werden in anderem Licht betrachtet und lassen auch Ausnahmen bisheriger Theorien als logischen Bestandteil erscheinen. Vermeintlich gelöste Probleme durch die variability of practice-Theorie (Schmidt, 1975), die damit verbundenen Fremd-Rückmeldungen und das Kontextinterferenzlernen (Battig, 1966) werden kritisch reflektiert. Unterschiede im Lern- oder Trainingsziel, im Verständnis von Schwankungen und bei Effekten während der Aneignungs- und Lernphase werden identifiziert. Klassische motorische Lernansätze werden in Verbindung mit Schwankungen als spezifische Formen differenziellen Lernens im weiteren Sinne betrachtet. Es scheint, dass schon immer aus Differenzen gelernt wurde, nur waren diese beim Wiederholen zu klein für optimale Lernfortschritte.

Schlagworte: differenzielles Lernen – motorisches Lernen – Lerntheorien

Abstract

The differential learning approach (Schöllhorn, 1999; Schöllhorn, i. D.) as a deduction from systems dynamics theory has received national and international acknowledgment in different areas. Main predictions with respect to individuality and situation specificity have been verified. Problems of movement learning that seemed to be solved and in consequence led to blindness towards selected trends are considered under a new light. Exceptions within former theories are now considered as constituents. Allegedly solved problems by the variability of practice theory (Schmidt, 1975), the closely related external feedback as well as the contextual interference approach (Battig, 1966) are critically reflected. Different understandings of learning or training aims, differences in the understanding of fluctuations or noise as well as different consequences on the acquisition and learning phases are identified. Traditional learning approaches are considered as specific forms of differential learning in a broader sense. It seems that learning always originated from differences but in repetitive learning these differences were too small for optimal learning progress.

Key words: differential learning – motor learning – learning theory

1 Einleitung

Das Modell des Differenziellen Lernens¹ (DL), wie es ursprünglich im engeren Sinne eingeführt wurde (Schöllhorn, 1999; Schöllhorn, i. D.), weist im Vergleich zu den traditionellen motorischen Lernmodellen zwei Auffälligkeiten auf. Zum einen werden beim Lernen mit dem DL-Ansatz als zentralem Element die Schwankungen einer Bewegung vergrößert, um das System in einen instabilen Bereich zu bringen und um das System adaptiv zu halten. Zum anderen erhält der Lernende in der Folge von Seiten des Lehrenden keine Korrekturanweisungen mehr zur beobachteten Bewegungsausführung. Im Extremfall kann diese Schwankungszunahme auch keine Wiederholung beinhalten, in die andere Richtung werden aus Effektivitätsgründen nicht mehr als drei Wiederholungen empfohlen². Mit diesen Auffälligkeiten greift das DL bislang als gelöst geglaubte Probleme auf und betrachtet die zugehörigen Theorien und ihre Annahmen unter anderem Licht.

Da die Steigerung von Schwankungen aus traditioneller Sicht einer Zunahme der Variabilität entspricht und die fehlende Fremdrückmeldung auf den ersten Blick klassischen Lernmodellen widerspricht, wird im Folgenden auf die im Bereich der Sportwissenschaft populärsten motorischen Lernmodelle eingegangen, die Variabilität als essenziellen Bestandteil ihres Modells betrachten und daran Fremdrückmeldung eng ankoppeln. Die jüngeren Modelle aus dem Bereich des computational approaches, z. B. der Arbeitsgruppen um Shadmehr oder Wolpert (Körding, Tenenbaum & Shadmehr, 2007; Hamilton, Jones & Wolpert, 2004), werden an anderer Stelle besprochen.

2 Fremdrückmeldungen und Differenzielles Lernen

In Bezug auf Rückmeldungen³ (Feedback) im Rahmen von motorischen Lernmodellen (closed loop – Adams, 1971) gilt es im Wesentlichen, auf der Basis von Regelkreismodellen (vgl. Adams, 1971; Anochin, 1967; Farfel, 1962; Miller, Galanter & Pribram, 1960) zwischen propriozeptiver Eigen-, exterozeptiver Eigen- und exterozeptiver Fremdinformation zu unterscheiden (Mendoza, 1993; Swinnen, 1996). Untersuchungen zur exterozeptiven Fremdinformation spiegelten sich in KR- (Knowledge of result) und in KP-Forschung (Knowledge of performance) wider (Adams, 1987; Mendoza, 1993). Untersuchungen zur biomechanischen Schnellinformation (Farfel, 1962; Mendoza & Schöllhorn, 1990a, 1990b, 1990c, 1991a, 1991b, 1991c, 1993) als

¹ Die Autoren sind sich hier bewusst, dass die Mehrzahl der diskutierten Modelle im Ursprung Modelle der motorischen Kontrolle sind. Diese dienten jedoch aufgrund der unmittelbar ansteuerbaren Modellvariablen meist direkt als Modelle für motorisches Lernen. So wurde aus dem Closed-loop-Modell zur Bewegungskontrolle das Feedback(KR/KP)-Lernen und aus der Schematheorie das variability of practice-Lernen unmittelbar abgeleitet.

² Vgl. powerlaw of adaptation, wonach die größten Anpassungen innerhalb der ersten drei Wiederholungen stattfinden (Baccus & Meister, 2002; Drew & Abbott, 2006).

³ Der hier verwendete Begriff der Rückmeldung ist zu unterscheiden von den motivationspsychologischen Rückmeldungen in Form von Lob und Tadel, die hier nicht Gegenstand sind.

Vorläufer des KR legten in Bezug auf die relative Rückmeldungshäufigkeit nahe, dass eine Fremdrückmeldung vom Athleten nur eingefordert wird, wenn die Information nicht über propriozeptive und exterozeptive Eigeninformation zugänglich ist, d. h. wenn er es nicht selbst spürt. Bestätigung findet dies durch Magill, Chamberlin und Hall (1991), die auf eine Redundanz von Rückmeldung (KR) im Vergleich zur Eigeninformation hinweisen (vgl. auch Swinnen, 1996; Hays, Kornell & Bjork, 2010). Swinnen, Vandenberghe und Assche (1985) berichten im Rahmen eines Experiments zur Aneignung von Fertigkeiten beim Geräteturnen von enormen Leistungssteigerungen trotz fehlender Fremdrückmeldung. Magill (1994), Silverman (1994) und Swinnen (1996) gehen schon Anfang der 1990er von einer Überbewertung der Fremdrückmeldung aus, da die positiven Ergebnisse zum Großteil durch Unterbinden der intrinsischen Informationen bedingt waren (Swinnen, 1996).

Ausgehend vom zusätzlichen Nutzen externer Rückmeldung über die eigene Bewegung unter der Bedingung, dass der Lernende es selbst nicht spürt, kann von einer engen Kopplung (Konfundierung) der Fremdrückmeldung an das Lernen auf der Basis von Wiederholung ausgegangen werden. Dies scheint insofern plausibel, als dass das Wiederholen einer Bewegung per se identische Ausführungen erwartet. Die auftretenden zufälligen Schwankungen (Differenzen) scheinen zu gering, als dass der Lernende sie spüren kann und gerade deshalb die zusätzliche Fremdinformation benötigt. DL im engeren Sinne verzichtet⁴ aus genanntem Grund auf ergänzende Fremdinformationen und unterstützt damit stärker die propriozeptive und die exterozeptive Eigenwahrnehmung durch Vergrößerung der Schwankungen im Sinne einer Selbstorganisation. Der Unterschied zu vorangehenden Bewegungsausführungen kann beim DL vom Athleten selbst mehr „gespürt“ werden und bedarf im Allgemeinen keiner Ergänzung durch den Lehrenden. Dies ist wohl auch ein Grund, warum Säuglinge und Kleinkinder auch ohne die Instruktionen der Eltern während der ersten beiden Lebensjahre so erfolgreich lernen (Goldfield, 1995; Schöllhorn, 1999a).⁵

Inwiefern die Zunahme der Schwankungen bis hin zu kritischen Fluktuationen des differenziellen Lernansatzes mit klassischen motorischen Lerntheorien wie der Schematheorie von Schmidt (1975) und dem Kontext-Interferenz-Lernen (Battig, 1966, 1972; Shea & Morgan, 1979), der Unterlassung der Fremdrückmeldung sowie der damit verbundenen Selbstorganisation und Individualität in Verbindung stehen, wird im Folgenden kritisch reflektiert.

3 Probleme der Schematheorie nach Schmidt (1975)

Bezüglich der im deutschen Sprachraum wohl bekanntesten motorischen Lerntheorie, der Schematheorie (ST) nach Schmidt (1975), wird in Verbindung mit den Schwankungen und der Nichtwiederholbarkeit auf das Speicherproblem und die In-

⁴ Verzichten ist hier deutlich zu unterscheiden von verbieten!

⁵ Die Quelle, aus der hervorgeht, dass beim differenziellen Lernen Rückmeldungen generell überflüssig seien, entzieht sich unserer Kenntnis (vgl. Künzell & Hossner, 2012).

dividualität sowie die daraus resultierenden praktischen Konsequenzen eingegangen. Als ein Aspekt ist hierbei die chronologische Aktualität der ST relativ zum DL zu sehen.

In der Originalarbeit von Schmidt (1975) wird zunächst ein Modell zur motorischen Kontrolle vorgeschlagen, das durch Moxley (1979) sowie Shapiro und Schmidt (1982) eine Erweiterung zur praktischen Anwendung in Form der Variability-of-practice-Hypothese führt.⁶ Ohne auf die kognitionsorientierten Modelle der Schemata und generalisierten motorischen Programme (GMP) im Detail einzugehen (vgl. hierzu van Rossum, 1990; Hofmann, 1993; Schöllhorn, 1998), inspirierte das Modell die Bewegungswissenschaft in vielerlei Hinsicht.

Aufgrund der inhaltlich engen Verbindung systemdynamischer Fluktuationen, der Individualität, der Nichtwiederholbarkeit von Bewegungen und dem Speicherproblem sowie den damit suggerierten praktischen Konsequenzen, werden diese Aspekte im Folgenden vorab detaillierter aufgegriffen.

3.1 Speicherproblem und Nichtwiederholbarkeit

Eine Frage, mit der sich die Bewegungswissenschaft schon seit Längerem beschäftigt, dreht sich um Art und Umfang der zentralnervösen Speicherung von Bewegungen, wobei davon ausgegangen wird, dass sämtliche auszuführenden Bewegungen zentralnervös (ähnlich einer Festplatte beim Computer) gespeichert vorliegen. Im Zusammenhang mit der ST wird dabei oft irrtümlich von der Lösung dieses Speicherproblems ausgegangen. Aus lernpraktischer Sicht ist die Annahme einer Lösung des Speicherproblems durch die ST grundlegend problematisch, suggeriert diese Annahme doch eine mögliche Begrenzung des Lernprozesses auf ausgewählte GMPs oder Schemata. Durch die Annahme von Bewegungsklassen im Rahmen der ST sollten unendlich viele Bewegungsmöglichkeiten auf die endliche Zahl an Neuronen im Gehirn abgebildet werden. Dieses Vorhaben weist im Ansatz bereits mehrere logische Probleme auf. Akzeptieren wir, dass sich keine Bewegung identisch wiederholen lässt, dann können wir von unendlich vielen Bewegungen auch innerhalb einer einzelnen Bewegungsklasse bzw. GMP ausgehen. Wenn wir diese Menge an Bewegungen in endlich viele Bewegungsklassen unterteilen, so resultiert daraus numerisch etwas Unendliches⁷ dividiert durch eine endliche Zahl, was grob immer noch etwas Unendliches ergibt. Zusätzlich besteht hierbei die Schwierigkeit in dem Auffinden von endlich vielen Bewegungsklassen, die sich disjunkt voneinander unterscheiden lassen, da genau im Übergang von zwei ähnlichen Klassen ein Problem der exakten Trennung entsteht. Dies wird durch die Nichtwiederholbarkeit von Bewegungen zusätzlich erschwert. Als Problem kommt die Frage hinzu, in welcher

⁶ Die ST beansprucht hierbei zwar die Vereinigung von open- und closed-loop, aus mathematisch logischer Sicht ist jedoch das Open-loop-Modell als Spezialfall des Closed-loop-Modells zu betrachten für den Fall, dass keine Rückmeldung stattfindet, es sich demnach um eine echte Teilmenge von den Closed-loop-Modellen (vgl. Schnabel, Harre & Krug, 2011) handelt.

⁷ Rein mathematisch betrachtet ist Unendlich keine Zahl und Operationen damit sind nicht definiert. Auf eine limes $n \rightarrow \infty$ -Betrachtung wird hier aus Platzgründen verzichtet.

Form und wie viele der variablen Parameter gespeichert werden, die für jede spezifische Bewegung innerhalb einer Bewegungsklasse benötigt werden. Gleiches gilt für zu erlernende Schemata, die jeweils spezifische Verbindungen zwischen Invarianten und variablen Parametern herstellen sollen. Ein Transfer der gleichen Idee auf spielaktische Lernprozesse führt analog zu dem Irrglauben, mit einzelnen Modulen ein Adaptationssystem ersetzen zu können, das aus unendlichen Möglichkeiten besteht (vgl. Karmiloff-Smith, 1992). Nicht nur sich ständig ändernde interne und externe Lebensbedingungen, wie sie im Rahmen der Systemdynamik Berücksichtigung finden, widersprechen diesen Suggestionen.

Die Schmidt'sche ST war in Bezug auf das Speicherproblem eine inspirierende Andeutung, jedoch für seine Lösung zu unspezifisch. Jüngere Entwicklungen, wie z. B. Modelle der „uncontrolled manifold“ (Scholz & Schöner, 1999) oder die assoziativen Speichermodelle der neuronalen Netzentwicklung, zeigen hier größeres Potenzial.

3.2 Individualität und Schematheorie

Analog dem Speicherproblem wird mit der Suggestion, Individualität von Bewegungslernen sei im Rahmen der ST bereits ausreichend behandelt, ein grundlegendes Problem der Bewegungs- und Lernforschung verkannt und zukünftige Forschung in einem Bereich behindert, der für Therapie, Training und allg. Lernen von größtem Interesse und Nutzen ist. Bezüglich einer vermeintlichen Berücksichtigung von Individualität im Rahmen der ST werden die Aussagen von Schmidt (1975) explizit personenunabhängig formuliert.⁸ Vor allem Untersuchungen, die das Modell der GMPE zu Grunde legen, wählen im Trend der damaligen Zeit Mittelwerte, die personenübergreifend über alle Probanden ermittelt werden (Shapiro, Zernicke, Gregor & Diestel, 1981). Individualität findet im ST-Ansatz nach Schmidt keine Berücksichtigung. Auch im Rahmen der Feedback-Forschung (Adams, 1987) bilden gruppenorientierte Mittelwerte die Grundlage für die Sollwertbildung. Individualität dient nur als Behelf für zu starke Abweichungen von Mittelwerten. Eine Prüfung der Frage nach Individualität findet nicht statt. Vorgaben exakter zeitlicher Abstände (Tastendrücken, Holzblöcke umwerfen u. a. Shea & Morgan, 1979; Wulf, 1994) lassen auch schwer individuelle Rhythmen identifizieren, der Modellzweck war hier per se nicht auf individuen-spezifische Gegenstände ausgerichtet. Einzelfallanalysen auch im Bereich des Sports waren sowohl in der Sportpsychologie (Schlicht, 1987) als auch in der Biomechanik des Sports (Schöllhorn, 1993) Ausnahmen und sind es bis in jüngste Zeit geblieben.

Im Unterschied hierzu stellt die Herausbildung/Förderung individuell optimierter Bewegungsmuster einen zentralen Bestandteil des DL dar, der durch Selbstorganisation mit Hilfe zunehmender Fluktuationen initiiert wird. Eine Grundlage hierfür bildete eine Methodenentwicklung zur Erkennung individueller Bewegungsmuster im Rah-

⁸ „There are numerous directions in which one could move, including asking *about individual differences* in schema formation, how developmental influences are manifested, and how large a given schema might be in terms of the range of movements encompassed by it.“ (Schmidt, 1975; Hervorhebung durch Autoren).

men motorischer Lernprozesse, die sich mit dem spezifischen Umgang von Schwankungen (Fink, Schöllhorn & Jaitner, 1999) befasst. Ähnlich dem systemdynamischen Ansatz führt erst das konstruktive Nutzen von Schwankungen (Rauschen) im biomechanischen Signal zur Erkennung individueller Bewegungsmuster (Schöllhorn, Nigg, Stefanyshyn & Liu, 2002; Janssen, Schöllhorn, Lubienetzki, Fölling, Kokenge & Davids, 2008). Dies nutzt das DL in der Praxis. Zeigt z. B. eine Bewegungswiederholung übermäßige Schwankungen in ausgewählten Bereichen, so können diese als Instabilitäten verstanden werden, die größeres Potenzial für Lernen aufweisen und durch deren Verstärkung das Finden individuell optimierter Lösungen gefördert wird (vgl. Schöllhorn, Beckmann & Davids, 2013; Wu, Miyamoto, Castro, Ólveczky & Smith, 2014). Aufgrund methodischer Probleme war Individualität als Forschungsgegenstand der Bewegungswissenschaft vor der letzten Jahrhundertwende weitestgehend vernachlässigt.

Abgesehen von einer Einschränkung wissenschaftlicher Freiheit birgt die vermeintliche Vorgabe von Lösungen anhaltend offener Fragestellungen⁹ sowohl im Falle des Speicherproblems als auch im Falle der Individualität das für den Sport dominante Problem der mangelnden Nutzung von offensichtlichen Potenzialen im Bereich praktischer Konsequenzen in sich, die im Folgenden genauer betrachtet werden.

3.3 Praktische Konsequenzen der Schematheorie

Im Rahmen des ST-Modells wurden Konsequenzen für die motorische Lernpraxis abgeleitet. Zur Entwicklung und Stabilisierung von Schemaregeln empfehlen sie, ausgewählte, variable Parameter innerhalb desselben Programms (GMP) zu variieren.¹⁰ Für das Festigen der Schemaregeln wird gezielt auf das Einhalten von Grenzen eines GMPs hingewiesen.¹¹ Eine wesentliche Komponente dieses Modells spielt dabei die Interpolation zwischen einzelnen Parametern.¹² Noch weiter geht die Interpretation der ST durch Wulf (1994), indem sie nicht nur auf ein Festigen, sondern sogar auf das Erlernen von GMPs schließt und durch das Anwenden verschiedener

⁹ Über den Erwerb oder das Erlernen von GMPs oder Invarianten findet im Rahmen der bisherigen Arbeiten zum DL keine Aussage statt.

¹⁰ „The theory predicts that practicing a variety of movement outcomes with the same program (i. e. by using a variety of parameters) will provide a widely based set of experiences upon which a rule of schema can be built.“ (Schmidt & Lee, 1999). „The theory suggests that the greater the number of movement experiences (variability) within a response class (for a given generalized motor program) the more effectively the schema is formulated.“ (Shapiro & Schmidt, 1982).

¹¹ „The rule is maintained in memory and can be used to select a new set of parameters for the next movement situation – even a novel variation – that involves the same motor program.“ (Schmidt & Wrisberg, 2000).

¹² In diesem Zusammenhang werden die Probleme mit dem Ansatz der Interpolation künstlicher neuronaler Netze zur Bestimmung eines Lösungsraums bei Künzell und Hossner (2012) schwer verständlich, sind sie doch auch grundlegender Bestandteil der Schematheorie.

Parametervariationen innerhalb einer Bewegungsklasse geradezu das Einschleifen der Invarianten fordert. Die Tragweite der Problematik erfährt einen noch größeren Rahmen durch analoge Empfehlungen eines Lehrbuchs für Sportpädagogen (Bielefelder Sportpädagogen, 1998, 2007).¹³

Ohne Zweifel führte die ST zu vielen Anregungen in Wissenschafts- und Anwenderkreisen. Resonanz erfährt die Theorie bis heute noch in weiten Teilen der anwendungsorientierten Felder. Für die Praxis gilt jedoch, nicht nur die Einschränkungen und Probleme bewusst zu machen, sondern entsprechende Alternativen anzubieten. Aus psychologischer Sicht gehört hierzu die zusätzliche Betrachtung der Effekterwartung (Hofmann, 1993). Aus systemdynamischer Sicht sind hier neben der Anwendung der Schwankungen (Variation)¹⁴ auf die variablen Parameter vor allem die Variationen der vermeintlichen Invarianten der ST zuzuordnen (vgl. Schöllhorn, 1998). Aufgrund der mechanisch veränderten Bedingungen ballistischer großmotorischer Bewegungen sind die an kleinmotorischen Bewegungen abgeleiteten Erkenntnisse nur eingeschränkt übertragbar (vgl. Schöllhorn, 1998; Wulf & Shea, 2002). Den gleichen Hintergrund bildet die Problematik der Übertragbarkeit von Untersuchungen zum Kontext-Interferenzlernen, das bislang nur im Bereich von kleinmotorischen Laboraufgaben einigermaßen konsistente Ergebnisse liefert (Brady, 2008).

3.4 Probleme des Kontext-Interferenz-Lernens

Der Begriff des Kontext-Interferenz-Lernens (CI) ist auf ein Phänomen und seine vermuteten zugehörigen Randbedingungen zurückzuführen (Battig, 1966, 1972, 1979) und mit einem Nachteil (Interferenz) während der Aneignung durch zusätzliche Aufgaben (Kontext) verbunden. Interessanterweise war der anfängliche Aneignungsnachteil mit einem Vorteil in der späteren Lern- oder Recognitionphase verbunden (Shea & Morgan, 1979). In sämtlichen Studien zum CI-Lernen wird durch zwei (bis zu fünf) klar zu unterscheidende Zielaufgaben (tasks) ein Kon(!)text für eine zentrale Aufgabe (= text) in der Aneignungsphase hergestellt. Sowohl die Zielaufgabe (= text) als auch jede der zusätzlichen Aufgaben werden im Rahmen der Aneignungsphase *mehrmals* mit unterschiedlichen Vorgänger- oder Nachfolgeaufgaben (= Kontext) ausgeführt.¹⁵ Übersichtsarbeiten zu Untersuchungen des CI-Lernens

¹³ „Das Erlernen einer genormten Bewegungsform entspricht der Aneignung eines motorischen Programms. In ihm sind die strukturellen, fertigkeitsspezifischen Invarianten festgeschrieben, nicht aber die variablen, austauschbaren Bewegungsparameter.“ (Roth, 1998). „Die invarianten Grundelemente Sequencing, relatives Timing und relative Krafteinsätze einer Fertigkeit sollten deshalb sowohl in unterschiedlichen Situationen erprobt als auch in der gleichen Situation geübt worden sein.“ (Brehm, 1998).

¹⁴ Die Namensgebung des Differenziellen Lernansatzes liegt unter anderem darin, dass der umgangssprachlich verwendete Begriff des Variierens durch die Schmidt'sche Schematheorie bereits eine sehr enge Interpretation erfuhr.

¹⁵ „Blocked practice involves practicing all N trials on one task before any practice is begun on another task. All N trials are then completed on the next task before practicing begins on a third task, and so on, ... Random practice involves the same number of tasks and the same number of trials on each task as in blocked practice.“ (Schmidt & Lee, 1999).

(Magill & Hall, 1990; Brady, 1998, 2004, 2008) weisen auf die bislang eingeschränkten Nachweise im Bereich kleinmotorischer Laboraufgaben hin. Von einer Empfehlung des CI-Ansatzes im Bereich großmotorischer Sport- oder Alltagsbewegungen wird bislang abgesehen (Brady, 2008).

Aus kognitionspsychologischer Sicht werden für die zu beobachtenden Phänomene unter anderem eine Rekonstruktions- (Lee & Magill, 1983) und eine Elaborationshypothese (Battig, 1966, 1972, 1979) als Erklärungsmodelle im Bereich der Bewegungsplanung angeboten. Konkrete Aussagen über die Enkodierungsstrategien oder die Art der stärker elaborierten Gedächtnisrepräsentation stehen bislang aus. Diese bisherigen Erklärungsmodelle sind mit zahlreichen Problemen und bis heute anhaltenden Widersprüchen und Ungereimtheiten (Brady, 1998, 2004, 2008; Barreiros, Figueiredo & Godinho, 2007) verbunden.

Ein wesentliches Problem der Elaborationshypothese liegt unter anderem darin, dass der verminderte (interference) Aneignungseffekt als ein zentrales Element des CI-Lernens keine Erklärung findet. Ähnliches gilt für Befunde, bei denen sich die CI-Effekte nicht oder nur unsystematisch beobachten lassen. Auf phänomenologischer Ebene lassen sich die Effekte auch nicht bei Kindern beobachten. Gleiches gilt für Anfänger und das Erlernen von komplexen Bewegungsaufgaben. Auch das Auftreten ähnlicher Phänomene beim Spacing-Effekt (Dempster, 1988; Richland, Finley & Bjork, 2004), wonach Lernen mit längeren Pausen zu besseren Gedächtnisleistungen führt, lässt sich damit nicht erklären. Während die beiden kognitionspsychologischen Erklärungsmodelle im Sprach- und „akademischen“ Bereich recht plausibel scheinen, gestalten sie sich für den motorischen Bereich eher problematisch (Brady, 2008). Wird bei einem motorischen Lernprozess im Allgemeinen ein zunehmendes Maß an Automatisierung beobachtet und einhergehend eine abnehmende Rolle an kognitiven Faktoren (Fitts & Posner, 1967; Ackerman, 1988), so ist das CI-Lernen von einem zeitlichen Versatz eines solchen begleitet (Jelsma & Pieters, 1989). Als Folge dieser Probleme besteht zunehmend Übereinstimmung, dass der CI-Effekt nach Brady (2008) bislang noch zu keinem großen Nutzen für Sportlehrer und Trainer führte, die Praxistauglichkeit im Sport mehr als fraglich und wohl auch deswegen in Trainerkreisen kaum bekannt ist. Besondere Probleme in der praktischen Umsetzung der CI-Erkenntnisse sehen French, Rink und Werner (1990). Im Wesentlichen jedoch basieren die bisherigen Erklärungsmodelle im motorischen Bereich auf zwei Erklärungsansätzen (Magill, 1992). Der ursprüngliche Ansatz basiert auf verbalen Berichten der Probanden, die von mehr Vergleichen zwischen den Aufgaben und unterschiedlichen Lösungsstrategien zur Bewältigung der Aufgabe berichten (Zimny, 1981; Shea & Zimny, 1983). Unterstützung fand dieser Ansatz durch Limmons und Shea (1988), die annehmen, dass die Aneignung (recognition) primär von der Elaboration innerhalb einer Aufgabe (intratask) abhängt, wohingegen das Lernen bzw. der Transfer (recall) von der Elaboration zwischen den Aufgaben (intertask) abhängen soll.

Sowohl in der Versuchsanordnung als auch in den Erklärungsmodellen wird der Schwerpunkt auf den *Kontext* in Form von konkreten Bewegungsaufgaben (zwei bis fünf) gelegt und Fehlern, d. h. Abweichungen von diesen konkreten Bewegungsaufgaben, kommt (im Trend der damaligen Zeit) eine destruktive d. h. eher zu vermei-

dende Rolle zu¹⁶. Entsprechend werden fehlerhafte Ausführungen einer Aufgabe explizit in korrekter Form nachgeholt (Shea & Zimney, 1983), um in allen Aneignungsvarianten auf die gleiche Anzahl an korrekten Versuchen zu kommen. Ähnlich rät Wulf (1994) im Rahmen einer Diskussion des CI-Effektes von permanenten Veränderungen des Bewegungsablaufs ab, da dies den Erwerb eines stabilen Bewegungsgrundmusters erschweren würde. Dieses sei vor allem durch selbstständige Fehler-Einschätzungen der Lernenden zu erzielen (Swinnen et al., 1990, zitiert nach Wulf, 1994). In gleichem Sinne empfehlen Schmidt und Wrisberg (2000, 2008) eine möglichst nahe Anlehnung des Trainingsprozesses an die Zielbedingungen, ohne jedoch einen Trainingsprozess mit gezielten Abweichungen getestet zu haben.

4 Differenzielles Lernen

Der Differenzielle Lern- und Lehransatz ist aus Prinzipien der Systemdynamik dissipativer Systeme, wie zunehmende Fluktuationen und kritische Schwankungen bei Phasenübergängen sowie initiierte Selbstorganisation, hergeleitet. Durch eine Steigerung der Schwankungen wird das lernende System in einen instabilen Zustand gebracht, der dadurch charakterisiert ist, dass es von hier aus weniger an Aufwand bedarf, um in einen neuen Zustand zu gelangen als aus einem stabilen Zustand heraus. Durch die Schwankungszunahme werden dem Lernenden vielfältige Modi angeboten, aus denen heraus er sich selbst bewusst oder unbewusst die für seine individuellen Bedingungen optimalen auswählen kann.

Die ersten und meisten Experimente zum DL-Ansatz sind durch einzelne Techniken mit zugesetzten Schwankungen charakterisiert (Beckmann & Schöllhorn, 2003; Trockel & Schöllhorn, 2003; Sechelmann & Schöllhorn, 2002; Schönherr & Schöllhorn, 2003; Schöllhorn, Sechelmann, Trockel & Westers, 2004). Mittlerweile findet der Ansatz aus verschiedenen internationalen Arbeitsgruppen Bestätigung (u. a. Wagner & Müller, 2008; Savelsbergh, Kamper, Rabijs, De Koning & Schöllhorn, 2010; James, 2014; James & Conatser, 2014). Erst jüngere Untersuchungen zum Volleyball (Schöllhorn, Paschke & Beckmann, 2006) und Fußball (Schöllhorn, Hegen & Davids, 2012; Hegen & Schöllhorn, 2012) heben auf das zweite Unterscheidungsmerkmal zum CI durch zusätzliche Berücksichtigung einer zweiten Technik im Lernprozess ab. Die Basis hierfür bilden Untersuchungsergebnisse zur komplexen Mustererkennung (Schöllhorn, 1993, 1998). Bis zu der Untersuchung über das Erlernen von zwei Techniken im Volleyball (Schöllhorn et al., 2006) wurden bei Untersuchungen zum DL nur einzelne mit Schwankungen versehene Bewegungsaufgaben untersucht. Erlernt demnach jemand im Sinne des DLs die Technik des Unteren Zuspiels beim Volleyball einzeln, dann wird die Bewegung nicht im Kontext des Oberen Zuspiels oder

¹⁶ Die Einführung des Begriffs der „functional variability“ stellt ein erstes Eingeständnis dar, den nicht vermeidbaren Schwankungen essenzielle Funktion bei der Bewegungsausführung zuzuschreiben. Die zum Teil wechselseitig kompensierenden Schwankungen wurden in den 30er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts von Gestaltpsychologen umfangreich untersucht, blieben jedoch weitestgehend auf deskriptiv-analytischer Ebene. Sie aktiv als Steuerungselement einzusetzen kam erst in den 80er-Jahren mit einem konstruktiven Verständnis von Schwankungen auf.

Aufschlags als zusätzliche Aufgabe im Sinne hoher Kontextinterferenz gelehrt, sondern vollkommen praxistauglich¹⁷ das Untere Zuspiel in verschiedensten Varianten ohne Wiederholung und ohne Korrekturgabe angeboten, die in einer idealtypischen Betrachtung als fehlerhaft gelten würden. Das Untere Zuspiel wird dann mit gestreckten Knien, mit gebeugten Knien, mit nur einem gebeugten Knie, mit Ausfallschritt seitlich, mit Ausfallschritt nach vorne, übermäßig gebeugten Ellbogen, mit gestreckten Ellbogen, nur mit einem Arm, mit verschiedenen Trefferflächen auf dem Arm, mit einem geschlossenen Auge, mit kurz vor Ballkontakt beiden geschlossenen Augen, zu nah am Ball, zu weit entfernt vom Ball etc. ausgeführt. Aus CI-Sicht würde hier nur eine einzige Aufgabe, das Untere Zuspiel, ausgeführt und diese eine Aufgabe mit ständigen „Fehlern“ versehen. Wollte man alle Schwankungsausführungen als eigenständige Aufgaben sehen, dann würde die Anzahl der Ausführungen gleich der Anzahl an Aufgaben und die Frage des Testens welcher Aufgabe zum Problem. Es wird im engeren Sinne des Differenziellen Lernens jede Ausführung nur einmal durchgeführt und von der nächsten Ausführung ohne Korrekturgabe abgelöst. Getestet wird am Ende dann wieder die offene Bewegungsaufgabe Annahme des Aufschlags, hier z. B. die Präzision des Unteren Zuspiels nach Aufgabenannahme (vgl. Römer, Schöllhorn, Jaitner & Preiss, 2003, 2009). Zu der eigentlichen Bewegungsaufgabe (task) werden beim Differenziellen Lernen also Rauschen oder stochastische Störungen addiert, um die Aufgabe schneller anzueignen und anschließend besser zu lernen und stabiler zu beherrschen. Solange aus klassischer Sicht ein Trainer „Fehler“ im Bewegungsablauf vermutet, ist eine Grundlage für praktische Anwendungen des DL gegeben. Nur gilt es beim DL, anstelle den „Fehler“ zu korrigieren, die beobachtete Schwankung zu verstärken. Mit dem Verstärken der Schwankung offenbaren sich in der Regel weitere Schwankungen, die Potenzial für Leistungssteigerungen bergen. Werden keine konkreten „Fehler“ beobachtet, führen auch stochastische, selbst ausgelöste Schwankungen zu größeren Lernfortschritten.

Keine der bisherigen Untersuchungen zum DL zeigt die beiden für das CI-Lernen charakteristischen Phänomene der verminderten Aneignungsleistung und des verminderten Leistungsabfalls in der Lernphase. Auch der beim Differenziellen Lernen meist zu beobachtende weitere Leistungsanstieg in der darauf folgenden Lern- bzw. Retentionsphase zeigt keinen Crossover-Effekt. Es liegt daher nahe, eine andere Ursache bzw. eine alternative Erklärung für die Phänomene des DLs heranzuziehen. Eine neue Begriffswahl ist naheliegend, da ähnliche Phänomene auch bei anderen motorischen Lernansätzen bislang nicht zu beobachten sind.

Neben den unterschiedlichen Lern-Effekten lassen sich drei strukturelle Unterschiede zwischen dem CI- und dem DL-Ansatz ausmachen. Ein erster Unterschied liegt in der Betrachtung von Fehlern, denen beim CI-Lernen eher destruktiver Charakter zugeschrieben wird, wohingegen sie im DL-Ansatz zu konstruktiven Schwankungen werden. Ein zweiter Unterschied bezieht sich auf die konkrete Zielaufgabe, die es in

¹⁷ Die verborgene Logik hinter der Darstellung von Künzell und Hossner (2012), dass differenzielles Lernen im Vergleich zu dem praxistauglichen Kontext-Interferenz-Lernen nichts Neues liefert, das DL jedoch nicht praxistauglich sei, bedarf hier keiner weiteren Diskussion.

dieser Form beim DL-Ansatz nicht gibt, da aufgrund der Akzeptanz der Nichtwiederholbarkeit ein größerer Lösungsraum berücksichtigt wird. Die Größe des Raums potenzieller Lösungen ändert sich prinzipiell nicht, es bleiben unendlich viele Möglichkeiten. Wird beim CI-Lernen durch zusätzliche ablenkende Aufgaben ein Kontext erzeugt, der zur Verbesserung der Zielaufgabe (Text) führen soll, so werden beim DL-Ansatz sämtliche Bewegungen als Elemente eines Zielbereichs verstanden. Der dritte Unterschied ist in der Sichtweise bedingt, die beim DL-Ansatz in erster Linie eine physikalisch messbare, phänomen-orientierte (im Unterschied zur kognitionspsychologischen Interpretation) ist und im zweiten Schritt auf systemdynamischer Ebene versucht, durch die Wahl abstrakter Beschreibungsvariablen disziplinunspezifisch verallgemeinernd zu werden.

Ist der erste Unterschied noch wissenschaftstheoretischen Ursprungs und nur indirekt an Folgen zu beobachten, sind der zweite und dritte mit praktischen Konsequenzen verbunden und entsprechend der Betrachtungsweise physikalischen Beschreibungsgrößen zuzuordnen. Vor dem Hintergrund der komplexen Mustererkennung lassen sich konkret die Ähnlichkeiten der ausgewählten Bewegungsaufgaben quantifizieren und in Relation zu den entsprechenden Phänomenausprägungen setzen. Interessanterweise ist die Ähnlichkeit aus erkenntnistheoretischer Sicht ein Proximitätsmaß, das in eine Differenz transformiert werden kann und disziplinunspezifisch Verwendung findet. Sie stellt eine Größe dar, die sich für eine disziplinunspezifische, abstrakte Betrachtung auf systemischer Ebene eignet. Inwiefern es sich dabei um Ähnlichkeit oder Differenzen von biomechanisch gemessenen Bewegungsmustern oder Differenzen an Erwartungshaltung in Verbindung mit Wahrnehmung oder Entscheidung handelt, ist hierbei untergeordnet. Entscheidend für die Adaptation bleibt die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Ereignissen. Das Proximitätsmaß liefert damit eine Möglichkeit, Schwankungen von Bewegungsmustern entsprechend den Charakteristika dissipativer Systeme zu untersuchen.

Von besonderem Interesse an der abstrakten Betrachtungsweise der Differenzen ist ferner die Erklärungsmöglichkeit von Phänomenen, die bislang in den Erklärungsmodellen des CI-Lernens vernachlässigt sind. Wird beim CI-Lernen zwischen zwei Aufgaben randomisiert oder seriell gewechselt, so werden damit auf phänomenologischer Ebene die Streuung bzw. die Schwankungen um die beiden Bewegungsaufgaben vergrößert und ein umfangreicheres Abtasten des möglichen Lösungsraums sowie, unter Berücksichtigung der Nichtwiederholbarkeit, effektiveres Lernen ermöglicht.

Einen Hinweis auf die Zunahme an Schwankungen in den Einzelaufgaben durch randomisiertes Lernen liefern biomechanische Analysen geblockt und seriell alternierend ausgeführter Tennisaufschläge (Gebkenjans, Beckmann & Schöllhorn, 2007; Janssen, Schöllhorn, Newell, Jäger, Rost & Vehof, 2011). Werden der erste und der zweite Aufschlag geblockt ausgeführt, zeigen beide Aufschlagsarten eine geringere Variabilität als bei serieller Reihenfolge. Analog würde ein randomisiertes Anbieten von Aufgaben zu größeren Streuungen der jeweiligen Bewegungsaufgaben führen und diese wiederum führen zu einem weiträumigeren Abtasten des potenziellen Lösungsraums (des Textes) und dies wiederum steigert die Wahrscheinlichkeit besserer Leistungen zukünftiger Ausführungen. Sind jedoch beide Aufschlagvarianten ei-

einander zu ähnlich, führt dies zu einer Überlappung der Schwankungen und dies erlaubt keine exakte Unterscheidung der Aufschläge mehr.

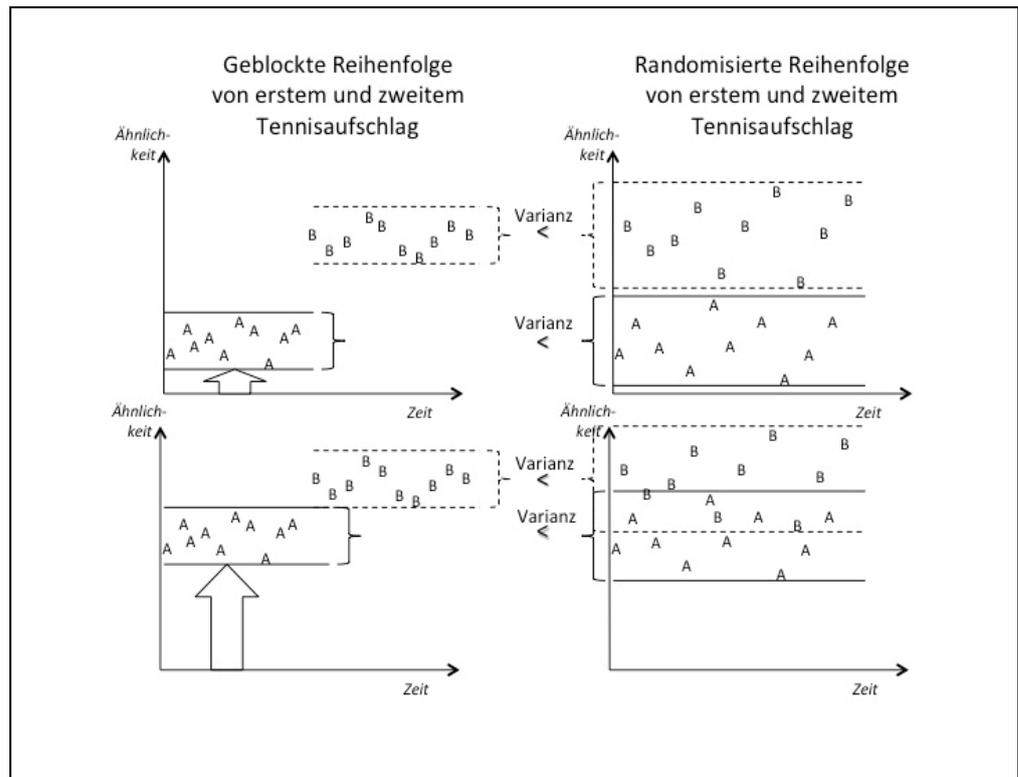


Abb. 1: Veränderung der Schwankungen (Varianz) einzelner Bewegungsaufgaben (z. B. erster Tennisaufschlag (A) und zweiter Tennisaufschlag (B)) durch veränderte Reihenfolge. Oben bei kinematisch weniger ähnlichen Bewegungen und unten bei kinematisch ähnlicheren Bewegungen.

Der (abstrakte) Lösungsraum¹⁸ kann hierbei verstanden werden als die Menge aller neuronalen Prozesse und Zustände, die zur Lösung der Bewegungsaufgabe führen. Derzeit plausibelste Modelle für neuronale Zustände und Prozesse werden durch verschiedenste künstliche neuronale Netze mit assoziativen Speichermöglichkeiten geliefert (vgl. Schöllhorn, Jäger & Janssen, 2008; Schöllhorn & Jäger, 2006). Im konkreten Fall geht es also nicht darum, alle mathematisch kombinatorischen Möglichkeiten im kartesischen Raum im Detail durchzuspielen bzw. alle möglichen Bewegungsausführungen zu variieren und zur Unendlichkeit bzw. Unlösbarkeit zu trei-

¹⁸ Auf eine ausführliche Diskussion von abstrakten Lösungsräumen wird verzichtet, dies kann jedoch in einschlägigen Grundlagenbüchern der Mathematik und Physik nachgeschlagen werden.

ben, sondern darum, im Aneignungsprozess (Trainingsprozess) viele ähnliche Zustände mit entsprechend großem Abstand (Rauschen) anzubieten, die es dem veräuscht trainierten neuronalen Netz erlauben, zwischen diesen trainierten, bekannten Zuständen auf zukünftig eintretende Zustände zu schließen (interpolieren).

Auch das Ausbleiben der CI-Phänomene bei Anfängern und bei Kindern findet auf analoge Weise Erklärung. Wiederholen Kinder und Anfänger im Rahmen einer geblockten Versuchsanordnung, so zeigen ihre Bewegungsausführungen so große Schwankungen, dass sie im Umfang mit denen vergleichbar sind, die durch randomisiertes oder serielles Aneignen bei Erwachsenen oder Fortgeschrittenen ausgelöst würden. Wird jedoch noch stärkeres Rauschen dazugegeben, so ist das Optimum überschritten und die vorteilhaften CI-Effekte sind nicht mehr beobachtbar. Liegen allerdings in den zu vergleichenden Gruppen ähnliche Schwankungen während der Aneignung vor, lassen sich Effekte statistisch nur schwer nachweisen.

Analog lassen sich die Phänomene in Bezug auf das Erlernen von komplexen Bewegungen und auch in Bezug auf den Spacing-Effekt erläutern. Speziell der Spacing-Effekt lässt sich analog zur Interpretation des Experiments zum Tennisaufschlag mit mentalem Training erklären (Schöllhorn, Humpert, Oelenberg, Michelbrink & Beckmann, 2008; Schöllhorn, Mayer-Kress, Newell & Michelbrink, 2009). Mit der Zeit ändert sich das System des Lernenden und die Bewegungsausführungen nehmen an Schwankung im Vergleich zu den früheren Bewegungsausführungen zu. Wenn sich jedoch das System selbst ständig ändert, dann ist es plausibel, den möglichen Lösungsraum von Beginn an weiträumiger abzutasten. Analoges deutet sich für die Erklärung des kontralateralen Transfers an (Trautmann, 2012).

Für all diese Phänomene allein kognitive Prozesse im Sinne einer Elaborations- oder Recognitions-Hypothese zu belasten, scheint fragwürdig, lassen sich CI-Effekte doch auch mit künstlichen neuronalen Netzen mathematisch simulieren (Künzell, 1996), ohne dass der Anordnung an Neuronen und Gewichtung von Verknüpfungen Ähnliches zugeschrieben wird. Interessanterweise ist auch im Bereich der neuronalen Netzforschung eher von einem veräuschten Lernen die Rede (Miglino, Lund & Nolfi, 1995). In welchem Umfang jedoch die Bewegungsausführung oder vermutete Kognitionsprozesse einen Einfluss auf den motorischen Lernprozess haben, bedarf sicherlich noch weiterer konstruktiver Forschung.

Insgesamt liefert das DL einen halt- und brauchbareren Erklärungsansatz für variationsreicheres Lernen, als es bisherige Lernmodelle erlauben. Durch Aufgreifen von Problemen, die bereits als gelöst betrachtet wurden, und ihr konstruktives Einbinden werden im Lernbereich auferlegte Beschränkungen aufgehoben und der experimentellen Kreativität mehr Raum gegeben. Ohne Zweifel sind hiervon das Speicherproblem und die damit verbundene Idee der absoluten Kontrolle von niemals sich wiederholenden Bewegungen betroffen sowie die vermeintliche Notwendigkeit von Fremdrückmeldung durch den Lehrenden oder Trainer, das Problem des Transfers von Ergebnissen aus Laboruntersuchungen auf Alltags- und Sportbewegungen und das Problem der Unterscheidung von Bewegungsklassen und Schwankungen innerhalb einer Bewegungsklasse. Mit der Idee der Differenz als Notwendigkeit und Maß

für Lernen wird eine quantitative Größe bereitgestellt, die erlaubt, zahlreiche Fragestellungen bisheriger Lernmodelle quantitativ zu überprüfen.

Die Basis hierfür ist in einem offenen Wissenschaftsverständnis begründet. Wissenschaft als starres zeitloses und objektives Konstrukt zu verstehen, das einer letzten Wahrheit entgegenstrebt, ist spätestens seit Flecks Werk (1935) über die „Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv“ in Zweifel geraten und wurde durch Feyerabends „Wider den Methodenzwang“ (1986) letztendlich zu Fall gebracht. Hier wird Wissenschaft als ein dynamisches System verstanden, das als Kulturgut und als dissipatives System einem steten zeitlichen Wandel unterliegt. War lange Zeit im Bereich der psychologischen und sozialwissenschaftlichen Methodenlehre die Fisher-Statistik mit einer zu testenden Nullhypothese und ihrer Verwerfung der Vorrang gegeben, so haben sich logische Widersprüche des Ansatzes (Stegmüller, 1973) dahingehend ausgewachsen, dass mittlerweile die Neyman-Pearson Statistik mit den damit verbundenen Effektgrößen und optimalen Stichprobenumfängen favorisiert wird. Neben der Effektgröße ist jedoch auch hier auf die Greifbarkeit der praktischen Bedeutung eines Effekts zu achten (Cohen, 1988). Vereinzelt findet dieser Ansatz seit Kurzem Einzug in die Sportwissenschaft, wenngleich auch hier größere Probleme in seiner Logik schon wieder Unterstützung für die Fisher-Statistik liefern (Hurlbert & Lombardi, 2009). Untersuchungen zum DL wurden analog den Untersuchungen zur ST und zum CI mit Hilfe der Fisher-Statistik analysiert. Effektgrößen wurden zu den letztgenannten in der Mehrzahl im Nachhinein für Metaanalysen bestimmt. Nachberechnungen bei Untersuchungen zum DL zeigen mittlere bis große Effekte bei sämtlichen Untersuchungen. Gemeinsamkeiten und Unterschiede der besprochenen motorischen Lernansätze sind nochmals in Tabelle 1 aufbereitet.

5 Zusammenfassung

- Bisherige Untersuchungen zur Fremdrückmeldung sind primär an Wiederholungslernen gekoppelt und nur notwendig, wenn der Lernende die Abweichung nicht selbst spürt.
- Im Unterschied zur ST werden beim DL auch die Invarianten variiert.
- Individualität findet weder bei ST noch bei CI Berücksichtigung.
- ST und CI betrachten Schwankungen, die über eine funktionelle Variabilität hinausgehen, als Fehler und daher als destruktiv.
- DL betrachtet Schwankungen als konstruktives Element für Lernen.
- Beim DL sind schon während der Aneignung Vorteile gegenüber geblocktem Lernen festzustellen.
- Bisherige und ungeklärte Phänomene des CI sind durch DL erklärbar.
- Differenzielles Lernen findet in Sport und Physiotherapie umfangreich praktische Anwendung.

Es wäre wünschenswert, wenn zukünftige Kritik auf der Basis fundierter Recherchen über die Annahmen und Randbedingungen der zugrunde liegenden Theorien, eher

Brücken zwischen Wissenschaftsdisziplinen (z. B. kognitionspsychologische und biomechanische), Theorie und Praxis baut und konstruktiv in Richtung inter- und transdisziplinärer Forschung agiert. Eine Form der Brückengestaltung stellt sicher eine abstrakte systemische Betrachtung dar.

Tab. 1: Wesentliche Vergleichsmerkmale der motorischen Lerntheorien Schematheorie (Schmidt, 1975), Kontext-Interferenz-Lernen (Battig, 1966; Shea & Morgan, 1979) und Differenzielles Lernen (Schöllhorn, 1999)

	Schematheorie	Kontext-Interferenz-Lernen	Differenzielles Lernen
Ursprung	Kognitions-Psychologie (Physiologie) Regelkreis	Sprachlernforschung Linguistik (Psychologie)	Systemdynamik Physik
Kern	Schemata Invarianten/GMPs Variable Parameter	Zeitliche Variation – geblockt, seriell, randomisiert	Zunahme an Schwankungen/Variation in Inhalt und Zeit
Orientierung (Ideal)	personenunabhängig zeitunabhängig	personenunabhängig zeitunabhängig	individuell situativ (zeitlich ständig veränderlich)
Art der Ansteuerung	fremdgesteuert (mit externer Rückmeldung)	fremdgesteuert (mit externer Rückmeldung)	selbstorganisiert (≠ autark!)
Bisheriger Untersuchungsgegenstand	erfolgreiche Nachweise bei überwiegend kleinmotorischen Laboraufgaben vereinzelt erfolgreich getestet bei Sport (Probleme: siehe Rossum, 1990)	erfolgreiche Nachweise bei überwiegend kleinmotorischen Laboraufgaben unklare Befundlage bei großmotorischen oder Sportbewegungen und bei Kindern (vgl. Brady, 2008)	erfolgreiche Nachweise bei großmotorischen Sportaufgaben (Erwachsene und Jugendliche)
Praktische Umsetzung	Schema (Generalisiertes Motorisches Programm) wird durch Variation der variablen Parameter gefestigt – Invarianten werden mit variablen Parametern wiederholt.	Durch wechselnde Zusatzaufgaben wird zur Zielaufgabe ein Kontext erzeugt, der die Aneignung benachteiligt (interfere), den anschließenden Lernprozess jedoch positiv unterstützt.	Durch ständige Schwankungen wird der hochdimensionale Zielbereich der Aufgabe punktuell abgetastet und die Fähigkeit zur Interpolation genutzt. Schwankungen sind Elemente der Zielaufgabe.
Wirkbereich	Vorteile überwiegend während der Aneignungsphase	Nachteile in Aneignungsphase Vorteile in Lernphase	Vorteile bei Aneignungs- und Lernphase
Metapher/ Erklärung	Motorisches Programm Schallplatte	Recognitions-hypothese Elaborations-hypothese	Abtasten der intrinsischen Dynamik Absuchen einer physikalischen Potenziallandschaft nach Extrema

GMP: Generalisierte Motorische Programme

Literatur

- Ackerman, P. L. (1988). Determinants of individual differences during skill acquisition: Cognitive abilities and information processing. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(3), 288-318.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-149.
- Adams, J. A. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, 101, 41-47.
- Anochin, K. P. (1967). *Das funktionelle System als Grundlage der physiologischen Architektur des Verhaltensaktes*. Jena: G. Fischer VEB.
- Baccus, S. A., & Meister, M. (2002). Fast and slow contrast adaptation in retinal circuitry. *Neuron*, 36 (5), 909-919.
- Barreiros, J., Figueiredo, T., & Godinho, M. (2007). The contextual interference effect in applied settings. *European Physical Education Review*, 3(2), 195-208.
- Battig, W. F. (1966). Facilitation and interference. In E. A. Bilodeau (Ed.), *Acquisition of skill* (pp. 215-244). Oxford: Academic Press.
- 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.
- Battig, W. F. (1979). The flexibility of human memory. In L. S. Cermak, & F. I. M. Craik (Eds.), *Levels of processing and human memory* (pp. 23-44). New York: Lawrence Erlbaum Associates.
- Beckmann, H. & Schöllhorn, W. I. (2003). Differenzielles Kugelstoßtraining. In J. Krug & T. Müller (Hrsg.), *Messplätze, Messplatztraining, Motorisches Lernen* (S. 108-112). Sankt Augustin: Academia.
- Bielefelder Sportpädagogen. (1998, 2007). *Methoden im Sportunterricht* (Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport, 96, 1. Aufl. und 5. unveränd. Aufl.). Schorndorf: Hofmann.
- Brady, F. (1998). A theoretical and empirical review of the contextual interference effect and the learning of motor skills. *Quest (National Association for Physical Education in Higher Education)*, 50(3), 266-293.
- Brady, F. (2004). Contextual interference: a meta-analytic study. *Perceptual and Motor Skills*, 99(1), 116-126.
- Brady, F. (2008). The Contextual Interference Effect and Sport Skills. *Perceptual and Motor Skills*, 106(2), 461-472.
- Brehm, W. (1998). Wie lehrt man offene Fertigkeiten? In Bielefelder Sportpädagogen, *Methoden im Sportunterricht* (S. 47-64). Schorndorf: Hofmann.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Science*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Dempster, F. N. (1988). The spacing effect: A case study in the failure to apply the results of psychological research. *American Psychologist*, 43(8), 627-634.
- Drew, P. J., & Abbott, L. F. (2006). Models and Properties of Power-Law adaptation in neural systems. *Journal of Neurophysiology*, 96, 826-833.
- Farfel, V. S. (1962). Wege zur Vervollkommnung der sportlichen Technik (Das Methodische Prinzip der Schnellinformation). *Teorija i praktika fizioskoj kulture*, 5, 23-28.
- Feyerabend, P. (1986). *Wider den Methodenzwang*. Frankfurt: Suhrkamp.

- Fink, C., Schöllhorn, W. I., & Jaitner, T. (1999). *A more pragmatic criteria for filtering data. Conference Proceedings of the International Society of Biomechanics*. Calgary: University press.
- Fitts, M. P., & Posner, I. M. (1967). *Human performance*. Oxford, England: Brooks/Cole.
- Fleck, L. von (1935). *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache*. Basel: Schwabe.
- French, K. E., Rink, J. E., & Werner, P. H. (1990). Effects of contextual interference on retention of three volleyball skills. *Perceptual and Motor Skills*, 71, 179-186.
- Gebkenjans, F., Beckmann, H., & Schöllhorn, W. I. (2007). Does low and high contextual interference lead to different levels of noise? [Abstract]. In P. Beek, & R. van den Langenberg (Eds.), *3rd European Workshop on Movement Sciences. Book of Abstracts* (pp. 153-154). Köln: Sportverlag Strauß.
- Goldfield, E. C. (1995). *Emergent Forms – Origins and early development of human action and perception*. New York: Oxford University Press.
- Hamilton, A. F., Jones, K. E., & Wolpert, D. M. (2004). The scaling of motor noise with muscle strength and motor unit number in humans. *Experimental Brain Research*, 157(4), 417-430.
- Hays, M. J., Kornell, N., & Bjork, R. A. (2010). Costs and benefits of feedback during learning. *Psychonomic Bulletin and Review*, 17, 797-801.
- Hegen, P. & Schöllhorn, W. I. (2012). Gleichzeitig in verschiedenen Bereichen besser werden. *Leistungssport*, 42 (3), 17-23.
- Hofmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe.
- Hurlbert, S. H., & Lombardi, C. M. (2009). Final Collapse of the Neyman-Pearson Decision Theoretic Framework and Rise of the neoFisherian. *Annales Zoologici Fennici*, 46(5), 311-349.
- James, E. G. (2014). Short-term differential training decreases postural sway. *Gait Posture*, 39(1), 172-176.
- James, E. G., & Conatser, P. (2014). Effects of practice variability on unimanual arm rotation. *Journal of Motor Behavior*, 46(4), 203-210.
- Janssen, D., Schöllhorn, W. I., Lubienetzki, J., Fölling, K., Kokenge, H., & Davids, K. (2008). Recognition of emotions in gait patterns by means of artificial neural nets. *Journal of Non-verbal Behavior*, 32(2), 79-92.
- Janssen, D., Schöllhorn, W. I., Newell, K. M., Jäger, J. M., Rost, F., & Vehof, K. (2011). Diagnosing fatigue in gait patterns by support vector machines and self-organising maps. *Human Movement Science*, 30(5), 966-975.
- Jelsma, O., & Pieters, J. M. (1989). Practice schedule and cognitive style interaction in learning a maze task. *Applied Cognitive Psychology*, 3(1), 73-83.
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective on cognitive science*. Cambridge: MIT.
- Körding, K. P., Tenenbaum, J. B., & Shadmehr, R. (2007). The dynamics of memory as a consequence of optimal adaptation to a changing body. *Nature Neuroscience*, 10, 779-786.
- Künzell, S. (1996). *Motorik und Konnektionismus. Neuronale Netzwerke als Modell interner Bewegungsrepräsentationen*. Köln: bps-Verlag.
- Künzell, S. & Hossner, E. J. (2012). Differenzielles Lernen: eine Kritik. *Sportwissenschaft*, 42, 83-95.

- Lee, T. D., & Magill, R. A. (1983). The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9(4), 730-746.
- Limmons, E., & Shea, J. B. (1988). Deficient processing in learning and performance. In A. M. Colley, & J. R. Breech (Eds.), *Cognition and action in skilled behavior* (pp. 333-347). New York: Elsevier.
- Magill, R. A. (1992). Practice schedule considerations for enhancing human performance in sport. In R. W. Christina, & H. M. Eckert (Eds.), *The Academy papers, No. 25, Enhancing human performance in sport: New concepts and developments. Proceedings of the American Academy of Physical Education* (pp. 38-50). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Magill, R. A. (1994). The Influence of Augmented Feedback on Skill Learning Depends on Characteristics of the Skill and the Learner. *Quest*, 46, 314-327.
- Magill, R. A., & Hall, K. G. (1990). A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science*, 9(3-5), 241-289.
- Magill, R. A., Chamberlin, C. J., & Hall, K. G. (1991). Verbal knowledge of results as redundant information for learning an anticipation timing skill. *Human Movement Science*, 10, 485-507.
- Mendoza, L. (1993). *Biomechanisch gestützte Techniksteuerung im Hochleistungssport*. Köln: Sport und Buch Strauß.
- Mendoza, L., & Schöllhorn, W. I. (1990a). Technical training in the field of high performance athletes with a biomechanical feedback system. In G. P. Brüggemann, & J. K. Rühl (Eds.), *Techniques in Athletics – The first international conference, Cologne, 7-9 June 1990* (pp. 412-419). Köln: Strauß.
- Mendoza, L., & Schöllhorn, W. I. (1990b). Training of the sprint start with biomechanical feedback. In G. P. Brüggemann, & J. K. Rühl (Eds.), *Techniques in Athletics – The first international conference, Cologne, 7-9 June 1990* (pp. 690-694). Köln: Strauß.
- Mendoza, L. & Schöllhorn, W. I. (1990c). Techniktraining im Hochleistungsbereich mit Hilfe der biomechanisch gestützten Schnellinformation. In H. J. Menzel & R. Preiß (Hrsg.), *Forschungsgegenstand Sport* (S. 217-236). Frankfurt: Harri Deutsch.
- Mendoza, L. & Schöllhorn, W. I. (1991a). Biomechanisch gestütztes Techniktraining in der Leichtathletik am Beispiel des Diskuswerfens. In R. Dausgs, K. Blischke & N. Olivier (Hrsg.), *Sportmotorisches Lernen und Techniktraining, Bd. 2* (S. 11-15). Schorndorf: Hofmann.
- Mendoza, L. & Schöllhorn, W. I. (1991b). Die Ansteuerung räumlicher Merkmale der Diskuswurftechnik im Hochleistungsbereich mit Hilfe eines biomechanischen Schnellinformationssystems. *Leistungssport*, 3, 18-22.
- Mendoza, L. & Schöllhorn, W. I. (1991c). Biomechanisch gestütztes Techniktraining in Lauf- und Wurfdisziplinen. In M. Bührle & M. Schurr (Hrsg.), *Leistungssport: Herausforderung für die Sportwissenschaft* (S. 175-177). Schorndorf: Hofmann.
- Mendoza, L., & Schöllhorn, W. I. (1993). Training of the sprint start technique with biomechanical feedback. *Journal of Sport Sciences*, 11, 25-29.
- Miglino, O., Lund, H. H., & Nolfi, S. (1995). Evolving mobile robots in simulated and real environments. *Artificial life*, 2(4), 417-434.
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. A. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rhinehart, & Winston.
- Moxley, S. E. (1979). Schema: The variability of practice hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 11(1), 65-70.

- Richland, L. E., Finley, J. R., & Bjork, R. A. (2004). Differentiating the contextual interference effect from the spacing effect. In K. Forbus, D. Gentner, & T. Regier (Eds.), *Proceedings of the twenty-sixth annual conference of the cognitive science society* (pp. 1624). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Römer, J., Schöllhorn, W. I., Jaitner, T. & Preiss, R. (2003). Differenzielles Lernen bei der Aufschlagannahme im Volleyball. In J. Krug & T. Müller (Hrsg.), *Messplätze, Messplatztraining, Motorisches Lernen* (S. 129-133). Sankt Augustin: Academia.
- Römer, J., Schöllhorn, W. I., Jaitner, T. & Preiss, R. (2009). Differenzielles Lernen im Volleyball – Ein Unterrichtsvorhaben zur Verbesserung der Annahme. *Sportunterricht*, 58(2), 41-45.
- Rossum van, J. H. A. (1990). Schmidt's schema theory: The empirical base of the variability of practice hypothesis. A critical analysis. *Human Movement Science*, 9, 387-435.
- Roth, K. (1998). Wie lehrt man schwierige geschlossene Fertigkeiten? In Bielefelder Sportpädagogen (Hrsg.), *Methoden im Sportunterricht* (S. 27-46). Schorndorf: Hofmann.
- Savelsbergh, G. J. P., Kamper, W., Rabijs, J., De Koning, J., & Schöllhorn, W. (2010). A new method to learn to start in speed skating: A differential learning approach. *International Journal of Sport Psychology*, 41, 415-427.
- Schlicht, W. (1987). *Zum Verlauf von selbstbezogenen Kognitionen: Eine personbezogene Explorationsstudie im Hochleistungssport. Handlungskontrolle und soziale Prozesse im Sport. Bericht über die Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Sportpsychologie vom 30. April bis 1. Mai 1986 in Kiel* (S. 177-190). Köln: bps-Verlag.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill-learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). *Motor Control and Learning* (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2000). *Motor learning and performance* (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A., & Wrisberg, C. A. (2008). *Motor Learning and Performance* (4th ed.) Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schnabel, G., Harre, H. D. & Krug, J. (2011). *Trainingslehre – Trainingswissenschaft*. Aachen: Meyer & Meyer.
- Schöllhorn, W. I. (1993). *Biomechanische Einzelfallanalyse im Diskuswurf: Prozess und Produktorientierte Technikanalyse mechanischer Energieformen*. Frankfurt: Harri Deutsch.
- Schöllhorn, W. I. (1998). *Systemdynamische Betrachtung komplexer Bewegungsmuster im Lernprozess – Prozessorientierte Strukturierung der Entwicklung eines Bewegungsablaufs mit Hilfe biomechanischer Beschreibungsgrößen*. Frankfurt: Peter Lang Verlag.
- Schöllhorn, W. I. (1999). Individualität - ein vernachlässigter Parameter? *Leistungssport*, 29(2), 7-11.
- Schöllhorn, W. I. (1999a). *Konsequenzen der motorischen Entwicklung von Kleinkindern für das sportliche Training*. Österreichische Trainertagung Bad Aussee.
- Schöllhorn, W. I. (i. D.). Lehren und Lernen aus systemdynamischer Sicht. In R. Laging (Hrsg.), *Lernen und Lehren – Grundkategorien einer pädagogischen Bewegungslehre*. Kongressband zur Tagung 20.-21. März 2013 in Marburg.
- Schöllhorn, W. I., Beckmann, H. & Davids, K. (2010). Exploiting system fluctuations. Differential training in physical prevention and rehabilitation programs for health and exercise. *Medicina*, 46(6), 365-373.

- Schöllhorn, W. I., & Jäger, J. M. (2006). A Survey on Various Applications of Artificial Neural Networks in Selected Fields of Healthcare. In R. K. Begg, J. Kamruzzaman, & R. A. Sarker (Eds.), *Neural Networks in Healthcare: Potentials and Challenges* (pp. 20-59). London: Idea Group Inc.
- Schöllhorn, W. I., Hegen, P., & Davids, K. (2012). The Nonlinear Nature of Learning - A Differential Learning Approach. *The Open Sport Science Journal*, 5, 100-112.
- Schöllhorn, W. I., Humpert, V., Oelenberg, M., Michelbrink, M. & Beckmann, H. (2008). Differenzielles und Mentales Training im Tennis. *Leistungssport*, 38(6), 10-14.
- Schöllhorn, W. I., Jäger, J. M., & Janssen, D. (2008). Artificial neural network models of sports motions. In Y. Hong, & R. Bartlett (Eds.), *Handbook of Biomechanics and Human Movement Science* (pp. 50-64). New York: Routledge.
- Schöllhorn, W. I., Mayer-Kress, G., Newell, K. M., & Michelbrink, M. (2009). Time scales of adaptive behavior and motor learning in the presence of stochastic perturbations. *Human Movement Science*, 28(3), 319-333.
- Schöllhorn, W. I., Nigg, B. M., Stefanyshyn, D., & Liu, W. (2002). Identification of individual walking patterns using time discrete and time continuous data sets. *Gait & Posture*, 15(2), 180-186.
- Schöllhorn, W. I., Paschke, M. & Beckmann, H. (2006). Differenzielles Training im Volleyball beim Erlernen von zwei Techniken. In K. Langolf & R. Roth (Hrsg.), *Volleyball 2005 – Beach-WM* (S. 97-105). Hamburg: Czwalina.
- Schöllhorn, W. I., Sechelmann, M., Trockel, M. & Westers, R. (2004). Nie das Richtige trainieren, um richtig zu spielen. *Leistungssport*, 34(5), 13-17.
- Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, 126(3), 289-306.
- Schönherr, T., & Schöllhorn, W. I. (2003). Differential learning in basketball. In W. I. Schöllhorn, C. Bohn, J. M. Jäger, H. Schaper, & M. Alichmann (Eds.), *1st European Workshop on Movement Science. Book of Abstracts* (pp. 58-59). Köln: Sport & Buch Strauß.
- Sechelmann, M. & Schöllhorn, W. I. (2002). *Differenzielles Training im Fußballpassspiel. Posterpräsentation auf dem 5. Gemeinsamen Symposium der dvs-Sektionen Biomechanik, Sportmotorik und Trainingswissenschaft*. Leipzig.
- Shapiro, D. C., & Schmidt, R. A. (1982). The schema theory: recent evidence and developmental implications. In J. A. S. Kelso, & J. E. Clark (Eds.), *The development of movement control and Coordination* (pp. 113-150). Chichester: Wiley & Sons.
- Shapiro, D. C., Zernicke, R. F., Gregor, R. J., & Diestel, J. D. (1981). Evidence for generalized motor programs using gait-pattern analysis. *Journal of Motor Behavior*, 13(1), 33-47.
- 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(2), 179-187.
- Shea, J. B., & Zimny, S. T. (1983). Context Effects in Memory and Learning Movement Information. In R. A. Magil (Ed.), *Memory and Control of Action* (pp. 345-366). Amsterdam: North-Holland.
- Silverman, S. (1994). Communication and Motor Skill Learning: What We Learn From Research in the Gymnasium. *Quest*, 46, 345-355.
- Stegmüller, W. (1973). *„Jenseits von Popper und Carnap“: Die logischen Grundlagen des statistischen Schließens*. Berlin: Springer.

- Swinnen, S. P. (1996). Information Feedback for Motor Learning: A Review. In H. N. Zelaznik, *Advances in Motor Learning and Control* (pp. 36-66). Champaign, IL: Human kinetics.
- Swinnen, S. P., Vandenberghe, J., & Assche, E. V. van (1985). Role of cognitive style constructs field dependence-independence and reflection-impulsivity in skill acquisition. *Journal of Sport Psychology, 8*, 51-69.
- Trautmann, C. (2012). *Das Phänomen des kontralateralen Lerntransfers aus systemdynamischer Sicht am Beispiel des Handballschlagwurfs*. Unveröff. Diplomarbeit, Universität Mainz.
- Trockel, M. & Schöllhorn, W. I. (2003). Differenzielles Torschusstraining im Fußball. In J. Krug & T. Müller (Hrsg.), *Messplätze, Messplatztraining, Motorisches Lernen* (S. 102-107). Sankt Augustin: Academia.
- Van Rossum, J. (1990). Schmidt's schema theory. The empirical base of the variability of practice hypothesis: A critical analysis. *Human Movement Science, 9*, 387-435.
- Wagner, H., & Müller, E. (2008). The effects of differential and variable training on the quality parameters of a handball throw. *Sports Biomechanics, 7*, 54-71.
- Wu, H. G., Miyamoto, Y. R., Castro, L. N. G., Ölveczky, B. P., & Smith, M. A. (2014). Temporal structure of motor variability is dynamically regulated and predicts motor learning ability. *Nature Neuroscience, 17*(2), 312-321.
- Wulf, G. (1994). *Zur Optimierung motorischer Lernprozesse*. Schorndorf: Hofmann.
- Wulf, G., & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 9*(2), 185-211.
- Zimny, S. T. (1981). *The use of verbal protocol analysis to investigate the basis of contextual interference effects in the learning of a motor task*. Unpublished master's thesis, University of Colorado, Boulder.