



5. Fertigkeiten

Vor drei Jahren hatten sich Alina und Mira mit dem Ziel zusammengetan, nationale Beachvolleyball-Meisterinnen zu werden – jetzt aber steht es 8:12 im Entscheidungssatz des Halbfinals.⁴¹ Im Moment versagen sie dramatisch in der Offensive, denn ihre Angriffe werden ein ums andere Mal abgewehrt, sodass der Ball als harter Gegenangriff zurückkommt. Eigentlich hatten sie erwartet, dass gerade dies kein Problem sein wird, denn ihr neuer Trainer Ben hatte in Videoanalysen doch herausgefunden, dass die gegnerische Abwehrspielerin ihre Bewegung aus der neutralen Ausgangsposition zur Angriffsabwehr immer schon beginnt, wenn sich die Angreiferin noch in der Ausholbewegung befindet. Bens Anweisung war daher, dass die beiden so lange mit der Entscheidung für eine Angriffsvariante warten, bis sie erkennen, in welche Richtung sich die Abwehrspielerin bewegt. Und genau dies klappt nun überhaupt nicht, denn das einzige, was passiert, ist, dass Alina und Mira ihre gewohnte technische Qualität im Angriff nicht erreichen. Ob es vielleicht besser gewesen wäre, wenn die beiden die Anweisung ihres – dann ja doch noch recht unerfahrenen – Trainers ignoriert hätten?

5.1 Bewegungsaufgaben lösen können

Nehmen wir ein schwieriges turnerisches Element wie den Seitz am Stufenbarren. In den vorangegangenen Kapiteln haben wir gelernt, dass wir dieses Element zwar in seinem Bewegungsverlauf beschreiben können, es aber letztlich besser als eine Bewegungsaufgabe verstehen. Die sportliche Technik stellt dann eine anerkannt gute Lösung einer solchen Bewegungsaufgabe dar. Die Qualität der Lösung lässt sich über funktionale Begründungen belegen, die – unter anderem – aus der Sportbiomechanik oder der Sportbiologie abzuleiten sind. Diese Ableitungen führen zu Merkmalen, durch die eine Technik wie der Seitz ausgezeichnet ist. Nachdem wir uns ein solch vertieftes Verständnis der Aufgaben des Sports angeeignet haben, wollen wir jetzt das Gebiet der Aufgabenanalyse verlassen und uns der Frage zuwenden, wie Sportlerinnen und Sportler es schaffen, die an der Bewegungsproduktion beteiligten Prozesse so koordiniert zu aktivieren, dass eine sportliche Technik realisiert und somit die Bewegungsaufgabe gelöst wird. Mit dieser Frage betreten wir das Feld der Sportmotorik. Anstelle von Techniken nehmen wir jetzt also die motorischen Fertigkeiten in den Blick, die das Vermögen umreißen, eine schwierige Technik fehlerfrei darzubieten, als Turnerin beispielsweise einen Seitz am Stufenbarren.



Sportmotorik (science of motor behavior in sport)

Unter Sportmotorik verstehen wir diejenige Teildisziplin der Sportwissenschaft, in der die sportliche Bewegung aus funktionaler Perspektive betrachtet wird. Dabei richtet sich das Erkenntnisinteresse insbesondere auf die Fragen, wie es Sportlerinnen und Sportlern gelingt, schwierige Bewegungen zu kontrollieren, und wie sich dies durch Prozesse des Lernens und der Entwicklung verändert.

Kommentar: Mit dem Zusatz „Sport“ in der Bezeichnung Sportmotorik wird darauf hingewiesen, dass sich die Betrachtungen auf sportliche Be-

wegungen richten und nicht auf Bewegungen des Alltags oder der Arbeitswelt. Im englischen Sprachraum ist anstelle einer wörtlichen Übersetzung des deutschen Begriffs auch die Kennzeichnung der Wissenschaftsdisziplin durch ihre Kerngebiete als „(science of) motor control, motor learning and motor development“ gebräuchlich.

Beim Fokuswechsel von Aufgabenanalysen auf das individuelle Vermögen, eine Aufgabe zu lösen, werden wir in diesem sowie den beiden nachfolgenden Kapiteln zunächst einige Grundlagen der motorischen Kontrolle behandeln, um darauf aufbauend ab Kapitel 8 zu schauen, was wir tun können, um Lernende beim Fertigkeitserwerb bestmöglich zu unterstützen. Der Fachbegriff der motorischen Kontrolle ist insofern eng mit dem Fertigkeitserwerb verbunden, als er sich auf die Koordination aller an der Bewegungsproduktion beteiligten Prozesse bezieht. Die Betonung der „Kontrolle“ weist dabei darauf hin, dass es sich um die Betrachtung von Bewegungen handelt, die die Funktion haben, ein bestimmtes Bewegungsziel zu erreichen. Natürlich handelt es sich auch dann um motorische Kontrolle, wenn das Lösen einer Bewegungsaufgabe zwar angestrebt ist, aber nicht gelingen sollte – sie ist dann nur nicht so gut ausgeprägt. Auch wenn der Kontrollbegriff vielleicht etwas technisch wirkt, so wird doch auch im allgemeinen Sprachgebrauch deutlich, dass „unkontrollierte“ Bewegungen tatsächlich ziellos und damit auch meist unerwünscht sind.



Motorische Kontrolle (motor control)

Unter motorischer Kontrolle verstehen wir das nicht direkt beobachtbare, im Innern zu verortende und mehr oder weniger gut ausgeprägte Vermögen von Sportlerinnen und Sportlern, auf Ziele gerichtete, äußerlich sichtbare Bewegungen willkürlich auszuführen.

Kommentar: Der Begriff der motorischen Kontrolle legt nahe, dass es eine Instanz gibt, die diese Kontrolle ausübt. Dies ist aber nicht zwingend der Fall, denn die Kontrolle kann sich auch ohne „Kontrollleur“ selbstorganisiert ergeben. Als synonyme

Bezeichnung finden wir in der Sportmotorik „Bewegungskontrolle“, wobei „motorische Kontrolle“ wissenschaftlich exakter ist, weil sich die Kontrolle auf einen inneren Aspekt und damit auf die Motorik und nur mittelbar auf die äußerlich sichtbare Bewegung bezieht. Nicht als synonym sind hingegen die Begriffe der Bewegungsregelung/-regulation oder der Bewegungssteuerung aufzufassen, da mit ihnen spezifische theoretische Positionen zu Kontrollarchitekturen angesprochen werden.

Wenden wir uns also im Folgenden Grundlagen der motorischen Kontrolle zu, dann liegt es – zumindest auf den ersten Blick – nahe, das Thema genauso anzugehen, wie in den vorherigen Kapiteln die sportlichen Techniken. In diesen haben wir verdeutlicht, dass menschliche Bewegungen auf der Wirkung von Kräften beruhen und dass zur Lösung sportlicher Bewegungsaufgaben solche Kräfte in der Regel selbst erzeugt werden müssen. Dies gelingt insbesondere dadurch, dass Muskeln innerviert werden, dass diese Erregungen vom zentralen Nervensystem ausgehen und dass wir deshalb sagen dürfen, dass das zentrale Nervensystem das letztlich zuständige Organ für die Lösung von Bewegungsaufgaben ist. Anders aber als der für die Kraftproduktion zuständige Muskel, dem wir aufgrund seiner Dicke unmittelbar ansehen können, dass er mehr Kraft entwickeln kann als ein dünner Muskel, ändert sich das zentrale Nervensystem im Zuge der verbesserten Funktionalität hinsichtlich seiner äußeren Erscheinung nicht grundlegend. Das Geheimnis eines ausgeprägten Bewegungskönnens verbirgt sich also nicht hinter einem schlichten Mehr an Nervenzellen oder Synapsen, sondern vielmehr hinter der besonderen Vernetzung des Nervensystems auf der Ebene des Gehirns.

Für die Betrachtung von Prozessen der Bewegungskontrolle aus sportmotorischer Perspektive hat diese Feststellung zwei wichtige Konsequenzen. Zum Ersten sollte sich die Sportmotorik für Gegebenheiten des zentralen Nervensystems interessieren und bei der Erklärung von Kontrollprozessen sportbiologische Randbedingungen berücksichtigen. Zum Zweiten sollte sie dabei

aber nicht allzu optimistisch sein, biologische Gegebenheiten eins zu eins abbilden zu können; da koordinierte Bewegungen aus dem Zusammenwirken von Abermillionen von Nervenzellen resultieren, ist eine solche Eins-zu-eins-Zuordnung nahezu ausgeschlossen. Konkret heißt dies: Ob wir es mit einem Gehirn zu tun haben, dessen Eigentümerin einen Seitz am Stufenbaren beherrscht oder nicht, ist auch unter Anwendung modernster neurowissenschaftlicher Methoden nicht zu sagen – es ist vielmehr nicht einmal zuverlässig zu erkennen, ob die Eigentümerin überhaupt über sportliche Erfahrungen verfügt oder ihr Leben lang durch Sportabstinenz gegläntzt hat. Aus diesem Grunde besteht in der Sportmotorik eine weitgehende Übereinkunft, sportliche Expertise zwar mit dem zentralen Nervensystem in Verbindung zu bringen, letztlich aber bei der Erklärung gekonnten Bewegungsverhaltens auf Metaphern zurückzugreifen (gr. *metaphora* = Übertragung). Dies bedeutet, dass nach „Bildern“ – in Wissenschaftssprache: nach Modellen – gesucht wird, die die biologischen Gegebenheiten zwar nicht direkt abbilden, sich aber dennoch als geeignet erweisen, zum Verständnis motorischer Kontrollprozesse beizutragen.

Eine klassische Metapher der Sportmotorik ist das Bild des Computers. Nach dieser Metapher funktioniert der Mensch bei der Bewegungskontrolle in gewisser Weise wie ein elektronischer Rechner, der Eingaben erhält (beim Computer über die Tastatur, beim Menschen über die Sinnesorgane) und nach zentraler Verrechnung (beim Computer im Zentralprozessor, beim Menschen im zentralen Nervensystem) in Ausgaben überführt (beim Computer in Monitorarstellungen, beim Menschen in Bewegungen). Für beherrschte Bewegungstechniken drängt sich dann die Analogie des „Motorikprogramms“ auf, also einer Struktur, die zentral gespeichert ist (beim PC auf der Festplatte, beim Menschen im Gehirn) und die bei Bedarf aus dem Gedächtnisspeicher abgerufen werden kann. In der Bewertung dieser Metapher besteht die Aufgabe der Sportmotorik darin, auf der einen Seite zu schauen, inwieweit das gewählte Bild mit Gegebenheiten des zentralen Nervensystems in Einklang zu bringen ist, und auf der anderen Seite – und insbesondere – zu überprüfen, ob sich Vorhersagen, die aus dem Compu-

5. Fertigkeiten

ter-Modell ableitbar sind, bei wissenschaftlicher Prüfung des äußerlich sichtbaren Bewegungsverhaltens bestätigen oder nicht. Bei einer umfassenden Bestätigung dürften wir sagen, dass wir es mit einer brauchbaren Metapher zu tun haben.

Als Motorikinteressierte begeben wir uns auf diese Weise gewissermaßen in die Rolle eines Ingenieurs oder einer Ingenieurin mit der Aufgabe, ein System zu entwerfen, welches sich im Hinblick auf die Kontrolle komplexer Bewegungen genauso verhält, wie wir dies von Menschen kennen, die sich im Sport bewegen. Es geht also – wie schon in den vorangegangenen Kapiteln zu sportlichen Aufgaben und sportlichen Techniken – um eine funktionale Betrachtung, diesmal allerdings weniger von außen im Hinblick auf Technik-Sollwerte als vielmehr von innen im Hinblick auf das Kontrollsystem, dessen funktionale Strukturierung die Ausführung entsprechender Bewegungen ermöglicht. Die Fragen, welche Modellvorstellungen ein in diesem Sinne funktionaler Zugang zutage gebracht hat und welche Vorstellungen heute vorherrschen, sollen in diesem Kapitel beantwortet werden.

5.1.1 Closed-loop-Regelung und Open-loop-Steuerung

Wenn wir uns auf den ingenieurmäßigen Weg der Konstruktion eines Systems zur Bewegungskontrolle begeben, ist zunächst einmal wichtig zu sehen, dass wir zwei Teilsysteme unterscheiden müssen: ein Teilsystem, das Kontrolle ausübt, und ein Teilsystem, das kontrolliert wird. Nach den in den vorangegangenen Kapiteln besprochenen Grundlagen dürfen wir das Kontrollsystem im zentralen Nervensystem verorten, genau genommen: in demjenigen Teil des zentralen Nervensystems, der für die Koordination und das Aussenden von Nervenimpulsen an die Muskulatur zuständig ist. Sämtliche zentralnervösen Zusatzmechanismen, die sicherstellen, dass die ausgesandten Impulse zu den gewünschten Bewegungseffekten führen, gehören im Grunde schon zu dem zu kontrollierenden Teilsystem, erst recht aber der eigene Körper mit den Muskeln und dem passiven Bewegungsapparat. Dass dieser Körper den Regeln der Physik unterliegt, muss

dabei im Kontrollsystem genauso berücksichtigt werden wie sämtliche Kräfte, die von außen auf den Körper einwirken und daher das Bewegungsverhalten mitbestimmen. Zugegebenermaßen muss man sich zwar an den Gedanken ein wenig gewöhnen, dass die Bewegung – samt ihrer Kontrolle – einerseits vom Körper realisiert wird, andererseits und zugleich aber der Körper außerhalb des Bewegungskontrollsystems liegt; für das Verständnis der weiteren Ausführungen ist es allerdings sehr hilfreich, diesen Gedanken gründlich nachzuvollziehen.

Führen wir den damit begonnenen Gedankengang fort, besteht das Kontrollproblem darin, einen aktuellen Ausgangszustand außerhalb des Kontrollsystems in einen angestrebten neuen Zustand, den Zielzustand, zu überführen. Gängigen – in Tabelle 5.1 im Überblick dargestellten – Konventionen folgend wollen wir im Weiteren den Ausgangszustand mit S_0 kennzeichnen und den erwünschten Zielzustand mit S_1^* (mit S für state oder auch Situation oder Stimulus; sprich: „ess-null“ bzw. „ess-eins-sterne“). Dabei sollen die Ziffern 0 und 1 die Zeit andeuten, die während der Zustandsänderung vergeht (vom Zeitpunkt t_0 zum Zeitpunkt t_1), und das Sternchen * beim Zielzustand, dass dieser Zustand im Moment noch nicht vorliegt, sondern als anzustrebendes Bewegungsziel vorgestellt wird. Unterscheiden wollen wir schließlich noch S_0 und S_0' (sprich: „ess-null-strich“), wobei uns der zusätzliche Strich bei S_0' anzeigt, dass es sich hierbei nicht um die „tatsächliche“ Ausgangssituation handelt, sondern um die Ausgangssituation, wie wir sie wahrnehmen. Diese Unterscheidung ist sinnvoll, weil – wie wir es aus der eigenen Erfahrung kennen – die Wahrnehmung keineswegs dem entsprechen muss, was „tatsächlich“ der Fall ist. Es kann also sein, dass ich als Skianfänger denke, schon ganz tief in die Knie gegangen zu sein, während mir die Skilehrerin sagt, dass meine Beine noch immer viel zu gestreckt sind. Zwar hat in diesem Beispiel meine Selbstwahrnehmung unzweifelhaft etwas mit der „tatsächlichen“ Körperhaltung zu tun; sie mag aber falsch oder zumindest verzerrt oder unvollständig sein. Für unser Problem ist es aus diesem Grunde ratsam, den „tatsächlichen“ Ausgangszustand S_0 – auf den letztlich niemand einen direkten Zugriff hat – von der Wahrnehmung die-

ses Zustands S_0' zu unterscheiden. Bei S_0 handelt es sich dann um eine externe Größe (lat. *externus* = äußerlich), also eine Größe, die von außen beobachtet werden könnte, während S_0' nur dem sich bewegenden Sportler zugänglich ist und daher als interne Größe aufzufassen ist (lat. *internus* = innerlich). Bei S_1^* benötigen wir diese Unterscheidung hingegen nicht, da das Bewegungsziel stets im Sportler verankert ist. Zwar ist davon auszugehen, dass dieses Ziel einem äußerlichen Bewegungszustand entspricht, jenseits der inneren Vornahme kommt es jedoch nicht noch zusätzlich im Außen vor. Zusammenfassend können wir sagen, dass Bewegungskontrolle zum Zeitpunkt t_0 darauf ausgerichtet ist, zum Zeitpunkt t_1 einen Zustand zu erzeugen, der dem zum Zeitpunkt t_1 angezielten Zustand entspricht – anders ausgedrückt: für den gilt: $S_1' = S_1^*$.

All dies mag sich auf den ersten Blick nach überflüssiger Mathematik anhören; wir werden aber sehen, dass sich die Durchdringung dieser einfachen Formalisierungen lohnt, wenn wir ein tieferes Verständnis für motorische Kontrolle erwerben wollen. So können wir beispielsweise schon jetzt nachvollziehen, dass die Kontrolle sportlicher Bewegungen nur einen Sonderfall der Verhaltenskontrolle darstellt. Bei ihnen setzt die Überführung von S_0' in S_1^* in der Regel die gelungene Ausführung einer schwierigen Bewegungsantwort R (für Response) voraus und

das Erreichen von S_1^* hängt aus diesem Grund vor allem davon ab, dass der Sportler die zu dieser Bewegungsantwort passenden Kommandos R' an das zu kontrollierende System sendet. Diese Bedeutung der selbst erzeugten Bewegungskommandos zeigt sich in extremer Ausprägung bei der Gewichtheberin, die nicht darauf hoffen darf, dass sich die Hantel von alleine in die Hochhalte bewegt. Der andere Extremfall der Verhaltenskontrolle tritt dann auf, wenn das Eintreten erwünschter Zustände erwartet werden darf, ohne dass es meines Zutuns bedürfte. In der Welt des Sports kommt dies deutlich seltener vor als im Alltag; ein Beispiel wäre, dass eine Curling-Spielerin auf das Wischen verzichtet, weil der Stein perfekt abgegeben wurde und dessen Bahn daher nicht optimiert werden muss. Die *typische* Sportsituation liegt irgendwo zwischen diesen beiden extremen Polen, wie es sich etwa bei der Bobfahrerin zeigt, die zwar Steuerbewegungen ausführt, diese aber möglichst klein hält und im Idealfall den Bob einfach laufen lässt. Auf das an dieser Stelle bereits sichtbar werdende Prinzip, möglichst wenig steuernd einzugreifen und stattdessen die ansonsten wirkenden Kräfte auszunutzen, werden wir später noch einmal zurückkommen, wenn in Kapitel 8 die „Ausnutzung von Freiheitsgraden“ als Merkmal in den Blick genommen wird, das die motorische Kontrolle von Expertinnen und Experten nach langjährigem sportlichen Training charakterisiert.

Tabelle 5.1: Relevante Größen motorischer Kontrollarchitekturen im Überblick

Abkürzung	Kontrollgröße
t_0	Zeitpunkt zu Beginn des Kontrollprozesses
t_1	Zeitpunkt zum nächsten Zeittakt (oft: Zeitpunkt der Zielerreichung)
S_0	„tatsächlicher“ externaler Zustand zum Zeitpunkt t_0
S_0'	internal wahrgenommener Zustand zum Zeitpunkt t_0
S_1	„tatsächlicher“ externaler Zustand zum Zeitpunkt t_1
S_1^*	Bewegungsziel als erwünschter Zustand zum Zeitpunkt t_1
\hat{S}_1	aufgrund von R' für den Zeitpunkt t_1 vorhergesagter Zustand
R'	internal ausgegebene motorische Kontrollkommandos
R	„tatsächliche“ externe Auswirkung der Kontrollkommandos

5. Fertigkeiten

Wenden wir uns – nachdem der formale Rahmen definiert ist – Details der internen Kontrollmechanismen zu, auf die ein Sportler für die Überführung eines Ausgangszustands S_0' in einen erwünschten Zielzustand S_1^* zurückgreifen kann. Hier werden in der Bewegungswissenschaft klassischerweise zwei grundlegende Möglichkeiten unterschieden: die Closed-loop-Regelung und die Open-loop-Steuerung. Beide Mechanismen werden in den Abbildungen 5.1 und 5.2 in direkter Gegenüberstellung veranschaulicht und zwar im Hinblick auf die jeweilige Grundidee, auf

Prozessdetails und auf Beispiele aus der Welt der Technik sowie der Welt des Sports.

Der Kerngedanke der in der linken Spalte beider Abbildungen veranschaulichten Closed-loop-Regelung besteht darin, dass in einer „geschlossenen Schleife“ (engl. closed loop) ein Regelkreis so lange durchlaufen wird, bis der aktuelle Zustand dem erwünschten Zustand entspricht. Dies lässt sich gut als Pfeil symbolisieren, der in sich selbst zurückführt. Die Überführung eines Ausgangszustands S_0 in einen Zielzustand

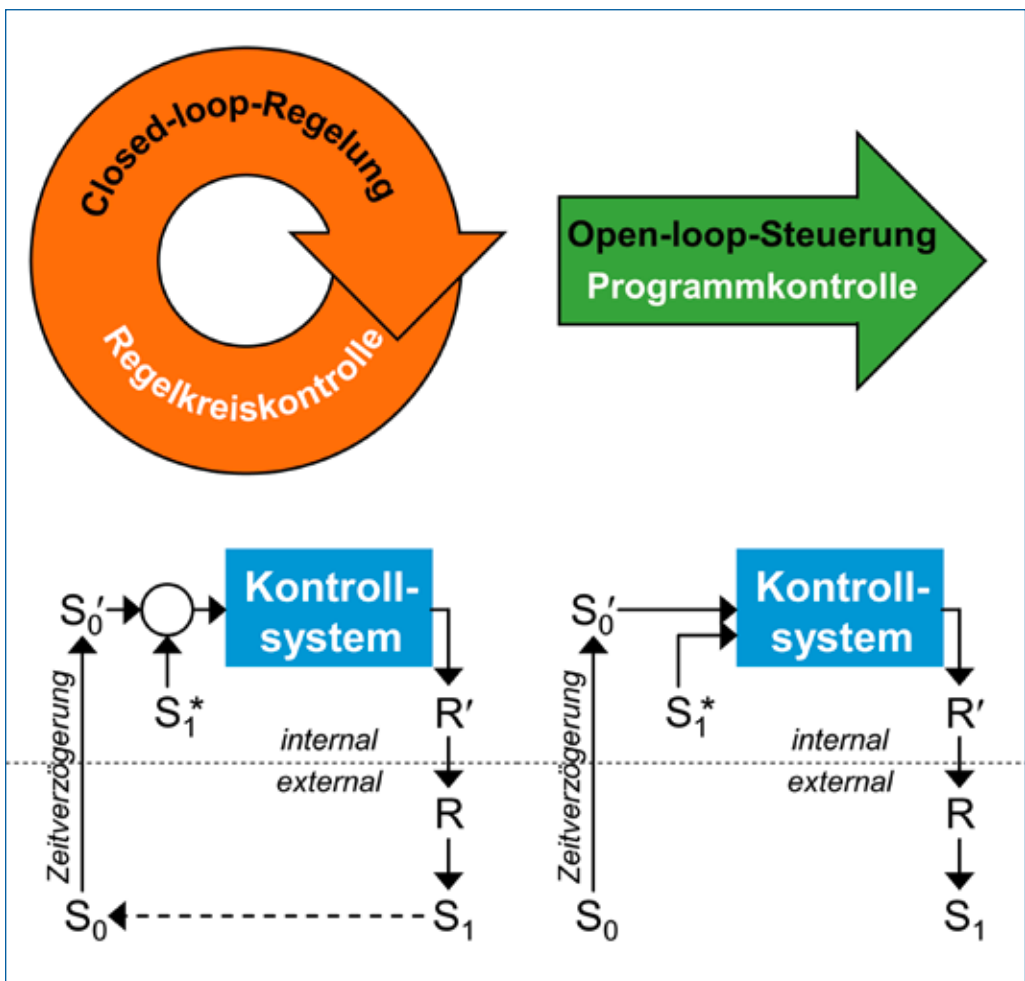


Abbildung 5.1: Closed-loop-Regelung (links) und Open-loop-Steuerung (rechts) als grundlegende Mechanismen der Bewegungskontrolle



Abbildung 5.5: Metaphern für Mechanismen der Bewegungskontrolle – der Sportler als Regler, Programmierer oder Modellierer¹⁵



Internes Modell (internal model)

Unter einem internen Modell verstehen wir in Zusammenhang mit der Bewegungskontrolle eine modellhafte, im Inneren des Menschen verortete Konstruktion der Welt einschließlich des eigenen Körpers, die auf den erfahrenen Effekten ausgegebener Bewegungskommandos beruht und die Erzeugung erwünschter Effekte erlaubt.

Anmerkung: In Theorien interner Modelle finden sich zwei Arten von Modellen. Das Vorwärtsmodell – im vorliegenden Buch als Prädiktorsystem bezeichnet – sagt die Wahrnehmungen voraus, die sich bei wahrgenommenem Ausgangszustand infolge der Ausgabe von Bewegungskommandos einstellen; das inverse Modell – im vorliegenden Buch als Kontrollsystem bezeichnet – ermittelt auf der Basis hinreichend sicherer Zustandsvorhersagen die Bewegungskommandos, die es braucht, um einen wahrgenommenen Ausgangszustand in die mit einem gewünschten Zielzustand verbundenen Wahrnehmungen zu überführen.

Wie Bewegungskontrolle nach der Theorie interner Modelle funktioniert, wird in Abbildung 5.6 veranschaulicht. Hier erkennen wir in der linken Hälfte des Flussdiagramms zunächst einmal den Closed-loop-Kontrollmechanismus wieder,

bei dem das Kontrollsystem bei Abweichungen zwischen wahrgenommenem Ausgangszustand S_0' und erwünschtem Zielzustand S_1^* Kontrollkommandos R' ausgibt. Die bereits bekannte Closed-loop-Architektur wird aber in der rechten Diagrammhälfte um ein Prädiktorsystem erweitert, das dafür zuständig ist, Vorhersagen beizusteuern, welche neue Situation unter den gegebenen Ausgangsbedingungen S_0' bei verschiedenen Bewegungskommandos R' erwartet werden darf (lat. praedicere = vorausbestimmen). Das Dach über \hat{S}_1 (sprich: „ess-eins-dach“) kennzeichnet dabei, dass es sich um einen vorhergesagten Zustand handelt. Insbesondere ist für diese Vorhersage zu beachten, dass in das Prädiktorsystem nicht die tatsächlichen, sondern nur internale Kopien der Kontrollkommandos R' eingehen; da R' sich auf bewegungsverursachende – sogenannte efferente – Signale bezieht, sprechen wir hier auch von einer Efferenzkopie (lat. efferre = hinaustragen). In dem Kontrollsystem werden nach dem internen Ausprobieren durch das Prädiktorsystem dann schließlich diejenigen Kontrollkommandos genommen, bei denen das Durchspielen der intern modellierten Effekte zu einer maximalen Übereinstimmung mit dem Zielzustand S_1^* führt. Aufgrund der Modellierung „nach vorne“ in die Zukunft wird ein Prädiktorsystem in der Theorie interner Modelle auch als Vorwärtsmodell (engl. forward model) bezeichnet. Wird das Kontrollsystem – wie zuvor skizziert – theoretisch so konzipiert, dass es die Vorhersagen des Prädiktorsystems (Was passiert, wenn ich etwas tue?) umkehrt und diese umgekehrten

5. Fertigkeiten

Beziehungen fest abspeichert (Was muss ich tun, damit etwas passiert?), dann lässt sich aufgrund dieser Umkehrung das Kontrollsystem auch als inverses Modell kennzeichnen (lat. *invertere* = umkehren). In der stark vereinfachten Abbildung 5.4 würden daher der erste Schritt des Ausprobierens der Schalttafel einer Vorwärtsmodellierung (Teilabbildungen a–b) und der zweite Schritt der Erstellung von Kontrollkommandos einer Inversmodellierung entsprechen (Teilabbildungen c–d).



Efferenzkopie (efference copy)

Unter einer Efferenzkopie verstehen wir ein systemintern gehaltenes Duplikat der von einem Kontrollsystem ausgesandten Signale, im Falle der menschlichen Bewegungskontrolle ein Duplikat der motorischen Signale, die als Kontrollbefehle ausgegeben werden und in der Folge Bewegungen verursachen.

Kommentar: Aufseiten der Motorik sind Efferenzkopien nützlich, um Bewegungsverhaltenseffekte

internal zu simulieren, ohne sie tatsächlich erfahren oder im laufenden Kontrollprozess auf sie warten zu müssen. Aufseiten der Wahrnehmung spielen Efferenzkopien eine wichtige Rolle, um beispielsweise die bei Augenbewegungen erwartbaren Verschiebungen des Umweltabbildes auf der Netzhaut des Auges vorzuberechnen und diese Verschiebungen aufgrund der Selbstverursachung als nicht umwelterzeugt zu identifizieren.

Wie wir uns leicht klarmachen können, hängt nach der Theorie interner Modelle die Qualität der Bewegungskontrolle vor allem von der Güte der durch das Prädiktorsystem abgegebenen Vorhersagen ab. Durch die Kopplung von Kontroll- und Prädiktorsystem wird nicht nur das oben geschilderte Theorieproblem der Kontrolle einer in ihrem Verhalten zunächst unbekanntes „Körper-Maschine“ gelöst; darüber hinaus liefert der Ansatz griffige Erklärungen für einige Alltagsphänomene des Sports, die unter alleinigem Rückgriff auf Closed- oder Open-loop-Mechanis-

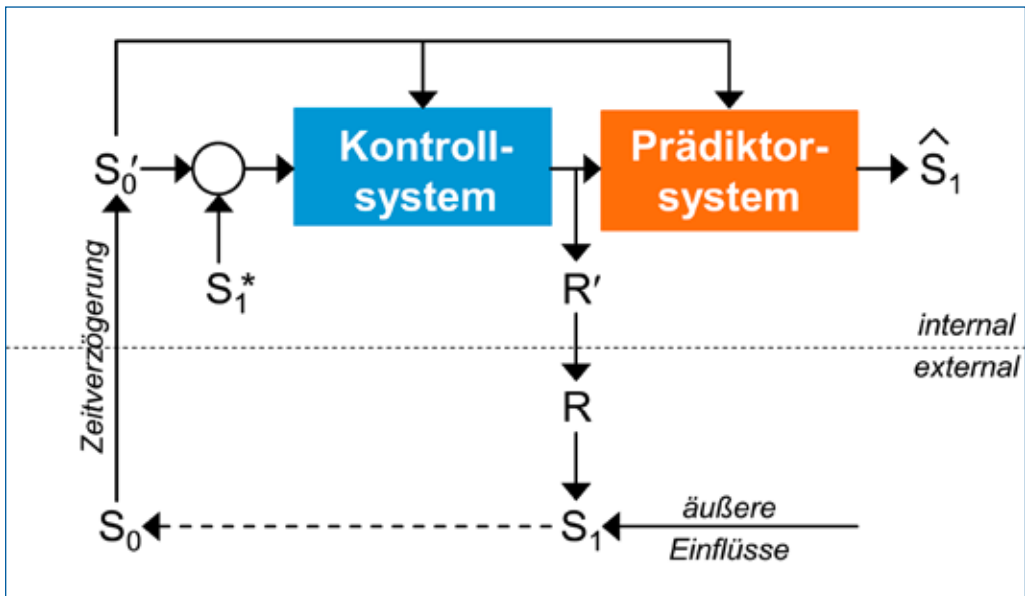


Abbildung 5.6: Theorie interner Modelle als ein um ein Prädiktorsystem erweiterter Closed-loop-Mechanismus (modifiziert nach Wolpert & Ghahramani, 2000)

lis = allgemein). So nimmt er beispielsweise an, dass für den Oberarmwurf oder das Laufen oder das Schreiben eines Buchstabens jeweils ein gesondertes generalisiertes Motorikprogramm vorliegt, während Würfe unterschiedlicher Härte, das Laufen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und das Schreiben eines Buchstabens in unterschiedlichen Größen Varianten des jeweiligen Motorikprogramms darstellen.



Motorikprogramm (motor program)

Unter einem Motorikprogramm verstehen wir eine zentral gespeicherte Kontrollstruktur, deren Aufruf die Ausführung einer äußerlich beobachtbaren, in raumzeitlicher Hinsicht festgelegten Bewegung verursacht.

Kommentar: Das Konzept des Motorikprogramms findet sich in Informationsverarbeitungsansätzen als besondere Ausformung eines Open-loop-Kontrollmechanismus. Nach der Schematheorie von Schmidt (1975) kontrollieren generalisierte Motorikprogramme, die über die Sequenz von Muskelkommandos sowie deren zeit- und kraftbezogenen Relationen invariant bestimmt sind, jeweils eine ganze Klasse von Bewegungen. Die ziel- und situationsabhängige Ausführungsvariante muss daher durch das Wiedergabeschema über die Festlegung von Programmparametern hinsichtlich der Auswahl der beteiligten Muskulatur sowie absoluter zeit- und kraftbezogener Ausprägungen der Muskelkommandos spezifiziert werden.

Nach der Schematheorie wird ein generalisiertes Motorikprogramm durch einige Merkmale bestimmt, die über verschiedene Ausführungsvarianten hinweg unverändert bleiben. Wie in Abbildung 5.7 – an einem hinsichtlich der veranschaulichten EMG-Signale erfundenem Beispiel – verdeutlicht, beziehen sich diese Invarianten auf die Sequenz, die relativen Zeiten und die relativen Kräfte der Kommandos, die als Efferenzen an die bewegungsverursachende Muskulatur geleitet werden (lat. in- = un-, lat. vario = ändern). Da es sich jedoch bei dem ausgewählten Motorikprogramm – gemäß der Theorie – um ein

generalisiertes Programm handelt, bedarf es weiterer Festlegungen. Dazu werden in einem zweiten Schritt einige Parameter spezifiziert, deren Fixierung aus dem generalisierten ein bestimmtes Programm werden lässt, also ein Programm, dessen Ausführung eine bestimmte Variante des Wurfs, des Laufs oder des Buchstabenschreibens entstehen lässt. Im Detail werden in der Schematheorie zu diesem Zweck Programmparameter angenommen, die der Festlegung der anzusprechenden Muskulatur, der absoluten Zeiten (als der Bewegungsgeschwindigkeit) sowie der absoluten Kräfte (als der Bewegungsdynamik) dienen. In der Veranschaulichung der Abbildung 5.7 werden in diesem zweiten Schritt beispielhaft die Muskeln m.e., m.h., m.s. und m.t., eine Gesamtdauer von drei Zeiteinheiten sowie eine Ausführung mit insgesamt – im Vergleich zur prototypischen Programmdarstellung – halber Kraft festgelegt. Wie wir leicht sehen, lassen diese Parameterspezifikationen die relativen Beziehungen, die das generalisierte Motorikprogramm bestimmen, gänzlich unverändert (zu unterstützenden elektromyografischen Befunden dieser Invarianzannahme aus der Welt des Sports siehe Wollny, 1993).

Für die Spezifikation der Programmparameter nimmt Schmidt (1975) für jedes generalisierte Motorikprogramm die zusätzliche Existenz eines Wiedergabeschemas (engl. recall schema) an, in dem sämtliche bisherigen Erfahrungen mit dem jeweiligen Programm in abstrakter Weise zusammengefasst vorliegen (gr. skhema = Gestalt). Insbesondere wird nach jeder Programmausführung gespeichert, unter welchen situativen Ausgangsbedingungen mit welchen Parameter-einstellungen welche Bewegungsergebnisse erzielt wurden, bei der Aktivierung des Wurfprogramms also beispielsweise, wie weit (Bewegungsergebnis) ein 200-g-Ball (Situation) bei gegebener Wurfbewegungsgeschwindigkeit (Parameter-einstellung) geflogen ist. Wie in Abbildung 5.8 durch eine dreidimensionale Fläche veranschaulicht, sollen diese Bezüge jedoch nicht für jeden Einzelversuch gesondert gespeichert werden, sondern in vom Einzelversuch abstrahierter – oder eben: in schematischer – Weise. Wenn dann nach hinreichend ausgebildetem Wiedergabeschema ein neuer Versuch mit dem betreffenden generalisier-

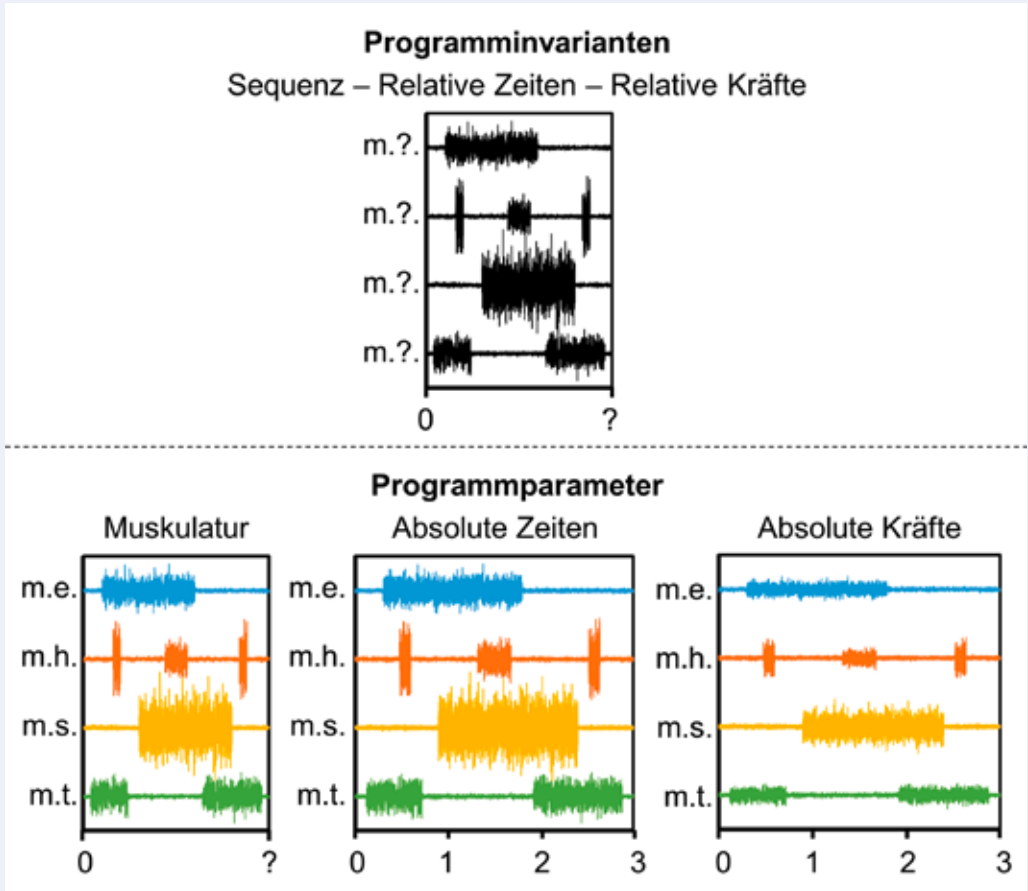


Abbildung 5.7: Generalisierte Motorikprogramme nach der Schematheorie von Schmidt (1975)

ten Motorikprogramm durchgeführt wird, lassen sich in Abhängigkeit von den identifizierten Ausgangsbedingungen und Details des angestrebten Bewegungsergebnisses die passenden Parameter-einstellungen direkt ablesen, womit das Motorikprogramm dann vollständig bestimmt vorliegt und an die Muskulatur gesendet werden kann.

Mit der Annahme zentral gespeicherter Motorikprogramme, deren Aufruf spezifische Bewegungsmuster verursachen, ist die Schematheorie von Schmidt (1975) zunächst einmal als Open-loop-Kontrolltheorie zu identifizieren. Mit dieser Annahme stellt sich Schmidt in eine Reihe

mit Motorikwissenschaftlern, die bereits vor der Veröffentlichung der Theorie nicht nur Argumente gegen eine reine Closed-loop-Regelung in die bewegungswissenschaftliche Diskussion eingebracht hatten, sondern harte empirische Fakten. Franklin Henry – einer der frühen akademischen Lehrer von Schmidt – darf in dieser Beziehung als wegweisend gelten, insbesondere mit Blick auf seine „memory-drum theory“ (Henry & Rogers, 1960). Mit dieser Theorie führte er die „Gedächtnistrummel“, also die Vorläuferin der Festplatte der frühen Computer-Technologie, als Metapher für das menschliche Gedächtnis ein und erbrachte zudem den hier

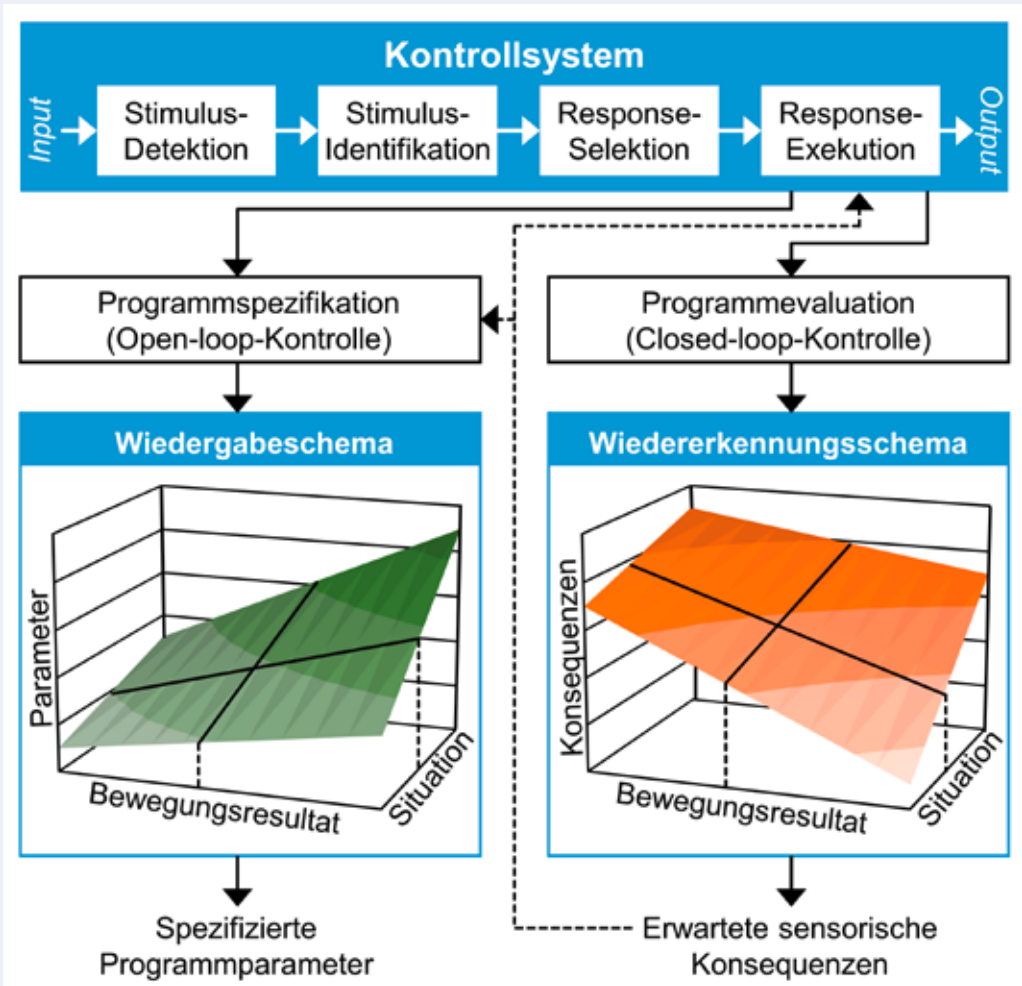


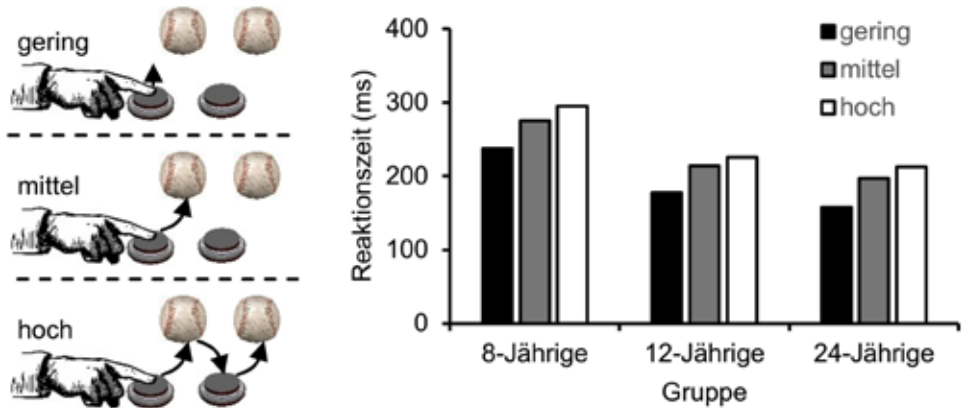
Abbildung 5.8: Stufen der Informationsverarbeitung und motorische Schemata nach der Schematheorie von Schmidt (1975)

zu passenden experimentellen Nachweis, dass die „Ladungszeit“ für komplexe Bewegungsantworten länger dauert als für weniger komplexe Reaktionen (für Details siehe Kasten 5.2).

In der Geschichte der US-amerikanischen Motorikwissenschaft waren es solche Befunde, die zu einer heftigen akademischen Debatte darüber führten, ob menschliche Bewegungskontrolle besser als Closed-loop-Regelung (peripheralistische Position; gr. periphero = herumtragen) oder

als Open-loop-Steuerung (zentralistische Position; lat. centralis = in der Mitte) gefasst werden sollte. In beiden Lagern versammelten sich prominente Vertreter wie Keele (1968) mit seiner frühen Definition eines Motorikprogramms auf der einen oder Adams (1971) mit seiner „closed-loop theory“ auf der anderen Seite. Mit Sicherheit hat es nicht unerheblich zu dem Erfolg der Schematheorie beigetragen, dass es Schmidt (1975) gelang, diese Kontroverse durch den Vorschlag eines „hybriden“ Modells zu überwinden (lat. hybrida =

Kasten 5.2: In einer Einfachreaktionsaufgabe steigt die für die Bewegungsverbereitung benötigte Zeit mit der Komplexität der vorzubereitenden Bewegungsantwort (Henry & Rogers, 1960).⁴⁷



Franklin Henry und Donald Rogers verglichen Reaktionszeiten bei drei Einfachreaktionsaufgaben unterschiedlicher Komplexität (Experiment 1). Wie in der Methodenabbildung dargestellt, sollten die Teilnehmenden auf ein Lichtsignal hin möglichst schnell eine bestimmte Bewegung oder Bewegungsfolge ausführen, die ihnen vor Beginn des jeweiligen Einzelversuchs aufgegeben wurde. Dabei mussten sie bei der gering-komplexen Aufgabe nur den auf einer Taste ruhenden Zeigefinger anheben, während sie bei der mittel-komplexen Aufgabe nach dem Fingerheben zusätzlich ein Tennisball berühren und bei der hoch-komplexen Aufgabe nach dieser Berührung eine weitere Taste drücken und noch einen zweiten Tennisball anschlagen. Die Aufgabenstellung wurde solange von Versuch zu Versuch gewechselt, bis pro Aufgabe zehn Einzelversuche vorlagen. Gemessen wurden zwar auch die Bewegungszeiten – die wenig überraschend von geringer über mittlerer zu hoher Komplexität der Bewegungsantwort zunahm –; das eigentlich Interesse der Autoren galt jedoch der Initiierung der ersten

Teilbewegung, also die vom Aufleuchten des Signals bis zum Heben des Zeigefingers vergehenden Reaktionszeit, da diese Variable als Maß dafür betrachtet werden kann, wieviel Zeit benötigt wird, um ein mehr oder weniger komplexes Motorikprogramm aus dem „Gedächtnisspeicher“ zur Ausführung zu „laden“. Untersucht wurden jeweils 20 Teilnehmer aus drei verschiedenen Altersgruppen. Wie der Resultsabbildung zu entnehmen ist, nahmen die Reaktionszeiten vom Kindes- über das Jugend- bis zum Erwachsenenalter generell ab. In jeder Altersgruppe zeigten sich aber zudem Komplexitätseffekte, nämlich steigende Reaktionszeiten mit steigender Aufgabenkomplexität. Dieser Befund ist nur schwer mit Closed-loop-Kontrolltheorien vereinbar, nach denen ja das – in allen drei Bedingungen identische – Heben des Fingers als erster relevanter Sollwert-Istwert-Vergleich zu betrachten und deshalb identische Reaktionszeiten vorherzusagen wären. Da das Untersuchungsergebnis aber perfekt zur Annahme längerer „Ladungszeiten“ passt, liefert die Studie ein starkes Argument für die Idee einer Open-loop-Kontrolle.