



7. Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung

Ermutigt von der Erfahrung, seinem kleinen Bruder David hilfreiche Tipps zum Salto vom 3-m-Brett gegeben zu haben, hat sich unser Physikstudent Gerhard als Assistenztrainer in der Baseball-Abteilung seines Sportvereins beworben.⁶⁰ Gleich in der ersten Woche seiner Tätigkeit berichtet er Nora, der erfahrenen Chef-Trainerin, von seiner Beobachtung, dass die Spieler in der Defense bei vom Batter weit ins Outfield geschlagenen Bällen häufig in einer Kurve zum Ball laufen. Da aber aus physikalischer Sicht ein geradliniger Laufweg kürzer und deshalb besser wäre, schlägt er vor, die Spieler eine Tabelle auswendig lernen zu lassen, in der Schlagweiten nach dem Gesetz des schiefen Wurfs in Abhängigkeit von Abschlagwinkel und geschwindigkeit zusammengefasst sind. Im Training sollen sie dann direkt nach einem vom Batter getroffenen Ball die Augen schließen, Abschlagwinkel und geschwindigkeit schätzen, hieraus schnellstmöglich die Schlagweite berechnen und angeben, ob sie eher nach vorne oder nach hinten laufen müssen, um den Ball zu fangen. Woran mag es liegen, dass Nora für Gerhards innovativen Trainingsvorschlag nicht mehr als ein Kopfschütteln übrighat?

Die Seiten 180–182 sind nicht
Teil dieser Leseprobe. ¹⁷⁹

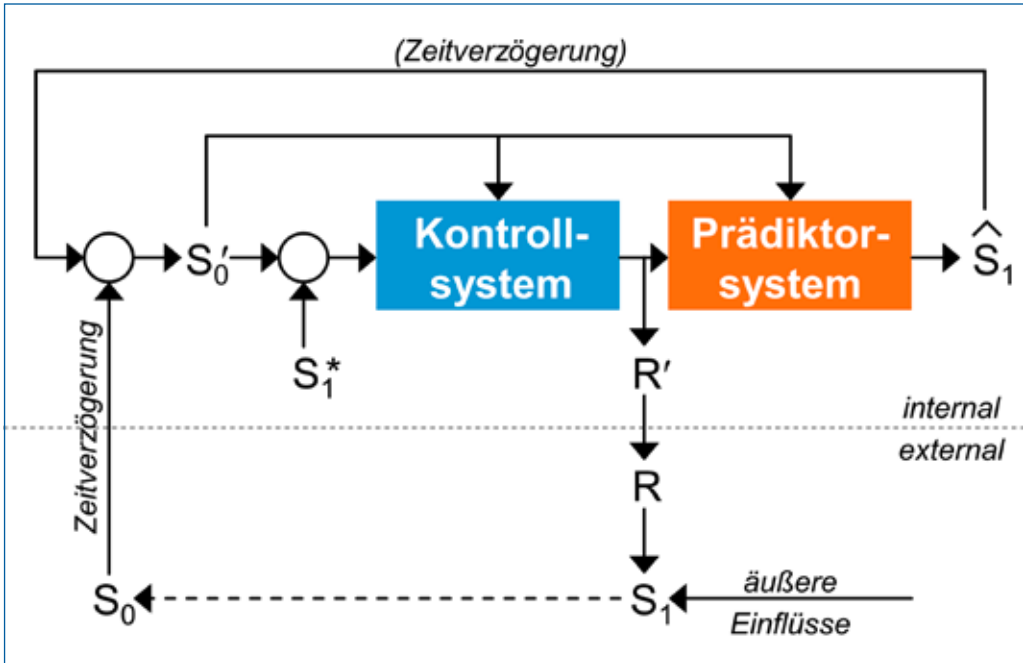


Abbildung 7.2: Theorie interner Modelle mit externer Regelung und interner Pseudo-Regelung (modifiziert nach Wolpert & Ghahramani, 2000)

neue Situation in den Regelungsprozess eingeht. Genau umgekehrt verhält es sich mit der oben in der Abbildung neu hinzukommenden Rückmeldeschleife über das Prädiktorsystem, denn hier gibt es zwar auch eine Zeitverzögerung; diese fällt allerdings wesentlich kürzer aus, da ja nur eine Kopie der Bewegungskommandos – eine „Efferenzkopie“ – verarbeitet werden muss und somit der internal vorhergesagte neue Zustand \hat{S}_1 quasi unmittelbar vorliegt (weshalb in Abbildung 7.2 an dieser Stelle „Zeitverzögerung“ in Klammern gesetzt wurde). Der Nachteil des internalen Regelungswegs besteht darin, dass es sich beim internal vorhergesagten Zustand eben nur um eine Vorhersage handelt, ohne dass bis zum zeitverzögerten Eintreffen der Signale aus dem externalen Regelkreis überprüft werden könnte, ob dieser Zustand wirklich eintreffen wird oder nicht. Wegen des Fehlens der Bezugnahme auf die „tatsächliche“ neue Situation, wie sie im Closed-loop-Regelungsprozess möglich ist, wird der zusätzliche, internalen Regelkreis mit dem Begriff der

Pseudo-Regelkreiskontrolle belegt (engl. pseudo-closed-loop control; gr. pseudo = täuschen; vgl. z.B. Grush, 2004).

Wissenschaftliche Nachweise für die Annahme zweier getrennter Fehlersignale wurden von Maurer et al. (2021) vorgelegt. Für das Erlernen einer zuvor unbekanntes Zielaufgabe – einer virtuellen Skittles-Aufgabe – konnten sie nämlich per EEG-Registrierung, wie wir sie aus Kapitel 1 kennen, zwei neuronale Signale trennen, nämlich eine fehlerbezogene Negativität (error-related negativity, ERN) von einer rückmeldungsbezogenen Negativität (feedback-related negativity, FRN). Während die ERN, die den Vorhersagefehler und damit in Abbildung 7.2 den internalen Pseudo-Regelkreis betrifft, im Laufe des Lernprozesses zunahm („error prediction“), zeigte sich für die ERN, die die Verarbeitung von Fehlermeldungen über den „echten“ Regelkreis widerspiegelt, eine korrespondierende Abnahme („error postdiction“). Dieser Befund legt

7. Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung

nahe, dass motorisches Lernen zunächst externe Rückmeldungen benötigt, im Zuge der sich herausbildenden Bewegungsfertigkeit dem internal über das Prädiktorsystem erzeugten Fehler-signal aber eine wachsende Rolle zukommt. Vor allem unterstreicht das von Maurer et al. (2021) durchgeführte Experiment aber, dass die in Abbildung 7.2 dargestellte Bewegungskontrollarchitektur mit zwei getrennten, sich wechselseitig ergänzenden Regelkreisen nicht nur theoretisch attraktiv ist, sondern durch empirische Daten wissenschaftlich untermauert werden kann.

Weitere unterstützende Befunde wurden von Desmurget und Grafton (2000) vorgelegt, die nachweisen konnten, dass die Kontrolle schneller Greifbewegungen nicht allein auf (externaler) Closed-loop-Regelung oder Open-loop-Steuerung beruht, sondern dass Greifbewegungen stattdessen mithilfe der Fehlervorhersagen interner Prädiktorsysteme koordiniert werden. Ein eher sportnahes Beispiel für eine wissenschaftliche Studie mit vergleichbaren Resultaten finden wir bei Bootsma und van Wieringen (1990), die Schmetterbälle von Spitzen-Tischtennisspielern biomechanisch untersuchten. Wie in Abbildung 7.3 am Beispiel von sieben Schlägen eines Athleten veranschaulicht wird, zeigte sich bei allen Spielern eine Annäherung der Bewegungsrichtung des

Schlägers (in der Horizontalebene) an einen sehr stabilen Wert zum Zeitpunkt des Ballkontakts. Das Erstaunliche an dieser zunehmenden Annäherung ist allerdings, dass sie auch noch innerhalb der letzten 150 ms vor dem Ballkontakt stattfindet, also – wie wir in Kapitel 5 gelernt haben (vgl. Abbildung 5.3) – innerhalb einer einfachen Reaktionszeit-spanne. Dieser Befund ist zum einen nicht mit der Annahme einer Closed-loop-Regelung zu vereinbaren, da so kurz vor dem Schlag wahrgenommene Istwert-Sollwert-Differenzen keinesfalls mehr in das Durchlaufen eines kompletten externalen Regelkreises eingehen könnten. Zum anderen wäre bei einer Open-loop-Steuerung, die auf dem Starten eines Motorikprogramms zu einem bestimmten Zeitpunkt vor dem Ballkontakt beruht, aufgrund von Übertragungsfehlern eher eine Vergrößerung der Streuung der Bewegungsbahnen statt der beobachteten Verringerung zu erwarten. Sehr gut vereinbar ist der Befund hingegen mit der Annahme, dass zu Beginn die gegebenen Bewegungskommandos zu einer noch relativ fehlerhaften Bewegungsbahn führen, dass dieser Fehler aber quasi zeitgleich durch das Prädiktorsystem vorhergesagt wird und diese Vorhersage unmittelbar für die Korrektur der Bewegungskommandos in Richtung einer erwartbar besseren Bewegungsbahn genutzt wird (vgl. auch van Soest et al., 2010).

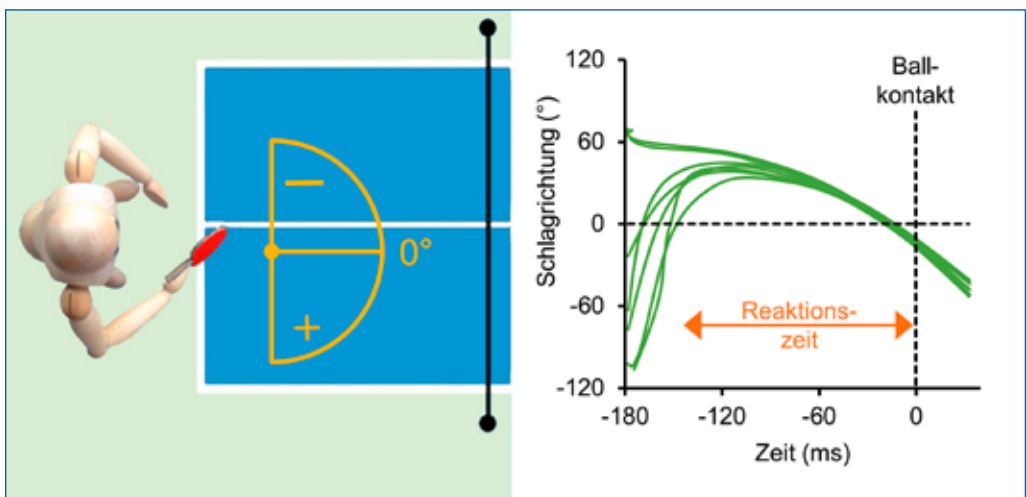


Abbildung 7.3: Streuungsverringering bei Tischtennis-Schmetterschlägen innerhalb einer Reaktionszeitspanne (Daten aus Bootsma & van Wieringen, 1990)⁶²

Wie sehr die Wahrnehmung von den aus den eigenen Bewegungskommandos herrührenden Erwartungen beeinflusst wird, können wir auch in dem in Abbildung 7.4 veranschaulichten Selbstversuch erfahren, der schon von René Descartes (1637) beschrieben wurde. Dazu halten wir uns ein Auge zu und führen mit dem anderen Auge zum einen aktive (obere Teilabbildung) und zum anderen passive Augenbewegungen durch (untere Teilabbildung). Für die passiven Bewegungen legen wir den Zeigefinger so außen an den Rand der Augenhöhle, dass wir durch das Augenlid den Augapfel spüren. Wenn wir jetzt den Augapfel ein wenig Richtung Nase stupsen, stellt sich der Eindruck ein, dass sich die gesamte Umwelt in Gegenrichtung verschiebt. Das Überraschende an diesem Experiment ist, dass ähnliche Verschiebungen des Netzhautabbildes auch bei aktiver Augenbewegung vorliegen, in diesem Fall die Umwelt aber stabil-unbewegt erscheint. Offenbar wird also bei aktiver Augenbewegung die Bildverschiebung vorhergesagt, die als Resultat der an die Augenmuskeln gegebenen Kommandos zu erwarten ist, und aus der dann tatsächlich sensorisch erfahrenen Verschiebung herausgerechnet. In der Motorikwissenschaft wird dieser Grundsatz des Herausrechnens von Erwartungen aufgrund der Efferenzkopie nach von Holst und Mittelstaedt (1950) als Reafferenzprinzip bezeichnet. In moderner Theoriesprache sind es interne Prädiktorsysteme, die hier in einem Pseudo-Regelkreis am Werk sind.

7.1.2 Wechselbeziehungen und optische Variablen

Aus sportpraktischer Sicht ergeben sich aus den bis hierhin aufgezeigten Wechselbeziehungen zwischen Prozessen der Wahrnehmung und solchen der Bewegungskontrolle vier wichtige Konsequenzen. Zum Ersten darf erwartet werden, dass die Angemessenheit der in Kapitel 6 besprochenen Blickstrategien auch von der Nutzung der gesammelten Informationen für die Kontrolle der anschließend auszuführenden Bewegung abhängt. Verdeutlicht am Beispiel des Elfmeters im Fußball heißt dies, dass sich die von Savelsbergh et al. (2010) vorgeschlagene Fixationsabfolge auf Kopf, Hüfte und Standbein des Schützen (vgl. Abbildung 6.7) zwar bewähren mag, wenn es um die bloße Vorhersage der Schussrichtung geht; besteht aber die – für den Torwart ja eigentlich zentrale – Anforderung darin, den Elfmeter aktiv zu parieren, beziehen sich die für die eigene Abwehrbewegung hauptsächlich relevanten Informationen auf den geschossenen Ball, der deshalb frühzeitig fixiert werden sollte. Was sich hieraus ergibt, ist die Erwartung einer aufgabenbezogenen Differenzierung von zu bevorzugenden Blickstrategien. Genau diese Erwartung wurde von Dicks et al. (2010) bestätigt, die in einem pfiffigen Experiment aufzeigten, dass erfahrene Fußball-Torwarte umso weniger auf den Schützen und umso mehr auf den Ball schauen, je wirklichkeitsnäher die Darstellung ausfällt (Realsituation statt

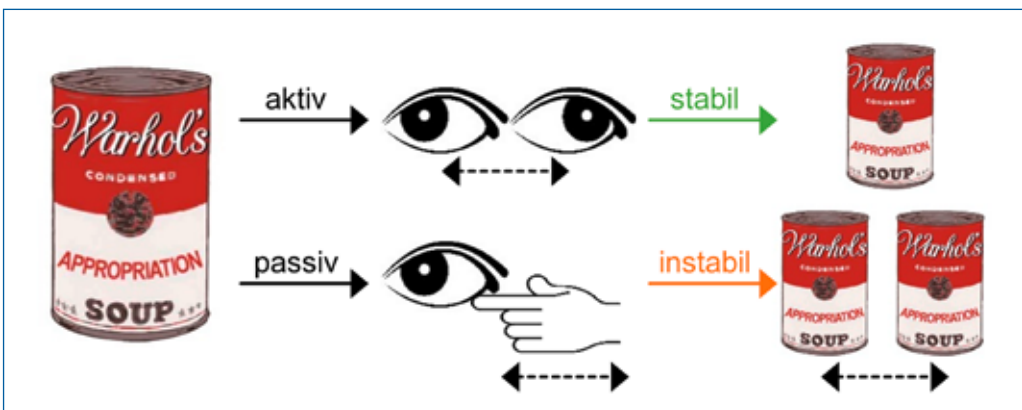


Abbildung 7.4: Unterschiedlich stabile Raumwahrnehmungen infolge aktiver und passiver Augenbewegungen⁶³

7. Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung

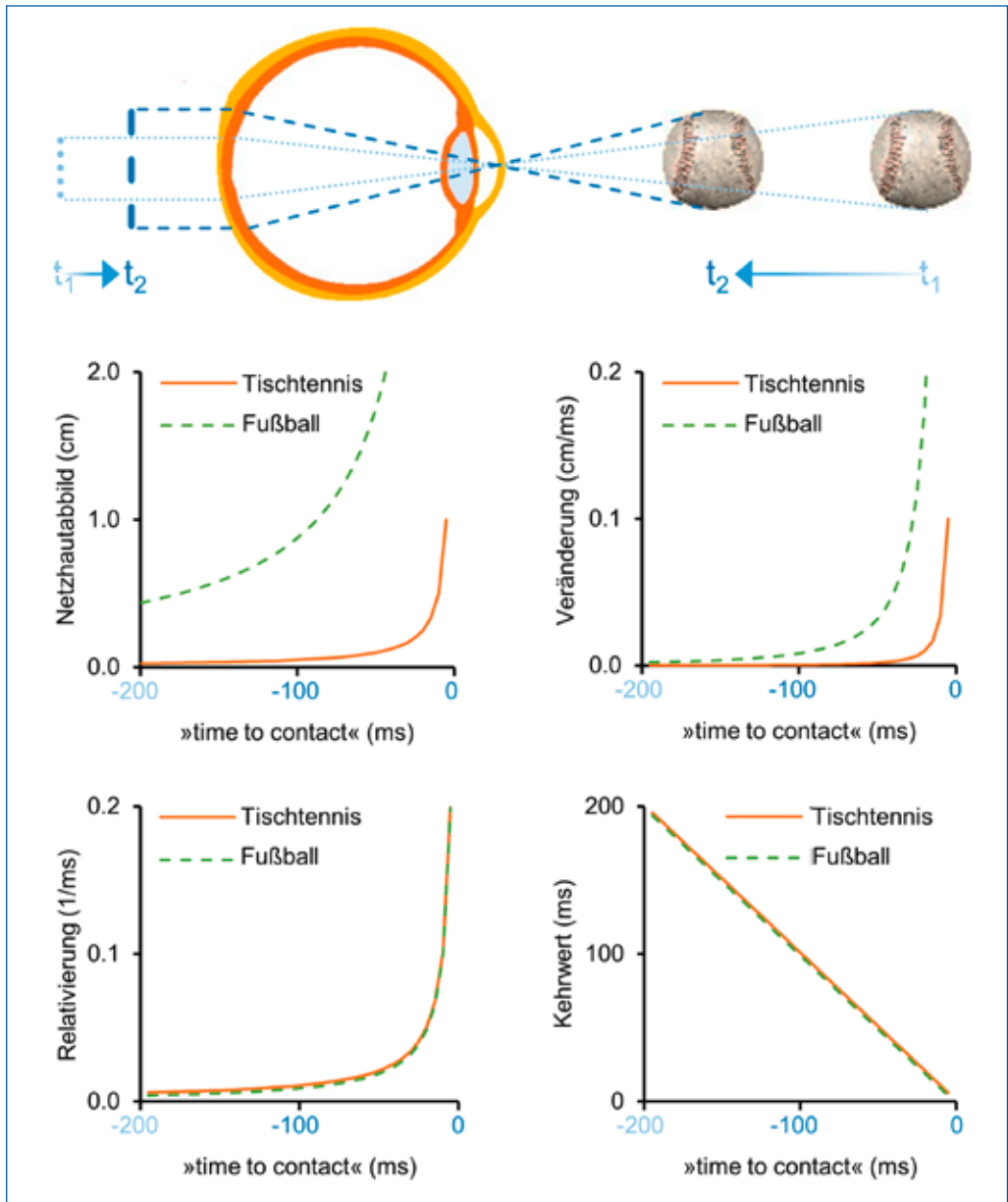


Abbildung 7.6: Die optische Time-to-contact-Variable τ zur Bestimmung der Zeit bis zum Kontakt mit einem sich annähernden Objekt (mit schematisch vereinfachter Darstellung der Brechung der ins Auge einfallenden Lichtstrahlen)⁶⁵

Time-to-contact-Variable bezeichnet (engl. time to contact = Zeit bis zum Kontakt) und mit dem griechischen Buchstaben τ abgekürzt (sprich: „tau“; Lee, 1976). Diese Variable ist auch für den

Sport von ganz offensichtlicher Bedeutung und zwar insbesondere dann, wenn statt eines Autos ein Ball auf mich zukommt und es darum geht, diesen Ball zu fangen, abzuwehren, zu schlagen

oder zu stoppen. Wie die grundlegenden Kalkulationen der τ -Variable im Detail aussehen, wird in Abbildung 7.6 verdeutlicht.

Im obersten Teil der Abbildung 7.6 sehen wir zu nächst in schematischer Darstellung, welche Abbilder ein Baseball auf der Netzhaut des Auges hinterlässt, wenn er sich von einer Position zu einem Zeitpunkt t_1 auf eine Position zu einem Zeitpunkt t_2 annähert. Wie wir links in der Darstellung des Augenquerschnitts erkennen, wird dieses Netzhautabbild von t_1 zu t_2 größer. Es ist genau diese momentane Größenveränderung des Netzhautabbilds (mathematisch exakt: die Ableitung der Abbildgröße nach der Zeit), die mit der τ -Variable umrissen wird. Die Frage, warum diese Kennziffer für die Bewegungskontrolle interessant sein könnte, wird durch die Beispielkurven der Abbildung 7.6 beantwortet. Hier veranschaulichen die durchgezogenen roten Linien einigermaßen realistische Verhältnisse, wie sie beim Rückschlag im Tischtennis vorliegen. Es zeigt sich zunächst in der oberen linken Grafik, dass bis zu demjenigen Zeitpunkt, an dem der Ball die Augenebene durchbrechen würde (Zeitpunkt 0 auf der Querachse), das Netzhautabbild (in cm) zunächst langsam, dann aber beschleunigt wächst, bis dass die scheinbare Größe des Tischtennisballs beim Augendurchbruch einen Wert von Unendlich annimmt. Hieraus ergibt sich in der oberen rechten Grafik eine momentane Größenveränderung (in cm/ms), die ebenfalls beschleunigt wächst. Wird in der unteren linken Grafik diese Veränderung noch an der jeweils aktuellen Größe des Netzhautabbilds relativiert, ändert dies an der Form der Kurve zwar nichts Grundlegendes, durch die Relativierung der Größenveränderung (in cm/ms) an der aktuellen Größe (in cm) erhalten wir allerdings einen Wert, der sich direkt auf die Zeit bezieht (da sich die Einheit cm/ms/cm sehr einfach zu 1/ms kürzen lässt). Daher müssen wir jetzt nur noch in der unteren rechten Grafik den Kehrwert bilden, um eine Angabe zu erhalten (in ms), die unmittelbar anzeigt, wieviel Zeit noch vergehen wird, bis der anfliegende Tischtennisball die Augenebene durchbricht.

Interessanterweise ist die τ -Variable von der Größe des sich annähernden Balls unabhängig. Dies wird ebenfalls in den Grafiken der Abbildung 7.6 ver-

deutlicht. Die zusätzliche gestrichelte grüne Kurve ergibt sich nämlich, wenn in der gleichen Situation statt eines Tischtennisballs ein Fußball verwendet wird, der sich aus derselben Distanz mit derselben Geschwindigkeit annähert. In den oberen beiden Grafiken zeigt sich zwar, dass sich der größere Durchmesser des Fußballs in der Größe des Netzhautabbilds sowie dessen momentaner Veränderung niederschlägt; die unteren beiden Grafiken, in denen die durchgezogene rote und die gestrichelte grüne Linie übereinander liegen, verdeutlichen aber, dass die Relativierung der durchgängig höheren Fußball-Werte an dem ebenfalls größeren momentanen Netzhautabbild des Fußballs zu exakt identischen Kurven für die relativierte Größenveränderung sowie für deren Kehrwert führt. Bei identischer Annäherungsgeschwindigkeit ist also zu einem bestimmten Zeitpunkt vor Ballkontakt beim Tischtennis und Fußball die noch vergehende Zeit – wie es auch sein sollte – identisch.

Zusammenfassend: Aus der relativierten momentanen Größenveränderung des Netzhautabbilds eines sich annähernden Objekts lässt sich ganz unmittelbar die Zeit ablesen, bis dieses Objekt bei mir eintrifft. Zwar mag sich die Berechnung der τ -Variablen etwas kompliziert angehört haben; an dieser Stelle sollten wir aber bedenken, dass die Alternative, nach der der Tischtennisspieler die Position des Balls im Raum samt dessen aktueller Geschwindigkeit fortlaufend kalkuliert und seine Bewegung in Abhängigkeit von diesen Kalkulationen programmiert, einen ungleich höheren Rechenaufwand erfordern würde. Der Zugang über die kontinuierliche Führung der Bewegung über die optische Variable τ ist daher aus kontrolltechnischer Sicht ausgesprochen attraktiv. Für das Einleitungsbeispiel zu diesem Kapitel bedeutet dies, dass es im Baseball – anders, als Gerhard dies vorschlägt – nicht darum gehen kann, Ballflugkurven berechnen zu lassen; vielmehr muss die Fähigkeit der Spieler trainiert werden, sich in ihrem Laufweg kontinuierlich dem Ballflug anzupassen.

Zu der Frage, ob es in Sportspielsituationen nun tatsächlich die τ -Variable ist, die zur Kontrolle von Fang- und Schlagbewegung genutzt wird, gibt es in der bewegungswissenschaftlichen Li-

7. Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung

teratur eine kontroverse Diskussion (siehe z. B. Smeets et al., 1996). Problematisch scheint hier vor allem zu sein, dass die τ -Berechnung eine gleichförmige Objektbewegung voraussetzt sowie eine durchgängige Fixation, Bälle aber im Flug wegen des Luftwiderstands abgebremst und wegen der Schwerkraft in der vertikalen Dimension beschleunigt werden und zudem Rückschlagsituationen tatsächlich durch Blicksprünge gekennzeichnet sind (siehe z. B. Mann et al., 2013). Zudem ist es heikel, dass die Berechnung der τ -Variable bei größeren Objektabständen oder geringeren Objektgeschwindigkeiten auf zum Teil sehr kleinen Werten beruht – im Tischtennis-Beispiel der Abbildung 7.6 beträgt die momentane Größenveränderung des Netzhautabbilds 200 ms vor Augenebenendurchbruch gerade einmal 1/1000 mm/ms (entspricht 1 mm/s). Nichtsdestoweniger muss gesagt werden, dass die grundlegende Botschaft von dieser Kritik unberührt bleibt, nach der die Suche nach optischen Variablen, die eine unmittelbare Kopplung von Wahrnehmung und Bewegung ausdrücken, überaus lohnenswert erscheint.

Für das Fangen von hohen Bällen im Cricket haben in diesem Sinne McLeod und Dienes (1993) aufgezeigt, dass es eine sehr einfache Strategie gibt, nach der Fänger ihren Laufweg zum Ball an die Ballflugkurve anpassen können. Ihr OAC-Modell (für „optical acceleration cancellation“) wird in Abbildung 7.7 veranschaulicht. Gezeigt werden hier im oberen Teil der Abbildung (identische) Flugparabeln eines Balls, der zum Zeitpunkt t_0 vom Schlagmann getroffen wird und der sich in den grafischen Darstellungen nach dem Treffen von rechts nach links bewegt. Die drei Teilabbildungen unterscheiden sich allein durch den Standort des Fängers, der im Verhältnis zum Ballauftreffpunkt einmal zu weit vorne (links), einmal genau passend (Mitte) und einmal zu weit hinten (rechts) positioniert ist. Betrachtet wird jetzt für vier weitere Zeitpunkte t_1 - t_4 (mit jeweils gleicher Zeitdifferenz) der zum Boden berechnete Winkel, mit dem der Fänger zum anfliegenden Ball schaut. Dieser Winkel wird zur Verdeutlichung nach links unten jeweils auf einer senkrechten Linie abgebildet (was in mathematischer Formulierung dem Tangens des Blickwinkels entspricht). Tragen wir im unteren Teil der Abbildung die Länge

dieses Winkelabbilds grafisch ab (ungefüllte Kreise), dann kann es zunächst einmal wenig überraschen, dass bei allen drei Fängerpositionen der Winkel von t_1 zu t_4 stetig zunimmt. Beachten wir aber die Veränderungen der Abbildlängen von Zeitpunkt zu Zeitpunkt (gefüllte Dreiecke), dann steigen diese im ersten Fall an, bleiben im zweiten Fall konstant und nehmen im dritten Fall ab. Wenn wir zum Zeitpunkt des Ballauftreffens am richtigen Ort stehen wollen, können wir also aus einer positiv beschleunigten Veränderung unmittelbar ablesen, dass wir nach hinten laufen müssen, und aus einer negativ beschleunigten Veränderung, dass eine Bewegung nach vorne erforderlich ist (rote Dreiecke). Wenn hingegen, wie in der mittleren Grafik, die Abstände von Zeitpunkt zu Zeitpunkt immer gleich bleiben, dürfen wir erwarten, dass der Ball genau auf uns zukommt. Aufseiten der Bewegungskontrolle können wir daher fortlaufend die momentane Beschleunigung nutzen, um uns dem Auftreffpunkt des Balls anzunähern, denn sobald Beschleunigungen in die eine oder andere Richtung wahrgenommen werden, gilt es, diese auszuräumen – genau dieser „Ausräumstrategie“ haben wir die Bezeichnung des OAC-Modells zu verdanken (engl. optical acceleration cancellation = optische Beschleunigungsauslöschung).

In der Motorikwissenschaft werden zwar noch andere optische Variablen diskutiert, die beim Ballfangen nützlich sein könnten, dabei bleibt aber der Kerngedanke des OAC-Modells erhalten, dass aus momentanen Situationsveränderungen visuelle Signale herausgezogen werden, die eine direkte Abstimmung mit der momentanen Positionsveränderung des Fängers erlauben. Gekrümmte Laufwege, wie von McBeath et al. (1995) beobachtet – und anekdotisch auch von Gerhard im Einleitungsbeispiel zu diesem Kapitel – mögen mit Blick auf die optimale Nutzung dieser Kopplung den Nachteil der mit der Krümmung einhergehenden Laufwegverlängerung mehr als ausgleichen. Für das sportliche Training ist ein genaues Wissen um solche optische Variablen, die unmittelbar mit der Bewegungskontrolle verbunden sind, insbesondere dann von Bedeutung, wenn es um die Optimierung technischer Fertigkeiten geht, bei denen die Abstimmung mit der wahrgenommenen Umwelt eine leistungsbestimmende Rolle spielt.

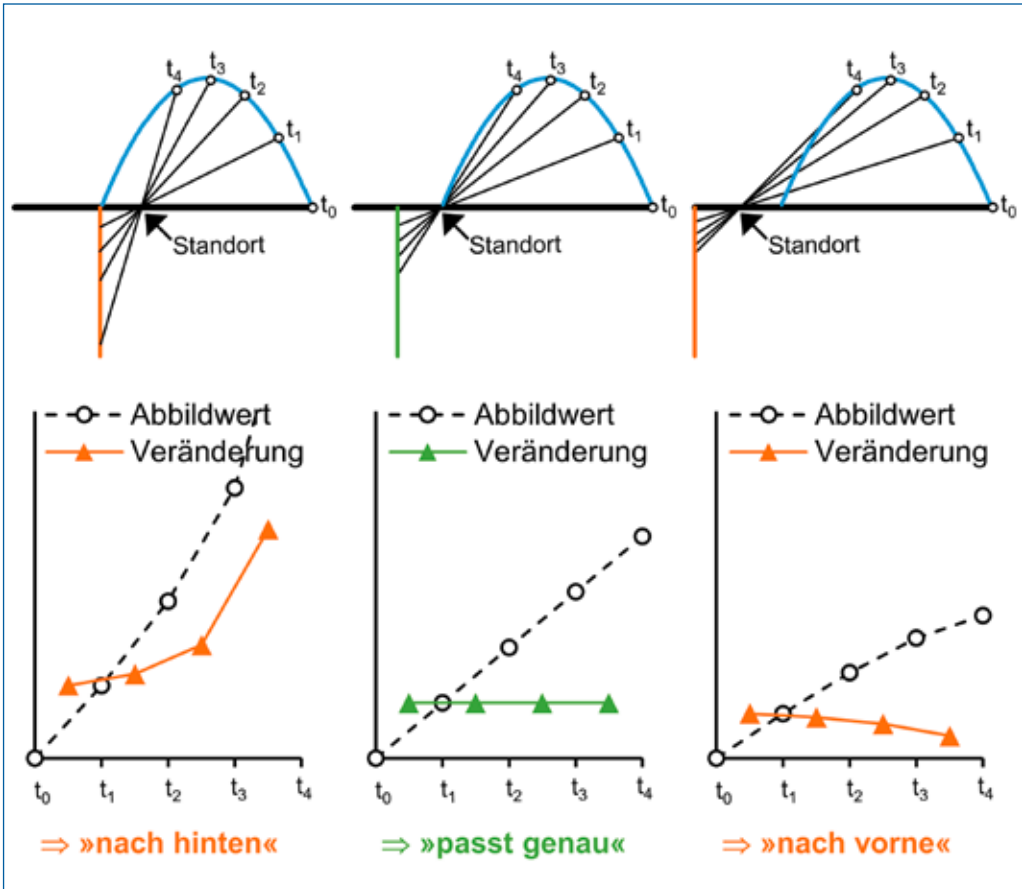


Abbildung 7.7: Das OAC-Modell für die Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung beim Fangen von hohen Bällen (Hochachsen: Abbildwerte in künstlichen Einheiten) (nach McLeod & Dienes, 1993)

Durch die in diesem Kapitel geführten Diskussionen über Mechanismen der Tiefenwahrnehmung, Pseudo-Regelkreise, Wahrnehmungs-Handlungs-Wechselbeziehungen und optische Variablen haben wir ein recht detailliertes und umfassendes Bild davon erworben, welche Vorstellungen in der aktuellen Motorikwissenschaft zu fundamentalen Mechanismen der Bewegungskontrolle vorherrschen. Damit haben wir gute Grundlagen gelegt, um uns im folgenden Kapitel

8 Veränderungen dieser Kontrollmechanismen zuzuwenden, also dem motorischen Lernen. Wer vor diesem Schritt die erworbenen Kenntnisse zur motorischen Kontrolle noch etwas weiter vertiefen möchte, mag sich allerdings zunächst noch dem zweiten Teil dieses Kapitels widmen, in dem die bisherigen theoretischen Erörterungen zu einem Modell der optimalen Feedback-Kontrolle erweitert werden.

$R_R = 130$ g). Im rechten Teil der Abbildung 7.11 wird diese Menge an Lösungskombinationen als Gerade von links oben nach rechts unten dargestellt. Bei allen Streuungen entlang dieser Geraden besteht keine Notwendigkeit, steuernd einzugreifen, während im Gegensatz hierzu es sich bei allen Streuungen, die rechtwinkelig zu dieser Gerade laufen (also nach unten links oder oben rechts von der diagonal verlaufenden Gerade abweichend), um „schlechte“ Streuungen handelt, da sie zu einem Istwert führen, der nicht dem Sollwert entspricht. Das Prinzip der minimalen Intervention besagt dabei, dass Streuungen in der aufgabenirrelevanten Dimension – entlang der Redundanzgeraden – zugelassen werden und nur dann eine Intervention erfolgt, wenn in der orthogonalen, also der aufgabenrelevanten Dimension Abweichungen auftreten (gr. orthos = richtig, gr. gonia = Ecke).

Wenn wir jetzt – wie ebenfalls im rechten Teil der Abbildung 7.11 veranschaulicht – annehmen, dass zu Beginn einer Lernphase eine breite, nicht aufeinander bezogene Streuung in den Kraftwerten beider Finger besteht (initiale Streuung; initium = Anfang), dann sollte sich Lernen so zeigen, dass die Streuung allein in der aufgabenrelevanten Dimension reduziert wird (finale Streuung; lat. finalis = das Ende betreffend). Zwar wäre

es möglich, sich auch an einer Eliminierung der Streuung in der aufgabenirrelevanten Dimension zu versuchen, also beispielsweise in Richtung des Punktes, der für identische Kraftwerte von beiden Zeigefingern steht (d.h. $R_L = R_R = 100$ g); wie Todorov und Jordan (2002) nachweisen, wäre dieses Zusammenstauchen der fett gezeichneten finalen Ellipse jedoch nur um den Preis zu haben, dass sie sich kreisförmig „ausbeult“ und in der Folge in der aufgabenrelevanten Dimension zu Werten führt, die in der aufgabenrelevanten Dimension über die in Abbildung 7.11 gezeigte finale Ellipse hinausgehen. Dies aber bedeutet nichts anderes, als dass zusätzliche Kontrolle in der aufgabenirrelevanten Dimension nicht nur – da aufgabenirrelevant – nichts bringt, sondern die Streuung in der aufgabenrelevanten Dimension gar erhöht und auf diese Weise das Bewegungsergebnis verschlechtert. Indem die aufgabenirrelevante Dimension gewissermaßen als Speicher für störendes Rauschen in der Bewegung ausgenutzt werden (als „noise buffer“), zahlt es sich also aus, Interventionen auf die Kontrolle aufgabenrelevanter Bewegungsmerkmale zu beschränken und die Bewegung ansonsten einfach laufen zu lassen. Dies wiederum heißt, dass es sich bei sich wechselseitig kompensierenden Streuungen in der aufgabenirrelevanten Dimension nicht nur um eine unerhebliche, sondern viel-

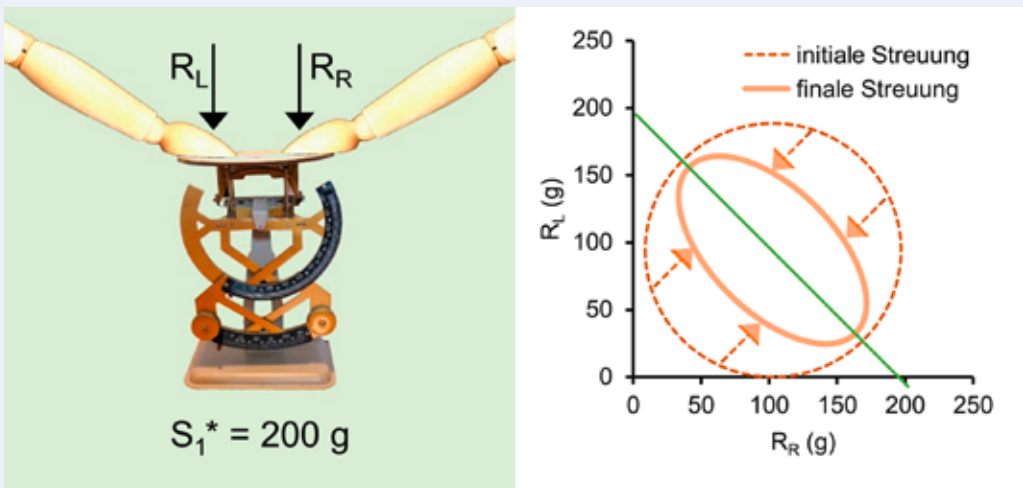
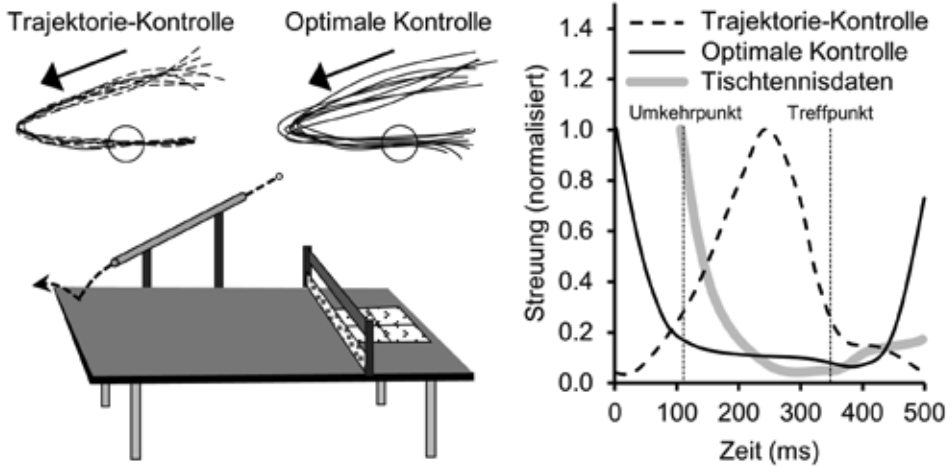


Abbildung 7.11: Kraftproduktion mit summarischem Sollwert (S_1^*) (links) und Streuungsveränderungen der beidhändigen Kraftwerte (R_L und R_R) über eine Lernphase (rechts) (nach Todorov & Jordan, 2002)⁶⁹

Kasten 7.2: Eine Simulation von Tischtennisschlägen, bei der nur bei drohender Zielabweichung Kontrolle ausgeübt wird, weist hohe Übereinstimmungen mit tatsächlichen Schlägen auf (Todorov & Jordan, 2002).



Emanuel Todorov und Michael Jordan reanalysieren in ihrer in *Nature Neuroscience* erschienenen Publikation zur optimalen Feedback-Kontrolle Daten aus einer Studie von Todorov et al. (1997), in der mittels eines am Schläger befestigten elektromagnetischen Sensors die Bewegungsbahnen von Tischtennisschlägen aufgezeichnet worden waren. Wie in der Methodenabbildung veranschaulicht, bestand die Lernaufgabe der rechtehändigen Teilnehmenden darin, einen durch eine Röhre angerollten Tischtennisball nach einmaligem Aufprellen so mit links zurückzuschlagen, dass er ein Fenster zwischen (etwas nach hinten verschobenem) Netz und einer darüber gespannten Schnur und danach ein 40x40 cm großes Zielfeld trifft. In ihrem Aufsatz verglichen Todorov und Jordan (2002) Bewegungsbahnen, die sich aufgrund von zwei verschiedenen modellhaften Simulationen ergeben. Diese Simulationen resultieren aus den Annahmen, dass die motorische Kontrolle entweder als Trajektorie-Kontrolle (lat. *traiectus* = Übergang) darauf ausgerichtet ist, sich

durchgängig einer idealen Bewegungsbahn anzunähern, oder als optimale Kontrolle darauf, nur dann steuernd einzugreifen, wenn intern vorhersagt wird, dass das auf das Balltreffen ausgerichtete Bewegungsziel nicht erreicht wird. Wie die links oben aus der Seitensicht veranschaulichten Bewegungsbahnen zeigen, werden bei Trajektorie-Kontrolle zwar deutlich stabilere Bewegungsbahnen erreicht; diese Stabilität geht jedoch deshalb auf Kosten der Präzision, weil im Vergleich zur optimalen Kontrolle zusätzliche Kontrollsignale investiert werden, die das Rauschen in aufgabenirrelevanter Richtung vergrößern. Hinsichtlich der Streuung über die Zeit ähnelt daher die in der zusammenfassenden Resultatsabbildung gezeigte Kurve für die tatsächlichen Tischtennisdaten mit hoher Streuung um den Umkehrpunkt herum und anschließender Abnahme zum Treffpunkt hin deutlich mehr der aus dem Optimalen-Kontroll-Modell als der aus dem Trajektorie-Kontroll-Modell abgeleiteten Kurve.

mehr um eine aufgabendienliche „gute“ Streuung handelt. Dass diese Feststellung mehr als bloße Theorie ist, weisen Todorov und Jordan (2002) anhand von Modellsimulationen von Tischtennisschlägen nach, indem sie aufzeigen, dass die modellierten deutlich besser mit real produzierten Bewegungsbahnen übereinstimmen, wenn als Zielgröße nicht eine optimale Bewegungsbahn in die Modellierung eingeht, sondern das aufgabenangemessene Treffen des Balls (für Details siehe Kasten 7.2).

Bereits zu Beginn dieses Buches wurde in Kapitel 2 auf das Zitat des allgemein als genial anerkannten russischen Motorikwissenschaftlers Nikolai Alexandrowitsch Bernstein verwiesen, nach dem Bewegungskontrolle nicht auf die wiederholbare Lösung für ein Kontrollproblem, sondern auf das Vermögen abzielt, ein Kontrollproblem wiederholt zu lösen (vgl. Bernstein, 1935-1965/1987). Letztlich legen Todorov und Jordan (2002) nichts anderes als eine mathematische Modellierung

genau dieses Gedankens vor. Es beeindruckt erneut, dass er von Bernstein bereits vor 100 Jahren gedacht wurde, etwa in Zusammenhang mit seinen Studien, in denen er – wie in Abbildung 7.12 veranschaulicht – aufzeigte, dass bei geübten Schmieden wiederholte Hammerschläge in der aufgabenirrelevanten Dimension (den Bewegungsbahnen) streuen, während in der aufgabenrelevanten Dimension (dem Treffen des Werkstücks) eine hohe Konstanz zu verzeichnen ist.

Beziehen wir die zuletzt gemachten Ausführungen auf unser im Laufe der bisherigen Buchkapitel stetig weiterentwickeltes Verständnis motorischer Kontrollarchitekturen, so müssen wir abschließend feststellen, dass es in der Theorie interner Modelle gar keine Umkehrung der Vorhersagen des Prädiktorsystems braucht, die in einem „fest verdrahteten“ Kontrollsystem ihren Niederschlag findet. Vielmehr reicht es bei fortlaufender Aktualisierung der Zustandsschätzung durch das

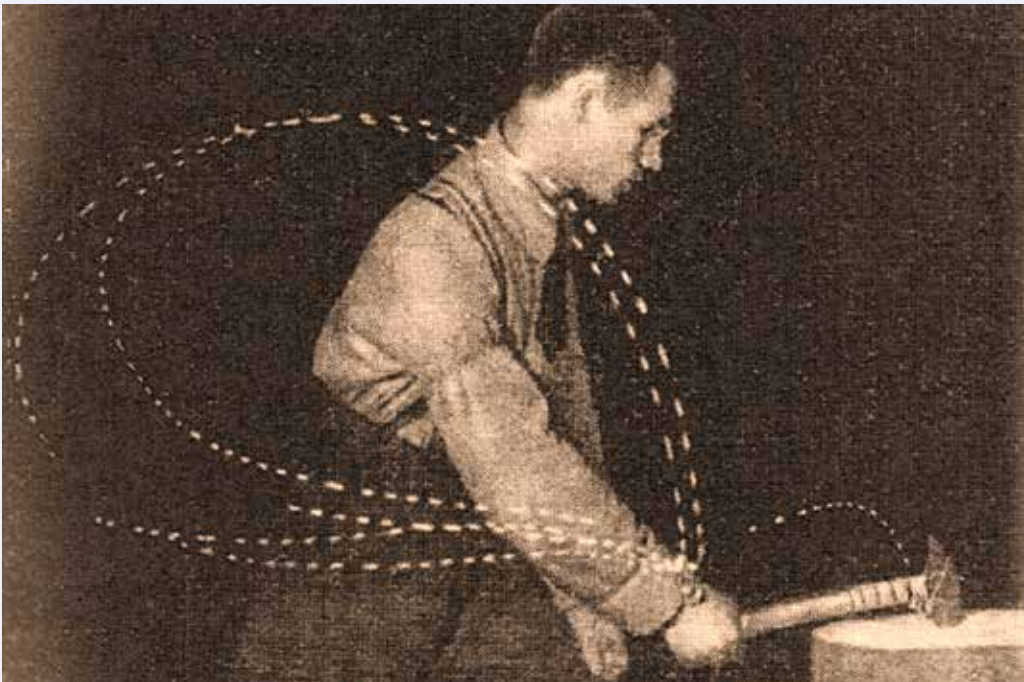


Abbildung 7.12: Wiederholte Hammerschläge mit nur in aufgabenirrelevanter Dimension streuenden Bewegungsbahnen, aufgenommen im Labor von Nikolai Alexandrowitsch Bernstein in den 1920er Jahren⁷⁰

7. Wahrnehmungs-Handlungs-Kopplung

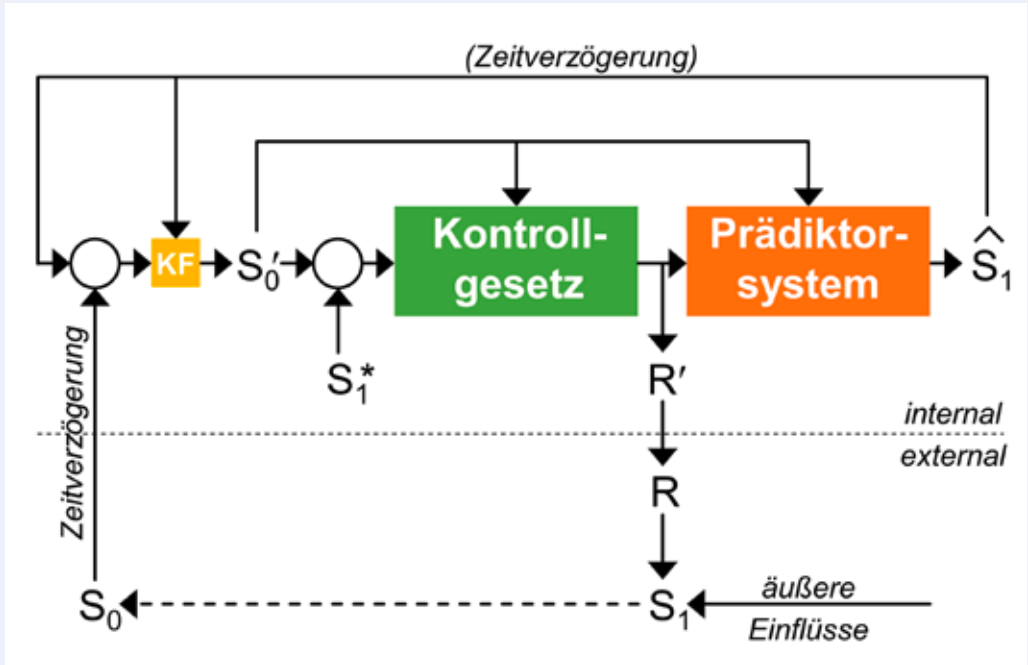


Abbildung 7.13: Theorie interner Modelle als Architektur optimaler Feedback-Kontrolle mit Kontrollgesetz, externaler Regelung, internaler Pseudo-Regelung und Istwert-Kalkulation unter Berücksichtigung der Vorhersage des Prädiktorsystems nach Kalman-Filterung (KF) (modifiziert nach Todorov, 2004)

Prädiktorsystem aus, aufgabenbezogene Kriterien festzulegen, die optimal erfüllt werden sollen, während in allen aufgabenirrelevanten Variablen auf eine Kontrolle verzichtet wird. In der Motoriktheorie wird der hiermit skizzierte Ansatz als „optimale Kontrolle“ bezeichnet und der benötigte Satz von Optimalitätskriterien als Kontrollgesetz (engl. control law; Todorov, 2004). In Abbildung 7.13 rückt aus diesem Grund (im Vergleich zur Abbildung 7.9) an die Stelle eines Kontrollsystems ein aufgabenbezogenes Kontrollgesetz, das letztlich nichts anderes abbildet als eine aufgabenabhängig spezifizierte Kostenfunktion.

Für den Erwerb motorischer Fertigkeit rückt vor dem Hintergrund der in Abbildung 7.13 veranschaulichten Architektur einer optimalen Feedback-Kontrolle die Optimierung des Vermögens in den Vordergrund, vorherzusagen, was – unter mehr oder weniger ausgeprägtem eigenem Zutun – im nächsten Zeittakt in der Welt passieren wird. Der Frage, welche Kniffe sich an dieser Stelle als erfolgreich erwiesen haben, wenn es darum geht, diesen Erwerb zu erleichtern oder zu beschleunigen, werden wir uns in den folgenden Kapiteln zuwenden, in deren Mittelpunkt das Problem der Veränderung der Bewegungskontrolle steht, also das Problem des motorischen Lernens.