

Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport

141

**Handbuch
Bewegungs-
wissenschaft –
Bewegungslehre**

Herausgegeben von
Heinz Mechling und Jörn Munzert

VERLAG HOFMANN SCHORNDORF

B.4 Motorisches Lernen

Ernst-Joachim Hossner & Stefan Künzell

Gliederung

- 1 **Begriffsbestimmung**
- 2 **Motorisches Lernen als Gegenstand bewegungswissenschaftlicher Forschung**
- 3 **Motorisches Lernen unter funktionalem Aspekt**
- 4 **Motorisches Lernen unter formalem Aspekt**
- 5 **Statt einer Zusammenfassung: Zur Lerngeschichte eines Beispielsystems**

Kurzreferat

Unter motorischem Lernen versteht man die erfahrungsabhängige und relativ überdauernde Veränderung der Kompetenz, in bestimmten Situationen durch ein bestimmtes Verhalten bestimmte Effekte zu erzielen. Nach dieser Begriffsbestimmung lassen sich klassische Lerntheorien im Hinblick auf die Akzentuierung der SR-Relation (Stimulus → Response: klassisches Konditionieren, Programmtheorien) oder die Akzentuierung der RE-Relation (Response → Effect: operantes Konditionieren, Regelungstheorien) einordnen. Moderne Lerntheorien gehen von einer emergenten motorischen Kontrolle aus, in der sich die R-Komponente in Abhängigkeit von Situation und antizipiertem Verhaltenseffekt ergibt (antizipative Verhaltenskontrolle, Motorikschemata). Die Plausibilität solcher S(R)E-Ansätze verdeutlicht sich nicht nur aus evolutionär-funktionaler Perspektive, sondern zeigt sich darüber hinaus auch in Formalisierungen mit konnektionistischen Modellen. Für Unterbestimmtheitsprobleme, die im Rahmen der Netzwerkmodellierung zu Tage treten, wird ein Lösungsvorschlag unterbreitet, der auf der Herstellung sensorischer Konsistenz beruht.

Schlagworte

Antizipative Verhaltenskontrolle, Konditionieren, merkmalspezifische Antizipation, Motorikschema, motorisches Lernen, Programmtheorien, Regelungstheorien, sensorische Konsistenz, Unterbestimmtheitsproblem

1 Begriffsbestimmung

Sportliche Situationen sind nicht zuletzt dadurch gekennzeichnet, dass situativ geforderte Bewegungsmuster nicht auf Antrieb gelingen. Bevor man eine sportliche Technik beherrscht, bedarf es vielmehr einer mehr oder weniger ausgedehnten Übungsphase. Da solche Übungsphasen auf die Veränderung der motorischen Kontrollmechanismen abzielen, die der Bewegungsausführung zugrunde liegen, spricht man von *motorischem Lernen*. Um genau solche motorischen Lernprozesse soll es in diesem Kapitel gehen.

Definitiv entspricht motorisches Lernen der erfahrungsabhängigen und relativ überdauernden Veränderung der Kompetenz, in bestimmten Situationen durch ein bestimmtes Verhalten bestimmte Effekte zu erzielen. Aus dieser Begriffsbestimmung ergeben sich folgende Konsequenzen:

- Vorübergehende Verhaltensänderungen fallen nicht unter den Lernbegriff. Die Frage, ob sich eine Intervention nur auf die aktuelle Ausführungsleistung, die Performanz, auswirkt oder ob sie zu überdauernden Lernleistungen führt, ist erst nach einer Ruhepause, einem Retentionsintervall, zu beantworten.
- „Veränderung“ ist neutral zu verstehen, was bedeutet, dass auch relativ überdauernde Leistungsminderungen als Lernprozesse zu deuten sind.
- Die obige Begriffsbestimmung beinhaltet, dass Lernen erfahrungsabhängig erfolgen soll. Ausgeschlossen werden damit Veränderungen, die auf Reifungs- oder Wachstumsprozesse zurückzuführen sind oder aufgrund von physiologischen Anpassungen an konditionelle Trainingsreize zustande kommen.
- Wenn von der Veränderung einer Kompetenz gesprochen wird, ist damit gemeint, dass die Verhaltensmöglichkeiten, die diese Kompetenz ausmachen, nicht unbedingt realisiert werden müssen, um dennoch als Lernprodukt zu gelten.
- Der Zusatz „motorisch“ kennzeichnet, dass sich das angesprochene Lernprodukt auf eine Veränderung der internen Prozesse der Bewegungskontrolle bezieht. Weil diese Kontrollprozesse Relationen von Situation, Verhalten und Effekt betreffen, beinhaltet dies gleichzeitig, dass auch veränderte sensorische Kompetenzen der Situations- und Effektwahrnehmung die motorische Kontrolle beeinflussen. Mit motorischem Lernen ist also eigentlich sensomotorisches Lernen oder – wenn man anders gewichten will – motosensorisches Lernen gemeint.
- Wenn in der Sportwissenschaft von motorischem Lernen geredet wird, dann ist damit in der Regel die Veränderung eines spezifischen Verhaltens angesprochen, die Veränderung sogenannter „Fertigkeiten“. Die Veränderung allgemeiner Leistungsvoraussetzungen, der „Fähigkeiten“, wird hingegen eher mit dem Begriff des Trainings verbunden.

Wie sieht es mit der Abgrenzung von motorischem Lernen zu lernbedingten Verhaltensänderungen aus, die auf höhere Prozesse der Kognition, Motivation und Emotion zurückzuführen sind? Diese Abgrenzung fällt schwerer als es auf den ersten Blick erscheinen mag, denn selbstverständlich geht *jede* Verhaltensäußerung

– also auch solche, die eigentlich „höhere“ Prozesse betreffen – mit motorischen Akten einher. Menschliches Handeln lässt sich auf diese Weise als Zusammenspiel der auf verschiedenen Ebenen einer Planungs- und Kontrollhierarchie ablaufenden Prozesse modellieren, wobei der einzelne Bewegungsakt auf der untersten Hierarchieebene festgelegt wird (für eine handlungstheoretische Modellierung vgl. Volpert, 1983; für eine tätigkeitsorientierte Modellierung Hacker, 1973). In einem solchen Mehrebenenmodell erachtet z. B. Bernstein (1998) den Wechsel der führenden Kontrollebene als ein wesentliches Merkmal des motorischen Lernprozesses. In Übereinstimmung mit den Konzeptionen der Kapitel zu psychologischen und neurowissenschaftlichen Modellen der Bewegungskoordination (vgl. Beiträge B.2 und B.3) wird hier hingegen eine engere Fassung des motorischen Lernbegriffs bevorzugt, ohne dabei den unstrittigen *Einfluss* höherer Prozesse in Frage stellen zu wollen. Im Zentrum der Betrachtungen sollen also solche Aspekte relativ überdauernder Verhaltensänderungen stehen, die die motorische Umsetzung einer bereits fixierten Intention betreffen. Nach einer kurzen Übersicht über den aktuellen Stand der bewegungswissenschaftlichen Lernforschung in Abschnitt 2 wird in Abschnitt 3 die Funktion des motorischen Lernens für einen Organismus beleuchtet, um daraus Konsequenzen für die Modellbildung abzuleiten. In Abschnitt 4 werden solche Modelle in einer formalen Sprache dargestellt. Die dabei aufgedeckte Unterbestimmtheit wird in einem eigenen Ansatz zu lösen versucht. Die diesem Ansatz zugrunde liegenden Überlegungen werden in Abschnitt 5 noch einmal an einem Beispiel verdeutlicht.

2 Motorisches Lernen als Gegenstand bewegungswissenschaftlicher Forschung

Aus bewegungswissenschaftlicher Perspektive geht es beim Thema „motorisches Lernen“ um die Untersuchung des Einflusses verschiedener Treatmentvariablen auf motorische Lernverläufe sowie um die theoretische Aufarbeitung der erhaltenen empirischen Befunde. Zum erstgenannten Fragenkomplex findet man in diesem Buch eine Fülle von experimentellen Resultaten der psychologisch-grundlagenorientierten sowie der sportwissenschaftlich-anwendungsorientierten Forschung (vgl. vor allem die Beiträge im Abschnitt D). Bei dem zweitgenannten Fragenkomplex sind zwei Schwerpunkte erkennbar. Zum einen wird die langfristige zeitliche Strukturierung von Lernprozessen untersucht. Hier ist vor allem die Einteilung aufgrund koordinativer Aspekte in dem Phasenkonzept von Meinel und Schnabel (1998) bekannt geworden. Sie geht von einer Dreischrittigkeit von (1)

Grobkoordination, (2) Feinkoordination sowie (3) stabilisierter Feinkoordination und variabler Verfügbarkeit aus. In der Sportpraxis findet man hier auch die Einteilung in Neulernen und Optimieren einer Bewegungsfertigkeit mit der „Automatisation“ als einem wichtigen Optimierungsaspekt. Im zweiten Schwerpunkt spielen Lerntheorien eine wichtige Rolle, wenn es um die Erklärung der beobachteten Verhaltensänderungen selbst geht. Was passiert also, wenn Menschen motorische Fertigkeiten erlernen oder optimieren? Genau diese Frage soll im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen in diesem Abschnitt stehen.

Zu Beginn dieses Kapitels wurde motorisches Lernen als erfahrungsabhängige und relativ überdauernde Veränderung der Kompetenz gekennzeichnet, in bestimmten Situationen durch ein bestimmtes Verhalten bestimmte Effekte zu erzielen. In dieser Definition werden motorische Aktionen (engl. *response*, R) auf der einen Seite mit situativen Bedingungen (engl. *stimulus*, S) und auf der anderen Seite mit resultierenden Situationsänderungen (engl. *effect*, E) in Beziehung gesetzt.

Tab. 1: Beispiele für Lerntheorien, geordnet nach akzentuierter Relation für die Verhaltensklärung sowie nach angenommenen Kontrollmechanismen

Kontrollmechanismus	Akzentuierte Relation	
	Stimulus → Response	Response → Effect
„Black box“	Klassisches Konditionieren (z. B. Pawlow)	Operantes Konditionieren (z. B. Thorndike)
Präskriptiv	Lernen von Programmen (z. B. Schmidt)	Lernen von Regelkreisgrößen (z. B. Adams)
Emergent	S(R)E-Lernen (z. B. Elsner & Hommel; Hoffmann; Munzert)	

Wie in Tabelle 1 gezeigt, lassen sich diese Komponenten auch heranziehen, um motorische Lerntheorien einzuordnen. Das erste Ordnungskriterium betrifft die Frage, ob in der betrachteten Theorie eher die SR- oder die RE-Relation akzentuiert wird. Kommt es also vor allem deshalb zu einem Verhaltensakt, weil eine situative Konstellation dies nahe legt ($S \rightarrow R$) oder weil damit ein bestimmter Effekt erzielt werden soll ($R \rightarrow E$)? Das zweite Ordnungskriterium bezieht sich zunächst auf die Frage, ob die Theorie Annahmen über interne Kontrollmechanismen macht oder nicht. Dass solche Annahmen nur auf Spekulationen beruhen und daher aus Gründen der Wissenschaftlichkeit nicht erlaubt sind, kennzeichnet eine der zentralen Grundpositionen des in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts vorherrschenden Behaviorismus. Es wurde daher gefordert, allein äußerlich beobacht-

bare Relationen zu betrachten und eventuelle kognitive Aspekte in eine nicht zu öffnende „Black box“ zu verbannen. Die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts stand dagegen genau umgekehrt im Lichte der Überzeugung, dass menschliches Verhalten nur dann verstanden werden kann, wenn die Theoriebildung auch intern ablaufende Kontrollprozesse der Kognition berücksichtigt. Die Frage, ob selbst kleinste Details der Bewegung zentral kontrolliert werden sollen oder ob sich diese nicht vielmehr bedingungsabhängig „ergeben“, ohne zentral kontrolliert werden zu müssen, erlaubt die Einteilung kognitiver Lerntheorien in solche mit präskriptivem und solche mit emergentem Charakter. Was genau mit dieser Unterscheidung gemeint ist, wird im Verlaufe der weiteren Darstellungen noch deutlicher werden.

Innerhalb des *Behaviorismus* sind grundlegend zwei Lernmechanismen zu unterscheiden. Beim *klassischen Konditionieren* wird in einer bereits vorliegenden SR-Verbindung der unbedingte Reiz durch einen neutralen ersetzt, indem dieser mit ausreichender Zuverlässigkeit in zeitlicher Nähe dargeboten wird. Das Standardbeispiel für diese Lernart ist der Hund von Pawlow (1953), bei dem der Speichelfluss (unbedingte Reaktion) nach einer Phase der gleichzeitigen Darbietung von Futter (unbedingter Reiz) mit einem Klingelton (bedingter Reiz) auch dann einsetzt (bedingte Reaktion), wenn nur die Klingel ertönt. Während nach der klassischen Konditionierung Verhalten also nach SR-Regeln *ausgelöst* wird, stehen die Effekte der RE-Beziehungen im Vordergrund des *operanten Konditionierens*, bei dem ein spontan auftretendes Verhalten durch Belohnungen verstärkt wird. Aufgrund der damit einhergehenden Bedürfnisbefriedigung wird dann nach dem „Law of Effect“ (Thorndike, 1931) eine entsprechende RE-Verbindung fixiert und damit die Auftretenswahrscheinlichkeit des Verhaltens erhöht. Beim operanten Konditionieren spielen also Belohnungen und Bestrafungen die vorherrschende Rolle.

Im Gegensatz zu behavioristischen Ansätzen fußen *kognitive Lerntheorien* auf der Annahme, dass sich die SRE-Komponenten nicht nur im äußerlichen Verhalten beobachten lassen, sondern dass darüber hinaus interne Repräsentationen dieser Komponenten eine Rolle spielen. Eine akzentuierte SR-Verhaltensbegründung bedeutet dann, dass ein intern identifizierter und mit Bedeutung versehender Reiz eine interne Struktur für die Auslösung eines Bewegungsgrundmusters aufruft. Die hierzu notwendige Kontrollstruktur hat die Form eines Programms, so dass der Erwerb solcher Kontrollstrukturen als *Programmieren* zu bezeichnen ist. Die *Schematheorie* von Schmidt (1975) stellt einen Klassiker dieser Denkrichtung dar, wenn auch einschränkend anzumerken ist, dass es sich bei dieser Theorie nur insofern um eine Programmlerntheorie handelt, als dass die zu erwerbenden motori-

schen Schemata als für die Programmrealisierung unverzichtbare Instanzen angesehen werden, der Erwerb der Motorikprogramme selbst jedoch nicht thematisiert wird. „Generalisierte“ Motorikprogramme sollen nach Schmidt eine ganze Klasse von Bewegungen steuern, wie z. B. den Tennis-Vorhand-Grunds Schlag in all seinen Variationen. Als invariante Programmmerkmale werden temporale und dynamische Relationen zwischen den Muskelimpulsen an die relevante Muskulatur angenommen. Wie schnell und mit wieviel Kraft der Tennisschlag *absolut* zur Ausführung kommt, wird durch das dem Programm zugeordnete Wiedergabe-Schema bestimmt, in dem regelhafte Beziehungen zwischen früheren Programmparametrisierungen, früheren Ausgangsbedingungen und früheren Bewegungsergebnissen gespeichert vorliegen. Da diese Speicherung schematisch, also in von den Einzelerfahrungen abstrahierter Form geschehen soll, ist eine der wichtigen Vorhersagen der Schematheorie, dass sich variable Übungsbedingungen hinsichtlich der Programmparametrisierung im Vergleich zu konstanten Bedingungen positiv auf die Güte des Lernresultats auswirken.

Die Schematheorie von Schmidt ist als Beispiel für eine SR-akzentuierte Verhaltensbegründung herangezogen worden, da nach dieser Vorstellung der unmittelbare Bewegungsimpuls stets auf die Aktivierung und Parametrisierung eines Motorikprogramms zurückzuführen ist. Die Kontrolle, ob damit der angestrebte Effekt auch tatsächlich eingetreten ist, spielt bei Schmidt hingegen eine nur nachgeordnete Rolle im Rahmen der Fehlerkorrektur oder der Bewegungsevaluation, ohne unmittelbar verhaltensauslösend zu wirken. Genau umgekehrt verhält es sich bei der *Regelungstheorie* von Adams (1971), in der die sogenannte *perzeptive Spur* die zentrale Kontrollinstanz darstellt. In ihr soll die Gesamtheit der mit jeder Bewegungsausführung einhergehenden Rückmeldungen repräsentiert sein, während eine hiervon unabhängige Gedächtnisspur als rudimentäres Motorikprogramm allein der Einleitung der Bewegung dient. Die unmittelbare motorische Kontrolle soll jedoch stets auf dem Vergleich der aktuell rückgemeldeten Istwerte mit den Sollwerten der im Laufe des Lernprozesses an Stärke zunehmenden perzeptiven Spur basieren. Verhalten wird also – im Gegensatz zu Schmidts Vorstellungen – weniger ausgelöst als vielmehr so lange ausgeführt, bis nach interner Analyse eine hinreichende Übereinstimmung von Soll- und Istwert vorliegt. Da die erwarteten sensorischen Konsequenzen, also die Effekte der Bewegung, die unmittelbare Kontrollgröße bilden, stellt die Regelungstheorie von Adams ein geeignetes Beispiel für eine RE-akzentuierte Verhaltensklärung und mit Blick auf den motorischen Lernprozess für ein *Regelkreislernen* dar.

Während sich die Schematheorie von Schmidt und die Regelungstheorie von Adams im Hinblick auf die Akzentuierung von SR- und RE-Relationen unterscheiden, weisen sie eine definitive Gemeinsamkeit im Hinblick auf die Annahme auf, dass selbst die kleinsten Details der Bewegung zentral – mittels Programmsteuerung bzw. Soll-Istwert-Regelung – kontrolliert werden. In dieser weitreichenden Art „vorschreibende“, präskriptive Theorien werden seit Beginn der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts in der Bewegungswissenschaft nicht mehr ernsthaft vertreten. Die entgegengesetzte Extremposition, die mit dem Schlagwort der „Emergenz“ gekennzeichnet wird, konnte sich jedoch ebenso wenig durchsetzen. Die grundlegende Idee besteht hier darin, dass sich Verhalten aufgrund von Randbedingungen ergibt, ohne dass hierzu eine zentrale Kontrollinstanz vonnöten wäre. Ein vermittelndes Modell zwischen Präskription und Emergenz könnte darin bestehen, dass Invarianten durch ein Schema festgelegt werden, die Parametrisierung aber über Randbedingungen vonstattengeht, die sich z. B. aus Aspekten der Umwelt ergeben und von daher nicht kognitiv zu fixieren sind. Wie Munzert (1989) in seinem Konzept des *Motorikschemas* argumentiert, könnten sich die zentralen Festlegungen in dieser Weise auf topologische Merkmale des Bewegungsverlaufs beschränken. Solche qualitativen Eigenschaften betreffen in Anlehnung an Bernstein (1984) z. B. eine angestrebte Kreisförmigkeit oder eine bestimmte Anzahl von Kreuzungspunkten der Bewegungsbahn. Quantitative, metrische Details der Bewegung wie z. B. Radien, Winkel oder Distanzen würden sich hingegen vor dem Hintergrund sogenannter Affordanzen (Gibson, 1982) ergeben, also von Merkmalen der Umwelt, die aufgrund ihres unmittelbaren Aufforderungscharakters bestehende Freiheitsgrade so weit einschränken, dass eine eindeutige Bewegungsbahn resultiert (vgl. auch Nitsch & Munzert, 1997).

Emergenz ist im vorliegenden Zusammenhang natürlich nicht so zu verstehen, dass Verhalten „von alleine“ auftritt. Insbesondere wird weiterhin angenommen, dass die R-Komponente in Abhängigkeit von situativen Bedingungen und angezieltem Effekt zustande kommt. Im Unterschied zu präskriptiven Modellen wird jedoch davon ausgegangen, dass die auf einen Effekt ausgerichtete Intention in einer gegebenen Situation ausreicht, um ein angemessenes Verhalten ablaufen zu lassen. Die R-Komponente „versteckt“ sich also quasi in den intentional eingebetteten SE-Relationen, so dass es wenig Sinn macht, motorisch emergente Ansätze dieser Art einer akzentuierten SR- oder RE-Verhaltensklärung zuzuordnen. Im Vordergrund steht vielmehr die Annahme, dass der motorische Lernprozess ganz grundsätzlich auf den Erwerb von S(R)E-Triplets ausgerichtet ist (vgl. auch Klix, 1992).

Einen hypothetischen Lernmechanismus für ein S(R)E-Lernen dieser Art liefert das *Modell der antizipativen Verhaltenskontrolle* von Hoffmann (1993; 2001). Angenommen wird hier, dass nach einem erfolgten Verhaltensakt stets ein Vergleich zwischen antizipierten und real eingetretenen Effekten durchgeführt wird. In einem primären Lernvorgang werden die RE-Verbindungen bei bestätigten Antizipationen verstärkt und bei nichtbestätigten geschwächt („R führt zu E“ bzw. „R führt nicht zu E“). Der sekundäre Lernvorgang bezieht sich dann darauf, dass die RE-Verbindungen in Abhängigkeit von den vorliegenden Situationsbedingungen differenziert werden („Unter der Bedingung S führt R zu E“ bzw. „Unter der Bedingung S führt R nicht zu E.“). Einen sehr ähnlichen Vorschlag findet man in dem Zweistufen-Lernmodell von Elsner und Hommel (2001), die ebenfalls von einer schrittweisen Ausbildung zunächst von RE- und erst anschließend von S(RE)-Verknüpfungen ausgehen. In beiden Fällen resultieren aus dem Lernprozess kognitive Koordinationsstrukturen, die eine zunehmende Sicherheit in der Vorhersage erlauben, unter welchen Bedingungen welches Verhalten zu welchen Effekten führt. Da in diesem Ansatz eine intern repräsentierte Situationswahrnehmung und Effektantizipation angenommen wird, kann der vorgeschlagene Lernmechanismus den kognitiven Modellen zugeordnet werden. Der Mechanismus ist insofern emergent, als dass diese Repräsentationen ausreichen, um Verhalten entstehen zu lassen, ohne dass Bewegungsdetails zentral gespeichert vorliegen müssen.

3 Motorisches Lernen unter funktionalem Aspekt

Wozu lernen wir überhaupt? Und: Worum geht es eigentlich, wenn motorisch gelernt wird? Wenn man grundsätzliche Fragen dieser Art stellt, begibt man sich auf das Gebiet der *funktionalen Analyse* eines Themenkreises (vgl. auch Neumann, 1992). Die damit verbundene Perspektive lässt sich leicht anhand der im vorangegangenen Abschnitt skizzierten Lerntheorien erläutern. Bei genauerer Betrachtung der beiden präskriptiven Theorien wird man nämlich feststellen, dass dort keine Antworten auf Wozu-Fragen gegeben werden. Was stattdessen geliefert wird, sind bildhafte *Metaphern*: Motorisches Lernen entspricht dem Erwerb von Motorikprogrammen bzw. der Speicherung von Regelkreisgrößen. Hoffmann liefert hingegen mit seinem Modell der antizipativen Verhaltenskontrolle einen sinnvollen Vorschlag für einen *Lernmechanismus*. Was sich ergeben soll, sind Kontrollstrukturen, die eine zunehmende Sicherheit in der Vorhersage erlauben, unter welchen Bedingungen welches Verhalten zu welchen Effekten führt. Dass eine solche Verhaltenssicherheit überlebensrelevant ist, liegt auf der Hand. Lernprozessen kommt damit

eine evolutionär wichtige Funktion zu. Die Frage, welcher tiefere Sinn hinter einer zunehmenden Programm- oder Regelkreiskontrolle stecken sollte, ist hingegen nur schwer zu beantworten.

Wenn wir noch ein wenig grundsätzlicher an das Phänomen des (motorischen) Lernens herangehen, wird deutlich, dass in der Evolution zwei parallele Mechanismen einer zunehmenden Anpassung an Umweltgegebenheiten auszumachen sind. Der erste Mechanismus betrifft die Stammesgeschichte, die *Phylogenese*, und funktioniert über Prozesse der Variation und Selektion. Organismen mit umweltangepasster Ausstattung geben ihre Gene mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit weiter. Der zweite Mechanismus betrifft die Individualentwicklung, die *Ontogenese*. Er ist insofern als gegenläufig zu bezeichnen, als dass lernfähige Organismen gerade *nicht* oder zumindest nicht vollständig mit einer festen Ausstattung versehen sind, die sich in vorangegangenen Generationen bewährt hat, sondern vielmehr in der Lage sind, ihre Verhaltensweisen auch kurzfristigeren Umweltänderungen anzupassen. Bei der Lernfähigkeit handelt es sich von daher um eine Medaille mit zwei Seiten. Phylogenetisch herausgebildete Funktionen, die aufgrund ihres hohen Bewährungsgrades mit der Geburt „fest verdrahtet“ vorliegen, haben den Vorteil einer Funktionsfähigkeit von Anfang an und in der Regel den einer sparsameren neuronalen Realisation, gleichzeitig aber auch den Nachteil einer weitestgehend fehlenden Anpassungsfähigkeit an veränderte Umweltbedingungen. Ontogenetische Lernprozesse auf der anderen Seite sind nur um den Preis einer anfänglichen Schutzlosigkeit des Organismus zu bekommen und bedürfen in der Regel einer recht aufwändigen neuronalen Struktur. Dafür ergibt sich aber eine erhöhte Anpassungsfähigkeit innerhalb einer Lebensspanne und beim Menschen darüber hinaus die in dieser Art einzigartige Fähigkeit, die Umwelt gemäß den eigenen Bedürfnissen vorausschauend zu verändern.

Eine neben der zunehmenden Anpassung an Umweltgegebenheiten zweite Entwicklungslinie der menschlichen Stammesgeschichte ist in der zunehmenden Organisation der biologischen Ausstattung zu sehen. Mit „Organisation“ ist im vorliegenden Zusammenhang der Zusammenschluss einer Vielzahl von Zellen zu einem Organismus gemeint, in dem einzelne Organe jeweils besondere Aufgaben erfüllen. Wenn man die Ausstattung des Menschen mit der eines niederen Organismus wie – im Extremfall – der eines Einzellers vergleicht, so zeigen sich natürlich deutliche Überlegenheiten des Menschen im Hinblick auf die abbildbaren Ausschnitte der Umwelt sowie auf die Eingriffsmöglichkeiten mittels der motorischen Systeme, die zudem beim Menschen in der Regel auf Ziele und bewertbare

Effekte ausgerichtet sind. Der diese Überlegenheit begründende hohe Organisationsgrad verlangt jedoch nach internen Koordinations- und Kontrollinstanzen (in psychologischer Terminologie „Repräsentationen“), die neurobiologisch in erster Linie Prozesse des Zentralen Nervensystems betreffen. Diese Mindestausstattung umfasst zum ersten Schnittstellen zur Umwelt – also sensorische Transduktoren und motorische Effektoren, die dafür sorgen, dass Umweltsignale in ein zentralnervöses Format überführt werden und dass aus zentralnervösen Erregungen Körperbewegungen entstehen – und zum zweiten interne Systeme, die übergeordnet für die Fixierung von Zielen und für die Bewertung erzielter Effekte zuständig sind und in denen nachgeordnet sensomotorische Kontrollstrukturen ausgebildet werden.

Nach der in Abschnitt 1 begründeten engen Fassung des Motorikbegriffs werden sich die weiteren Ausführungen auf Betrachtungen zu den nachgeordneten sensomotorischen Koordinationsstrukturen beschränken. Diese Beschränkung mag im vorliegenden Zusammenhang zunächst verwundern, da die Einzigartigkeit menschlicher Lernprozesse selbstredend auf Eigenheiten der übergeordneten Instanzen zurückzuführen ist. Am Beispiel des Sports: Nur Menschen können einen erzielten Effekt wie die Erreichung einer bestimmten 100m-Zeit im Hinblick auf dessen Stellenwert im langfristigen Trainingsprozess beurteilen. Nur Menschen setzen sich überhaupt solche künstlichen Ziele, wie sie für den Sport typisch sind. Was damit zum Ausdruck kommt, ist, dass es sich beim Sport um ein Produkt der kulturellen und nicht um eines der natürlichen Evolution handelt. Dass es dennoch Sinn macht, motorisches Lernen in evolutionären Zusammenhängen zu betrachten, wird deutlich, wenn man beachtet, dass die besonderen Leistungen, die in der jüngeren menschlichen Entwicklungsgeschichte aufgetreten sind, nicht erst durch eine qualitative Veränderung der sensomotorischen Kontrollstrukturen ermöglicht wurden. Mit anderen Worten: Es besteht kein Grund zu der Annahme, dass der Mensch die sensomotorische Kontrolle neu „erfunden“ hat. Vielmehr dürfte es so sein, dass Merkmale der sensomotorischen Kontrolle Randbedingungen für kulturelle Entwicklungen darstellen. Am Beispiel des Sports: Es konnten sich nur solche Sportarten herausbilden, die aufgrund der bestehenden natürlich-evolutionären Ausstattung zu bewältigen sind, und umgekehrt ist es genau diese phylogenetisch alte Ausstattung, die die Bewältigung erlaubt. Für die nachgeordneten Prozesse der sensomotorischen Kontrolle – und *nur* für diese nachgeordneten Prozesse – wird also im Folgenden davon ausgegangen, dass kein grundlegender Unterschied zwischen Menschen und z. B. anderen Säugetieren besteht. Dass

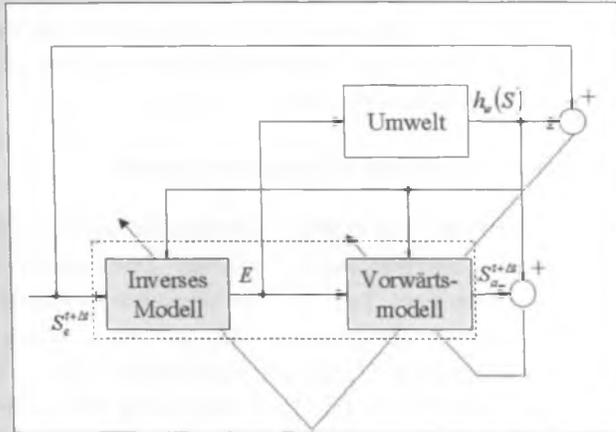
übergeordnete Zielsetzungen und Effektbewertungen beim Menschen ein völlig anderes Aussehen haben als bei Vertretern anderer Spezies, wird dabei durchaus in Rechnung gestellt. Betrachtet wird jedoch allein, wie diese Ziele und Bewertungen auf die Herausbildung sensomotorischer Kontrollinstanzen wirken, und nicht die Zielsetzungs- und Bewertungsprozesse selbst.

4 Motorisches Lernen unter formalem Aspekt

In Abschnitt 2 wurde erklärt, dass moderne Lerntheorien davon ausgehen, dass sich motorische Aktionen emergent aus der aktuellen Umweltsituation und dem angestrebten Effekt ergeben (vgl. Tab. 1). Eine emergente Eigenschaft entsteht durch die Interaktion mehrerer Komponenten eines dynamischen Systems, wobei die einzelnen Komponenten diese Eigenschaft nicht besitzen und sie nicht „von außen“ in das System gesteckt wird. Ihre Entstehung bleibt aber mystisch, wenn sie nicht durch Formalisierungen beschrieben oder in Simulationen nachvollzogen werden kann. Zu diesem Zweck sind für das motorische Lernen Modelle entwickelt worden, in denen die Eigenschaften dynamischer Systeme durch mathematische Gleichungen formalisiert vorliegen (z. B. Jordan, 1994). In Simulationen konnte dabei gezeigt werden, dass die formulierten Gleichungssysteme lösbar sind und sich die emergenten Eigenschaften tatsächlich ergeben (Jordan & Rumelhart, 1992).

Bei den folgenden Betrachtungen handelt es sich in gewisser Weise um eine Fortführung der funktionalen Diskussionen des vorangegangenen Abschnitts. Dort wurde für ein S(R)E-Lernen festgestellt, dass hiermit ein aus evolutionär-funktionaler Perspektive plausibler Lernmechanismus beschrieben wird. Nach der Behandlung der Wozu-Frage umfasst eine vollständige funktionale Analyse aber auch die Demonstration, dass die als plausibel erachteten Mechanismen tatsächlich funktionieren. In diesem Abschnitt soll daher erklärt werden, *wie* motorisches Lernen als emergente Eigenschaft entstehen kann. Da sich die hierzu notwendigen Formalisierungen stets auf dynamische Systeme beziehen, wird dabei nicht von „Organismen“ oder von „handelnden Subjekten“ die Rede sein, sondern der neutralere Begriff „System“ verwendet werden. Die im Text geschilderten Formalisierungen werden im Überblick in dem Exkurs-Kasten präzisiert. Diejenigen Leserinnen und Leser, die keine Freundschaft mit Formeln oder Grafiken geschlossen haben, können auch ohne Auseinandersetzung mit dem Exkurs dem weiteren Text folgen.

Exkurs: Mathematische und kontrolltheoretische Formalisierung



Die Abbildung zeigt die Methode des distalen überwachten Lernens (nach Jordan, 1994, S. 134) in der Notation der Kontrolltheorie. Das Lernsystem ist mit gestrichelten Linien eingekästelt. Die der Simulation zugrunde liegenden Gleichungen für das Vorwärtsmodell (1) und das inverse Modell (2) lauten:

$$(1) \quad h_w(S_a^{t+\Delta t}(t)) = f_m(h_w(S(t)), m(E(t-ct))) \quad (2) \quad E(t) = g_m(h_w(S_e^{t+\Delta t}(t)), h_w(S(t)))$$

mit der Wahrnehmungsfunktion h_w , der mentalen Repräsentation der Umwelt f_m , der mentalen Bewegungsrepräsentation g_m , den Efferenzen E sowie dem antizipierten (S_a), erwünschten (S_e) und tatsächlichen (S) Stimulus jeweils zum Zeitpunkt t .

Ausgabe des Vorwärtsmodells ist der zum Zeitpunkt t für den Zeitpunkt $t+\Delta t$ antizipierte wahrgenommene Stimulus $h_w(S_a^{t+\Delta t}(t))$. Parameter des Vorwärtsmodells sind der aktuelle Umweltzustand als zum Zeitpunkt t wahrgenommener Stimulus S sowie die vom inversen Modell produzierten, nach einer unbekanntem Verarbeitungszeit ct zur Verfügung stehenden Efferenzen E .

Ausgabe des inversen Modells sind die Bewegung erzeugenden Efferenzen. Eingabeparameter sind der wahrgenommene aktuelle Umweltzustand $h_w(S(t))$ sowie der zum Zeitpunkt t für den Zeitpunkt $t+\Delta t$ erwünschte wahrgenommene Umweltzustand $h_w(S_e^{t+\Delta t}(t))$.

Das Verhalten von dynamischen Systemen hängt sowohl von ihrem Zustand als auch von den auf sie einwirkenden Kräften ab. Motorische Kontrolle würde also bedeuten, dass das sensomotorische System gezielt auf das System Umwelt einwirkt. In der Terminologie der Kontrolltheorie handelt es sich bei dem sensomotorischen System um das Steuerglied, bei der Umwelt, die „gesteuert“ werden soll, um die Strecke. Zu diesem Zweck übt das System durch seine Bewegungen Kräfte

(oder in psychologischer Terminologie „Reaktionen“) auf die Umwelt aus. Die Umwelt wirkt wiederum durch Kräfte (in psychologischer Terminologie „Reize“) auf das System ein. Das Lernproblem ist dabei ein zweifaches: Erstens ist der Zustand der Umwelt nicht bekannt, sondern er muss aus den wirkenden Kräften konstruiert („wahrgenommen“) werden; zweitens ist unbekannt, welche Effekte durch welche Reaktionen bei welchen Umweltzuständen bewirkt werden.

Auf das erste Problem kommen wir später noch zurück. Das zweite Problem, die Kontrolle eines unbekanntes dynamischen Systems, ist Gegenstand intensiver Forschung. Eine mächtige Lösungsstrategie ist die *internal model control*-Strategie (Narendra, 1995). Dabei wird ein internes Modell des zu kontrollierenden Systems erstellt. Es dient dazu vorherzusagen, welche Aktion des Steuerglieds welche Ausgabe der Strecke bewirkt. Auf diese Weise kann es einen Fehler vorhersagen, bevor dieser tatsächlich vorliegt. In unserem Fall muss also das System ein Modell der Umwelt erlernen, mit dessen Hilfe antizipiert wird, welche seiner Reaktionen unter welchen wahrgenommenen Umweltbedingungen welche Effekte haben. Dieses Modell wird in der Kontrolltheorie *Vorwärtsmodell* genannt (vgl. Beitrag B.3). Es kann gelernt werden, indem der Vorhersagefehler, also die Differenz zwischen den tatsächlich eingetretenen und den vorhergesagten Effekten, zurückgemeldet wird. Jordan (1994) konnte zeigen, dass für das Problem des motorischen Lernens von Bewegungen, die nicht über Rückmeldungen gesteuert werden können, Lösungsstrategien ohne internes Vorwärtsmodell versagen.

Ziel des motorischen Lernens ist aber nicht, die Umwelt korrekt vorherzusagen, sondern sie den eigenen Zielen entsprechend zu verändern. Ein erwünschter Umweltzustand soll mittels einer Reaktion erreicht werden; das Steuerglied ist zu lernen. Da die Umweltdynamik aber unbekannt erscheint, ist bei einem vorliegenden Verhaltensfehler auch unbekannt, *was* denn an der Bewegung verändert werden muss, damit der Fehler kleiner wird. Beim *distalen überwachten Lernen* (Jordan & Rumelhart, 1992) wird genau dieses Problem durch das Vorwärtsmodell gelöst, indem es aus der Veränderung der Efferenzen die Veränderung in der Umwelt schätzt. Der Verhaltensfehler, d. h. die Differenz zwischen erwünschtem und tatsächlich erreichtem Umweltzustand, wird durch das Vorwärtsmodell in den Efferenzfehler, d. h. die Differenz zwischen einer zielerreichenden und der tatsächlichen Efferenz transformiert. Dabei kommt es nicht unbedingt darauf an, dass die quantitativen Änderungen richtig vorhergesehen werden. Die Richtung der Veränderung reicht vielmehr aus, um Lernen zu ermöglichen. Das Vorwärtsmodell muss also nicht perfekt, sondern nur ungefähr gelernt sein. Ist das Steuerglied

gelernt, entspricht es einem *inversen Modell* (vgl. Beiträge B.2 und B.3). Möchte man die beiden Modelle in sportwissenschaftliche Terminologie übertragen, so kommt dem inversen Modell die Bewegungssteuerung nahe, während das Vorwärtsmodell am ehesten mit Bewegungsvorstellung oder Bewegungsgefühl (Künzell, 2000a) zu bezeichnen wäre.

Zu beachten ist, dass es sehr viele Reaktionen gibt, die geeignet sind, um bei einem wahrgenommenen Umweltzustand einen gewünschten Umweltzustand zu erreichen. Dahinter verbirgt sich das *Problem der Freiheitsgrade*, das zuerst von Bernstein (1967) formuliert wurde und deswegen auch „Bernsteins Problem“ genannt wird. Das Problem ist jedoch nur dann problematisch, wenn es darum geht, aus der Vielzahl von möglichen Lösungen eine bestimmte festzulegen. Bei dem hier verfolgten emergenten Ansatz ergibt sich einfach aus der Dynamik des Systems eine der möglichen Lösungen. Die Unterbestimmtheit ist also eher eine Erleichterung. In weiteren Lernschritten kann durch das Beachten zusätzlicher Randbedingungen dann die optimale Lösung gefunden werden. Dies wird um so schwieriger, je weniger Freiheitsgrade vorhanden sind.

Wie sieht es mit dem weiter oben genannten ersten Lernproblem aus, dem Problem der internen Konstruktion des Umweltzustands aus den auf das System einwirkenden Reizen? In den bisherigen Betrachtungen dieses Abschnitts sind wir implizit davon ausgegangen, dass dieses Problem bereits gelöst sei, denn die Wahrnehmung des „tatsächlichen“ Umweltzustands stand immer fehlerfrei zur Verfügung, ohne dass eventuelle Wahrnehmungsfehler berücksichtigt worden wären. In dem in Abschnitt 2 dargestellten Modell der antizipativen Verhaltenskontrolle von Hoffmann wurde umgekehrt vorausgesetzt, dass Verhaltensfehler nicht aufgrund falscher Bewegungen, sondern wegen ungenügend differenzierter Wahrnehmungen auftreten. Folglich wird in dem von Hoffmann formulierten Mechanismus bei einer Differenz von antizipiertem und tatsächlichem Effekt die Wahrnehmung der Umwelt differenziert, während bei Jordan und Rumelhart in dem gleichen Fall sich die Bewegungskomponente anpassen muss.

Es ergibt sich erneut ein *Problem der Unterbestimmtheit* (vgl. Hossner, 2002; Künzell, 2002), denn es stellt sich die Frage, woran das System erkennen kann, ob ein Verhaltensfehler durch einen Wahrnehmungsfehler, einen Vorhersagefehler oder einen Bewegungsfehler verursacht wird. Dieses Problem wurde in der Literatur bislang stiefmütterlich behandelt, Lösungsvorschläge wurden u. W. nicht vorgelegt. Nach Auffassung der Autoren besteht ein erfolgsversprechender Ansatz darin, dass das System merkmalspezifisch immer wieder auftretende Übereinstim-

mungen der Reizsituation entdeckt. In erster Näherung könnte zu diesem Zweck eine Übereinstimmung zwischen „nicht-sensorischen“, interozeptiven und exterozeptiven Stimuli betrachtet werden. Auf „nicht-sensorische“ Stimuli ist dabei bisher nur geschlossen worden. Von Holst und Mittelstaedt (1950) beschäftigten sich mit der Tatsache, dass Änderungen der auf die Retina eintreffenden Reize unterschiedlich interpretiert werden, je nach dem, ob sich die Umwelt oder die Augen bewegt haben. Sie kommen zu der Erklärung, dass Änderungen des Retinabildes durch Augenbewegungen auf der Grundlage der an die Augenmuskulatur gesendeten Efferenzen antizipiert werden. Dies soll durch Verarbeitung einer Efferenzkopie und ohne Rückgriff auf sensorische Rückmeldungen geschehen. Die Verarbeitung der Efferenzkopie wird auch „nicht-sensorische Rückmeldung“ (Desmurget & Grafton, 2000) genannt; daran lehnt sich der (scheinbar paradoxe) Begriff „nicht-sensorischer Stimulus“ an.

Unser Lösungsansatz des Problems der Unterbestimmtheit besteht darin, dass z. B. für jede Sinnesmodalität spezifische Vorwärtsmodelle gelernt werden. Zusammengekommen repräsentieren die verschiedenen Vorwärtsmodelle die Antizipation der angestrebten Verhaltenseffekte. Eine große Diskrepanz zwischen den beteiligten Vorwärtsmodellen der verschiedenen Modalitäten (wie z. B. zwischen dem Gleichgewichtssinn und dem optischen Sinn bei Seegang auf einem Schiff, vgl. Stadler, 1999) kann zu Unwohlsein führen, später aber dem Lernen neuer Ausgangsbedingungen dienen, wie dies auch in Versuchen mit Prismenbrillen bestätigt wurde, bei denen die visuelle Wahrnehmung manipuliert wurde (vgl. zusammenfassend Heuer, 1983). Die zentrale – und nach diesen Befunden plausible – Annahme besteht darin, dass einer Konsistenz der Wahrnehmung höchste Priorität eingeräumt wird. Wenn sich also im Hinblick auf die Prüfung der vom nicht-sensorischen, vom interozeptiven und vom exterozeptiven Vorwärtsmodell vorhergesagten Verhaltenseffekte Unterschiede ergeben, folgt daraus, dass die Wahrnehmung differenziert werden muss. Dieser Mechanismus entspricht dem Vorschlag von Hoffmann. Wenn hingegen Unterschiede ausbleiben, die Effektantizipationen in verschiedenen Modalitäten also hinreichend übereinstimmen, dann kommt es darauf an, ob der antizipierte Effekt auch tatsächlich eingetreten ist. Wenn dies der Fall ist, kommt es zu einer Verstärkung der S(R)E-Tripel; wenn dies nicht der Fall ist, muss die R-Komponente verändert werden. Dieser Mechanismus entspricht dem Vorschlag von Jordan und Rumelhart. Dabei ist weniger davon auszugehen, dass es zu einer distinkten Entscheidung hinsichtlich der zu bevorzugenden Anpassung kommt. Es macht vielmehr Sinn anzunehmen, dass

Verstärkungen und Korrekturen nach dem Grad der Übereinstimmung zwischen den modalitätsspezifischen Antizipationen und tatsächlichen Resultaten aufgeteilt werden.

Das gleiche Prinzip des wechselseitigen Abgleichs und anschließender Aufteilung der Korrektur kann auch in fortgeschrittenen Lernstadien, bei denen es nicht um das Erlernen anfänglicher Wahrnehmungs- und Bewegungskategorien geht, zur Erklärung von motorischen Lernleistungen dienen (vgl. auch Künzell, 2000b). Hier ist es die Aufgabe des Mechanismus, den erwünschten, den antizipierten und den tatsächlich erreichten Umweltzustand zur Übereinstimmung zu bringen. Wenn tatsächlicher und antizipierter Effekt übereinstimmen, beide aber nicht dem erwünschten Effekt entsprechen, wird das inverse Modell angepasst (vgl. Abschnitt 5: Lernerlass 1), das tatsächlichen und antizipierten Effekt gleichermaßen beeinflusst. Bei Übereinstimmung von antizipiertem und erwünschtem Effekt, die aber beide nicht dem tatsächlichen Effekt entsprechen, wird die Wahrnehmung differenziert (vgl. Abschnitt 5: Lernerlass 2). Stimmen schließlich tatsächlicher und erwünschter Effekt überein, ohne dass dies antizipiert wurde, wird das Vorwärtsmodell angepasst (vgl. Abschnitt 5: Lernerlass 3).

Mit diesen beiden Zusatzmechanismen versehen müssten erfolgreiche Simulationen gelingen, in denen sowohl darauf verzichtet wird, von einer bereits differenzierten Wahrnehmung auszugehen, als auch auf die Vorstellung, dass die R-Komponente keiner lernabhängigen Anpassung bedarf. Zusammenfassend erhält man auf diese Weise ein theoretisches Modell für Lernprozesse, das sich zwar auf die in einer Handlungskontrollhierarchie „tiefen“ Mechanismen der motorischen Kontrolle beschränkt (Abschnitt 1), hier aber den modernen S(R)E-Lerntheorien mit der Annahme einer emergenten motorischen Kontrolle zuzurechnen ist (Abschnitt 2), und das sich sowohl aus funktionaler (Abschnitt 3) als auch aus formaler Perspektive (Abschnitt 4) als tragfähig erweist. Wie sieht es aus, wenn wir uns im folgenden Abschnitt 5 die zentralen Grundgedanken dieses Lernmodells noch einmal anhand eines sehr einfachen Beispiels vor Augen führen?

5 Statt einer Zusammenfassung: Zur Lerngeschichte eines Beispielsystems

Nehmen wir an, dass wir ein Beispielsystem in die Welt setzen, ein Beispielsystem, dem wir – um motorische Lernprozesse sozusagen „in Reinform“ zu beobachten – keinerlei Vorwissen mit auf den Weg geben wollen, so dass es sich von „Geburt“ an durch Lernen anpassen muss. Wie alle Vertreter der Beispielsystem-

spezies ist unser Beispielsystem bewegungsbegabt und verfügt über Sinne, die ihm Auskunft über den Zustand seines Körpers sowie seiner Umwelt geben. Genauer muss man hier sagen, dass die Sinne ihm diese Auskunft geben *könnten*, denn zu Beginn seiner Existenz erhält unser Beispielsystem nur eine bedeutungslose, von ihm nicht zu interpretierende Flut von Reizen – und von daher tut es auch nichts anderes, als unkontrolliert herumzuzappeln. Und wenn man noch genauer hinschaut: *Völlig* bedeutungslos ist der Wahrnehmungsstrom für das Beispielsystem nicht, denn einige Reize aus dem Körperinneren geben ihm unmittelbar das Gefühl, dass etwas nicht in Ordnung ist. Später würde es vielleicht sagen, dass es Hunger oder Durst hat, dass ihm zu heiß oder zu kalt ist oder dass es gestreichelt werden will. Im Moment „weiß“ es von diesen Bedeutungen noch nichts und die Wahrnehmung dürfte sich stattdessen auf ein „Mehr-oder-weniger-gut“ beschränken. In gewisser Hinsicht verfügt das Beispielsystem damit aber auch schon über Intentionen – wenn auch über sehr einfach gestrickte, die in etwa die folgende Form annehmen: Mehr vom Mehr-gut und weniger vom Weniger-gut! (Was das System auch nicht weiß, ist, dass sich an diesem archaischen Zustand wahrscheinlich während seines gesamten weiteren Lebens nichts Grundsätzliches mehr ändern wird. Aber dies ist ja vielleicht auch ganz gut so.)

Nehmen wir an, dass die beispielsystemtypische Umwelt von Beispielsystemen verlangt, dass sie später einmal selbst für sich sorgen. Dann sind zwei Dinge überlebenswichtig: Der noch bedeutungslose Wahrnehmungsstrom muss differenziert und das Zappeln kontrolliert werden. Wie kann dies gelingen? Eine grundlegende Strategie – die sich das System natürlich nicht „überlegen“ kann und die von daher fest „eingebaut“ sein muss – könnte darin bestehen, dass nach Zusammenhängen gesucht wird. Solche Zusammenhänge können zwischen Reizen verschiedener Sinnessysteme auftreten, zwischen motorischen und sensorischen Systemen und zwischen Motorik/Sensorik und dem Bewertungssystem, das feststellt, ob gerade alles in Richtung zu einem Mehr-gut oder zu einem Weniger-gut läuft. Das entspräche dann z. B. den folgenden Beobachtungen: Die vor meinen Augen auftauchenden rot-gelben Kugeln und dieses Rasselgeräusch, das ich höre, gehören irgendwie zusammen. Heftiges Strampeln mit den Beinen und ein Schmerz an den Füßen auch. Schreien und Gefüttertwerden haben etwas miteinander zu tun, und wenn dieses andere Beispielsystem auftaucht, das viel größer ist als ich, werde ich immer gestreichelt. Um es nochmals zu betonen: Dies sind natürlich nicht die Sätze, die sich unser Beispielsystem denkt, denn weder weiß es etwas von Kugeln noch von Farben, und erst recht hat es keinen Begriff davon, was es bedeutet, „ich“

zu sagen. Die Zusammenhänge sind jedoch nichtsdestoweniger dazu geeignet, dem System erste Strukturen zu verleihen. Um Bedeutung in diese Strukturen zu bekommen, geht es aber um mehr als einfache Zusammenhänge. Das Beispielsystem muss lernen, unter welchen Bedingungen welches Verhalten zu welchen Effekten führt.

Nehmen wir an, unser Beispielsystem wächst in dem Labor eines Verhaltensbiologen auf. In diesem Labor löst das Betätigen eines blauen Knopfes rechts vor dem System einen Mechanismus aus, der ihm eine wohlschmeckende Futterpille serviert. Von diesem Mechanismus weiß das System nicht das geringste. Und es würde auch nicht weiterhelfen, ihm diesen Mechanismus zu erklären, denn das Beispielsystem lebt im Moment ja noch in einem völlig bedeutungslosen Wahrnehmungsstrom. Was es merkt, ist, dass es im Moment Richtung Weniger-gut geht, denn es hat Hunger, und es tut alles, was in seiner Macht steht, um dieses Unwohlsein abzustellen: Es zappelt wild herum. Dabei trifft es zufällig den Knopf, bekommt die Futterpille, frisst sich satt und fühlt sich mehr-gut. Nach einiger Zeit hat es wieder Hunger, zappelt, berührt wieder den Knopf, bekommt wieder die Futterpille und fühlt sich wieder mehr-gut. Offensichtlich lohnt es sich für das Beispielsystem, sich diesen Vorgang einzuprägen. Im Einzelnen sollte es sich dabei die folgenden Details merken: Wenn ich Hunger habe, muss ich einen Zustand erzeugen, in dem ich meinen Greifarm auf dem Knopf rechts vor mir spüre und sehe, denn dann bekomme ich die Futterpille, die mich satt macht. Zwar kann auch dieser Satz wieder nicht vom Beispielsystem selbst formuliert werden; mit zunehmender Erfahrung wird es allerdings zuverlässig genau so agieren, als ob es diesen Satz verinnerlicht hätte. Wenn dem so ist, hat es etwas gelernt.

Nehmen wir an, der Verhaltensbiologe setzt unser Beispielsystem so um, dass sich der blaue Knopf nicht mehr rechts, sondern links von ihm befindet. Was wird das System jetzt tun, wenn es das nächste Mal Hunger bekommt? Es wird natürlich wieder nach rechts greifen, denn es hat ja gelernt, dass diese Bewegung mit einer Futterpille belohnt wird. (In dieser Hinsicht unterscheidet sich das Beispielsystem in keiner Weise von dem Autofahrer, der in seinem neuen Auto das Licht genauso anschaltet wie in seinem alten – und dabei immer wieder den Scheibenwischer in Gang setzt.) Die Futterpille bleibt diesmal jedoch aus. Und das System ist zu Recht verwirrt, denn der Greifarm fühlt sich ganz genauso an, wie er sich bisher immer angefühlt hatte, wenn eine Futterpille serviert worden war. Irgendwie ist der erreichte Zustand aber auch anders. Was fehlt, ist das Fühlen des Knopfs am Greifarm, und auch wird nicht gesehen, wie der Greifarm auf dem Knopf liegt. Wenn

dem Beispielsystem jetzt in den Sinn kommt, dass auch die Ausgangsbedingungen andere waren, ist es auf der richtigen Spur, denn was bisher gelernt wurde, scheint wohl nur unter der Bedingung zu gelten, dass „das Blaue“ rechts gesehen wird. Für die Situation „Blaues links“ ist das System jetzt wieder darauf angewiesen, so lange zu zappeln, bis dass der Knopf zufällig getroffen und die Futterpille serviert wird. Wenn das aber geschafft ist – und der Verhaltensbiologe gemein genug ist, die Positionen unseres Systems in Relation zum Knopf immer wieder zu variieren –, dann gewinnt das Beispielsystem zunehmend an Kompetenz, seinen Greifarm bedingungsabhängig zielgerichtet zum Knopf zu bewegen. Es hat dann so etwas wie ein sensomotorisches Konzept für die Richtung erworben. Was ihm noch völlig fehlt, sind Konzepte für rund vs. eckig, für blau vs. grün, für Knopf vs. Taste usw. Aber immerhin: Unser Beispielsystem ist auf dem besten Wege, sich sein persönliches Weltbild auszdifferenzieren. Und da es im Labor eines Verhaltensbiologen aufwächst, steht zu erwarten, dass dieser noch eine Unmenge an Erfahrungskategorien für unser System bereithält.

Nehmen wir an, unser Beispielsystem hat nach etlichen Mühen ganz viel gelernt. Nun will es Skifahren lernen. Dies ist nicht leicht, da Skihänge in der Regel ein völlig anderes Aussehen haben als verhaltensbiologische Labors. Zwar verfügt das System schon über Wahrnehmungskonzepte wie bergauf und bergab und Bewegungskonzepte, die auf nicht so schneeglatten Oberflächen das Gleichgewicht sichern; dennoch gleichen – mit milder Ironie betrachtet – die allerersten Versuche mit Skiern im Schnee ein wenig dem Zappeln im Labor. Nach einiger Zeit des Sammels von Bewegungserfahrungen durch Versuch und Irrtum und unterstützt durch einige methodische Kniffe einer Skilehrerin ist unser System in der Lage, bei griffigem Schnee aufrecht einen leichten Hang hinunter zu fahren. Doch bis zu einem guten Skifahrer ist es noch ein weiter Weg.

Nehmen wir also an, dass das Beispielsystem nicht nur „irgendwie“ sturzfrei unten am Hang ankommen will, sondern darüber hinaus eine Vorstellung davon entwickelt, wie dies geschehen soll, also z. B. mit extrem gearvten Kurven. Wie sich so etwas anfühlt, kann das System nicht sagen. (In formaler Sprache: Im fehlt ein entsprechendes Vorwärtsmodell.) Im Gegensatz zu seiner Lebensphase im verhaltensbiologischen Labor ist es jetzt allerdings nicht mehr auf bloßes Versuch-und-Irrtum-Lernen angewiesen. Es kann vielmehr mit seiner Skilehrerin absprechen, in welche Richtung es probieren soll, damit sich die erwünschten Verhaltenseffekte einstellen. Diese erwünschten Verhaltenseffekte (es soll E_{real} eintreten) kommen also zu der Antizipation von Verhaltenseffekten (es wird E_{ant} eintreten) und der

Wahrnehmung tatsächlicher Verhaltenseffekte (es ist E_{real} eingetreten) hinzu, die das System ja schon im Labor benötigte. Für das System ergeben sich damit die folgenden drei Lernanlässe, die zu jeweils unterschiedlichen Anpassungen führen.

Lernanlass 1: Unser System rutscht bei der Schrägfahrt immer noch quer zu den Skikanten ab. Dies kann es selbst spüren, sehen und hören. Die tatsächlichen Effekte entsprechen also weder den erwünschten noch den antizipierten. Aufgrund seiner Bewegungserfahrung weiß das System aber, was zu tun ist: Die Knie müssen mehr zum Hang gedreht werden. Bei der nächsten Fahrt korrigiert das System also die efferenten Kommandos an die Muskulatur so, dass die Schrägfahrt ohne Abrutschen gelingt.

Lernanlass 2: Die Skilehrerin (in puncto Gemeinheit durchaus mit dem Verhaltensbiologen vergleichbar) führt unser System auf einen anderen Hang, an dem sich vereiste Stellen befinden. Obwohl es gefahren ist wie sonst auch, fliegt das Beispielsystem prompt auf die Nase – sofern wir eine annehmen wollen. Erneut entsprechen die tatsächlichen Effekte nicht den erwünschten, zum Teil aber den antizipierten, denn die Bewegung an sich hat sich ja so angefühlt wie erwartet, das Bewegungsergebnis hingegen ganz anders. Für das System bedeutet dies jetzt, dass es die Wahrnehmung hinsichtlich der Griffigkeit der Unterlage differenziert und versucht, die Bewegung dahingehend anzupassen.

Lernanlass 3: Was bei einer Bewegung auf Skiern unter gegebenen Bedingungen rauskommt, lernt das System fortwährend, mit jeder Bewegungsdurchführung und auch dann, wenn der tatsächliche Effekt gar nicht hätte eintreten sollen. Vielleicht wird das System ja selbst einmal Skilehrer und kann dann beim Demonstrieren des Seittrutschens auf die Erfahrungen aus Lernanlass 1 zurückgreifen. Vielleicht wird es aber auch als Stunt-Beispielsystem arbeiten und weiß dann aus der Lernanlass 2-Situation schon, wie man bei vereisten Hängen spektakuläre Stürze produziert. Die Bewegung kann aber auch plötzlich und unerwartet gelingen – dies ist Lernanlass 3. Nehmen wir zur Verdeutlichung wieder an, dass unser System nun endlich gearvte Kurven fahren möchte. Es weiß, wie dies aussieht, hat es auch schon oft versucht, ist aber immer wieder gescheitert. Auch bei dem nächsten Versuch erwartet es, wieder mit den Skienden über die Falllinie zu rutschen. Doch durch eine Bodenunebenheit wird es in die richtige Ausgangslage gebracht, und unerwartet ziehen die Skier wie auf Schienen durch den Schnee. „Heureka!“, freut es sich. „Das ist es, was ich mir schon so lange gewünscht habe.“

In diesem Beispiel würde also der tatsächliche Effekt nicht dem antizipierten, allerdings einem erwünschten Effekt entsprechen. Was das System diesmal lernt,

ist das Bewegungsgefühl, das mit der Einleitung einer gearvten Kurve verbunden ist, und es versucht, dieses Gefühl auch beim nächsten Mal herzustellen.

Nehmen wir an, dass nach einer Vielzahl von Lerngelegenheiten nicht nur im Labor, sondern auch auf dem Skihang alles bestens läuft. Die bei den wahrgenommenen Ausgangsbedingungen erwarteten Effekte stellen sich zuverlässig ein und es gibt auch keine Überraschungen mehr im Hinblick auf ein Auseinanderfallen von antizipierten und erwünschten Effekten. „Ich kann Skifahren“, freut sich unser Beispielsystem und lässt sich von einem befreundeten System auf Video aufnehmen, wie es den Hang hinunterwedelt. Als es sich die Aufnahme zum ersten Mal anschaut, ist es allerdings entsetzt, denn es muss ein Beispielsystem entdecken, das ganz hinten auf den Skienden absitzt – und das sieht ziemlich stümperhaft aus. „Das hätte ich nicht gedacht!“, schnieft das System. „Es hat sich so gut angefühlt. Und dann so viel Rücklage! Ich habe noch ganz, ganz viel zu lernen.“ Wir wollen das System ein wenig trösten, denn im Gegensatz zu dem sprichwörtlichen Hans gilt: Was Beispielsystemchen nicht lernt, kann Beispielsystem immer noch lernen.

Literatur

- Adams, J.A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-150.
- Bernstein, N.A. (1967). *The Coordination and Regulation of Movements*. Oxford: Pergamon Press.
- Bernstein, N.A. (1984). The Problem of the Interrelation of Co-ordination and Localization. In H.T.A. Whiting (Ed.), *Human Motor Actions. Bernstein Reassessed* (pp. 77-119). Amsterdam: North-Holland.
- Bernstein, N.A. (1998). *Die Entwicklung der Bewegungsfertigkeiten*. Leipzig: IAT Eigenverlag.
- Desmurget, M. & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 423-431.
- Elsner, B. & Hommel, B. (2001). Effect anticipation and action control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 229-240.
- Gibson, J.J. (1982). *Wahrnehmung und Umwelt*. München: Urban & Schwarzenberg.

- Hacker, W. (1973). *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie*. Berlin: Volk und Wissen.
- Heuer, H. (1983). *Bewegungslernen*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe.
- Hoffmann, J. (2001). Das ideomotorische Prinzip, ABC, Closed Loops und Schemata. In J.R. Nitsch & H. Allmer (Hrsg.), *Denken – Sprechen – Bewegen* (S. 69-75). Köln: bps.
- Holst, E. von & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip. *Naturwissenschaften*, 37, 464-476.
- Hossner, E.-J. (2002). *Bewegende Ereignisse – ein Versuch über die menschliche Motorik*. Unveröffentlichte Habilitationsschrift, Universität Heidelberg.
- Jordan, M.I. (1994). Computationale Aspekte der Bewegungssteuerung und des motorischen Lernens. In H. Heuer & S. Keele (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie. Themenbereich C, Theorie und Forschung. Serie II, Kognition. Band 3, Psychomotorik* (S. 87-146). Göttingen: Hogrefe.
- Jordan, M.I. & Rumelhart, D.E. (1992). Forward models: Supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Science*, 16, 307-354.
- Klix, F. (1992). *Die Natur des Verstandes*. Göttingen: Hogrefe.
- Künzell, S. (2000a). Computermodelle aus dem Blickwinkel der handlungstheoretischen Psychologie. In D. Hackfort, J. Munzert & R. Seiler (Hrsg.), *Handeln im Sport als handlungspsychologisches Modell* (S. 115-130). Heidelberg: Asanger.
- Künzell, S. (2000b). Learning the Basics. In AISB (Ed.), *Time for AI and Society. Proceedings for the AISB'00 Symposium on How to Design a Functioning Mind* (pp. 151-152). Birmingham: University of Birmingham.
- Künzell, S. (2002). *Die Bedeutung der Efferenzkopie für das motorische Lernen*. Unveröffentlichte Dissertation, Universität Gießen.
- Meinel, K. & Schnabel, G. (1998). *Bewegungslehre – Sportmotorik* (9. stark überarbeitete Aufl.). Berlin: Sportverlag.
- Munzert, J. (1989). *Flexibilität des Handelns*. Köln: bps.
- Narendra, K.S. (1995). Adaptive Control: Neural Network Applications. In M.A. Arbib (Ed.), *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks* (pp. 69-73). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Neumann, O. (1992). Theorien der Aufmerksamkeit: Von Metaphern zu Mechanismen. *Psychologische Rundschau*, 43, 83-101.
- Nitsch, J.R. & Munzert, J. (1997). Handlungstheoretische Aspekte des Techniktrainings. Ansätze zu einem integrativen Modell. In J.R. Nitsch, A. Neumaier, H. de Marées & J. Mester (Hrsg.), *Techniktraining. Beiträge zu einem interdisziplinären Ansatz* (S. 109-172). Schorndorf: Hofmann.
- Pawlow, I.P. (1953). *Gesammelte Werke. Band 3*. Berlin: Akademie.
- Schmidt, R.A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 229-261.

- Stadler, M. (1999). *Psychologie an Bord* (5., überarb. und erw. Aufl.). Bielefeld: Klasing.
- Thorndike, E.L. (1931). *Human Learning*. New York: Century.
- Volpert, W. (1983). Das Modell der hierarchisch-sequentiellen Handlungsorganisation. In W. Hacker, W. Volpert & M. von Cranach (Hrsg.), *Kognitive und motivationale Aspekte der Handlung* (S. 38-58). Bern: Huber.