



Jürgen Birklbauer

Modelle der Motorik

Band 5

MEYER
& MEYER
VERLAG

Spektrum Bewegungswissenschaft
Band 5

Modelle der Motorik

Diese Arbeit ist all jenen gewidmet,
die in letzter Zeit viel Chaos
zu erdulden hatten,

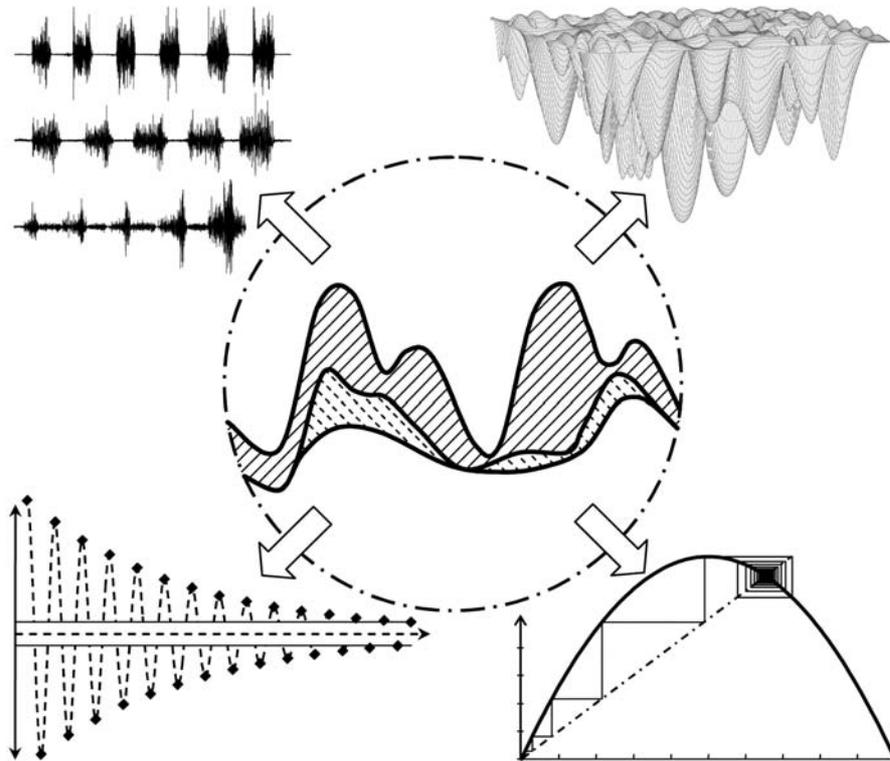
und all jenen zum Trotz,
denen der Determinismus,
im Chaos zu erkennen,
bis heute verwehrt geblieben ist.

Spektrum Bewegungswissenschaft
Band 5

Jürgen Birklbauer

Modelle der Motorik

**Eine vergleichende Analyse
moderner Kontroll-, Steuerungs-
und Lernkonzepte**



Meyer & Meyer Verlag

Herausgeber der Reihe Spektrum Bewegungswissenschaft:
Prof. Dr. Erich Müller, Universität Salzburg

Unterstützung durch die Stiftungs- und Förderungsgesellschaft
der Paris-Lodron-Universität Salzburg

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie das Recht
der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form – durch
Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren – ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet,
gespeichert, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2006 by Meyer & Meyer Verlag, Aachen
Adelaide, Auckland, Budapest, Graz, Johannesburg, New York,
Olten (CH), Oxford, Singapore, Toronto
Member of the World
Sportpublishers' Association (WSPA)
ISBN: 978-3-8403-0556-6
E-Mail: verlag@m-m-sports.com



Inhalt

I	Einleitung.....	11
II	Problemstellung.....	14
III	Kontrolle und Steuerung von Bewegungen.....	21
1	Informationsverarbeitungsansätze	28
1.1	Kybernetisch orientierte Modelle	29
1.1.1	Sensorische Informationen und Feedback.....	30
1.1.1.1	Visuelle Informationsaufnahme – Sehapparat.....	30
1.1.1.2	Akustische Informationsaufnahme – Hörapparat.....	31
1.1.1.3	Vestibulare Informationsaufnahme – Vestibularapparat.....	31
1.1.1.4	Kinästhetische Informationsaufnahme	32
1.1.1.5	Taktile Informationsaufnahme – Hautrezeptoren	35
1.1.2	Servomechanismen	35
1.1.2.1	Feedforwardkontrolle	36
1.1.2.2	Efferenzkopie – <i>Corollary Discharge</i>	37
1.1.2.3	Internal/Central Feedback Loop	39
1.1.3	Closed-Loop-Steuerung und Reflexe.....	40
1.1.3.1	Alpha-Gamma-Koaktivierung (monosynaptischer Reflex).....	41
1.1.3.2	Long-Loop-Reflex	44
1.1.3.3	Triggered Reactions.....	45
1.2	Programmorientierte Modelle	45
1.2.1	Struktur und Inhalt motorischer Programme	46
1.2.2	Hinweise zur Existenz motorischer Programme	48
1.2.2.1	Deafferenzierungsstudien	48
1.2.2.2	Kontrolle schneller Bewegungen.....	51
1.2.2.3	Central Pattern Generators	55
1.2.2.4	Vorprogrammierung.....	57
1.2.2.5	Motorische Äquivalenz.....	58
1.2.2.6	Aufbau motorischer Programme ohne physisches Üben und Trainieren.....	59
1.2.2.7	Programme laufen auch bei zusätzlichen Anforderungen autonom ab.....	59
1.2.3	Kritik an den Programmtheorien.....	59
1.2.3.1	Speicherproblem.....	59
1.2.3.2	Neuigkeitsproblem	60
1.2.4	Spatial Location Cues	60
1.3	Generalisierte motorische Programme (GMP-Theorie)	62
1.3.1	Impuls-Timing-Hypothese.....	63

1.3.1.1	Sequenzierung (<i>Order of Elements</i>).....	63
1.3.1.2	Relative Impulsdauer (<i>Phasing, Relative Timing</i>)	64
1.3.1.3	Relative Impulsstärke (<i>Relative Force</i>).....	65
1.3.2	Variable Parameter.....	66
1.3.2.1	Absolute Zeiten (<i>Overall Duration Parameter</i>).....	66
1.3.2.2	Absolute Kräfte (<i>Overall Force Parameter</i>)	67
1.3.2.3	Muskelauswahl (<i>Muscle Selection Parameter</i>).....	68
1.3.2.4	Räumliche Parameter (<i>Spatial Parameter</i>).....	69
1.3.3	Impulsvariabilität zur Prüfung generalisierter motorischer Programme.....	70
1.3.4	Invarianzexperimente komplexer Bewegungen zur Prüfung generalisierter motorischer Programme	73
1.3.4.1	Kinematische Untersuchungen	73
1.3.4.2	Elektromyografische Untersuchungen	74
1.4	Masse-Feder-Modelle	77
1.4.1	Äquilibriumspunkthypothese	79
1.4.2	Gammamodell nach Merton	80
1.4.3	Lambdamodell nach Feldman.....	81
1.4.4	Alphamodell nach Bizzi	85
1.5	Motorische Programme und Feedback (<i>Mixed Approaches</i>)	89
1.5.1	Sensorische Informationen und Feedback.....	90
1.5.2	Aufgabenbezogene Steuerung	92
1.5.3	Hierarchische Steuerung.....	92
1.5.4	Intermittierende Steuerung.....	93
1.5.5	Klassifizierung unterschiedlicher Korrektursysteme	93
2	Optimierungsmodelle und Effektivitätsprinzipien.....	102
2.1	Minimierung der Bewegungszeit (<i>Movement Time</i>)	102
2.2	Minimierung des Impulses (<i>Impulse</i>)	103
2.3	Minimierung der Energie (<i>Energy</i>).....	104
2.4	Minimierung des Rucks (<i>Jerk</i>)	104
2.5	Minimierung der Drehmomentänderung (<i>Torque-Change</i>).....	105
2.6	Minimierung von <i>Effort</i>	105
2.7	Maximierung von <i>Comfort</i>	106
2.8	Komplexe <i>Cost Functions</i>	106
3	Frequenzkodierungsmodelle	108
4	Systemdynamische Modelle	116

4.1	Gestaltpsychologie	123
4.1.1	Gestaltpsychologie und Bewegung	129
4.1.2	Die motorische Forschung der Ganzheitspsychologie in den 20er und 30er Jahren	132
4.1.3	Renaissance der Gestaltpsychologie in der Motorik.....	134
4.2	Der bewegungsphysiologische Ansatz von N. A. Bernstein.....	142
4.2.1	Das Problem der Freiheitsgrade	143
4.2.1.1	Art und Umfang der Freiheitsgrade.....	143
4.2.1.2	Drei Stadien des Lernprozesses: <i>From Freezing to Freeing</i>	146
4.2.2	Der ganzheitliche Charakter lebendiger Bewegungen	147
4.2.3	Topologie und Metrik.....	149
4.2.4	Das Problem der Wechselbeziehung von Lokalisation und Koordination	151
4.2.4.1	Die grundlegende Differenzialgleichung der Bewegung	151
4.2.4.2	Zur Koordination von Bewegungen.....	154
4.2.4.3	Zum Unterschied zwischen Lokalisation und Topik	156
4.2.4.4	Das Prinzip der gleichen Einfachheit	157
4.2.5	Selbstregulierende Systeme – Ringregulation.....	158
4.3	The Ecological Approach	164
4.3.1	Ökologische Wahrnehmungspsychologie nach Gibson.....	165
4.3.2	Die Verbindung von Wahrnehmung und Handlung zur Onlineregulation von Bewegungen	169
4.3.3	Time-to-Contact-Hypothese – die optische Variable <i>Tau</i>	175
4.3.3.1	Global Tau	176
4.3.3.2	Lokal Tau.....	176
4.3.3.3	Empirische Untersuchungen.....	177
4.3.3.4	Modellerweiterung	181
4.3.3.5	Ergänzende Kritikpunkte.....	184
4.3.4	Die Hypothese <i>körperskalierter</i> Wahrnehmung.....	186
4.3.5	Ökologische Analyse komplexer Bewegungen	189
4.3.6	Der systemdynamische Ansatz von Franks und Goodman	192
4.4	Chaostheorie – eine Theorie nichtlinearer Systeme	194
4.4.1	Das Chaospendel – ein Weg ins Chaos	199
4.4.2	Die logistische Gleichung (Logistic Map)	208
4.4.3	Selbstähnlichkeit – die Symmetrie nichtlinearer Systeme	213
4.4.4	Chaostheorie und Motorik.....	217
4.5	Synergetik – die Lehre vom Zusammenwirken.....	237
4.5.1	Synergetik in der unbelebten Natur	241

4.5.1.1	Laserparadigma.....	241
4.5.1.2	Rayleigh-Bénard-Experiment (<i>the Fluid Dynamics Paradigm</i>)	245
4.5.1.3	Grundbegriffe und -prinzipien der Synergetik	249
4.5.2	Synergetik in der belebten Natur.....	251
4.5.2.1	Haken-Kelso-Bunz-Modell für gekoppelte Fingerbewegungen.....	251
4.5.2.2	Absolute und relative Koordination	262
4.5.2.3	Folgeexperimente – Koordinationsmodelle zyklischer Bewegungen.....	267
4.5.2.4	Koordinationsmodell zielgerichteter Bewegungen – <i>Basic Coordination Dynamics and Intentional Information</i>	274
4.5.3	Synergetik im Sport.....	281
4.5.3.1	Zyklische Bewegungen	286
4.5.3.2	Azyklische Bewegungen	292
4.5.4	Zusammenfassung Synergetik.....	318
4.6	Problembereiche und Kritikpunkte der systemdynamischen Modelle	321
IV	Motorisches Lernen.....	326
1	Stufentheorien	330
1.1	Zwei-Stufen-Modelle	334
1.1.1	Zwei-Stufen-Modell nach Pöhlmann.....	334
1.1.1.1	Acquisitionsphase	334
1.1.1.2	Perfektionierungsphase	334
1.1.2	Zwei-Stufen-Modell nach Lehnertz.....	335
1.1.2.1	Technikerwerbstraining	335
1.1.2.2	Technikanwendungstraining	336
1.1.3	Zwei-Stufen-Modell nach Glencross	336
1.1.4	Zwei-Stufen-Modell nach Daugis und Blischke.....	336
1.2	Drei- und Mehrstufenmodelle.....	337
1.2.1	Das Fitts-Posner-Modell	337
1.2.2	Drei-Stufen-Modell nach Martin, Carl und Lehnertz.....	337
1.2.3	Drei-Phasen-Modell nach Meinel und Schnabel.....	338
1.2.3.1	Entwicklung der Grobkoordination.....	339
1.2.3.2	Entwicklung der Feinkoordination.....	339
1.2.3.3	Stabilisierung der Feinkoordination und Entwicklung der variablen Verfügbarkeit	340
1.2.4	Lernbereiche nach Hotz.....	341
1.2.5	Drei-Stufen-Modell nach Roth	343
1.2.6	Drei-Phasen-Modell nach Loosch.....	343
1.2.6.1	Phase der Aneignung und Vollzugsorientierung	343

1.2.6.2	Phase der Vervollkommnung und Individualisierung.....	344
1.2.6.3	Phase der Perfektionierung und Leistungsorientierung	344
1.2.7	Crattys Drei-Stufen-Theorie	344
1.2.8	Fünf Lernstufen nach Letzelter.....	345
1.3	Kritik an den Stufentheorien	345
2	Hierarchisches Modell der Bewegungsautomatisierung.....	347
3	Theorie des motorischen Lernens nach Adams.....	349
3.1	Kritik an Adams Lerntheorie.....	351
4	Schematheorien	353
4.1	Frühe Schematheorien	353
4.1.1	Schematheorie nach Head	353
4.1.2	Schematheorie nach Bartlett.....	354
4.1.3	Schematheorie nach Attneave.....	354
4.2	Schematheorie nach Schmidt.....	354
4.2.1	Struktur und Inhalt der Schemata	355
4.2.2	Experimentelle Studien.....	360
4.2.3	Kritik an der Schematheorie sowie an der Theorie der generalisierten motorischen Programme.....	364
4.3	Alternative Schematheorien	367
4.3.1	Schematheorie und Mass-Spring-Kontrolle nach Wulf	367
4.3.2	Konzept des Motorikschemas nach Munzert	371
4.3.3	Hierarchisches Schemamodell nach Zimmer und Körndle	373
4.3.4	Interne Bewegungsrepräsentation nach Wiemeyer	374
4.4	<i>Variability-of-Practice</i> -Hypothese.....	375
5	Systemdynamische Lerntheorie.....	383
5.1	Lernen als systemdynamischer Prozess.....	384
5.2	Differenzielles Lernen.....	409
5.2.1	Kritik an klassischen Lerntheorien und -strategien	412
5.2.2	Differenzielle Selbstorganisation.....	413
5.2.3	Praktisch-methodische Lehr- und Lernprinzipien.....	418
5.2.4	Experimentelle Studien.....	423
5.3	Alternative Konzepte variablen Übens.....	427
5.3.1	Variables Üben nach Schmidt.....	429

5.3.2	Funktionelle Variabilität nach Loosch	438
5.3.3	Instruierte und resultative Variabilität nach Hillebrecht	443
5.3.4	Versuch-Irrtum-Lernen	447
5.3.5	Methode des variierten Übens nach Hirtz.....	450
5.4	Systemdynamische Modellierung einer nichtlinearen (fraktalen) Methodik zum differenziellen Lernen.....	452
5.4.1	Stabilität und Flexibilität – eine Widerspruchseinheit.....	452
5.4.2	Systemdynamische Analyse von Ist- und Sollzustand.....	455
5.4.2.1	Istzustandsanalyse	456
5.4.2.2	Sollzustandsanalyse	462
5.4.3	Modellierung der Differenzierungsstruktur	468
5.4.3.1	Anfangsdifferenz – D_0	471
5.4.3.2	Lernfaktor – α	475
5.4.3.3	Übungsfrequenz – ω	477
5.4.3.4	Selbstähnlichkeit der Differenzierungsstruktur	478
5.4.3.5	Differenzierungsmöglichkeiten	480
5.4.3.6	Ausblick	485
6	Feedbacktraining	487
6.1	Knowledge of Result (KR).....	487
6.1.1	Relative KR-Häufigkeiten	487
6.1.2	Zeitlicher Einsatz von KR	488
6.1.3	Genauigkeit von KR.....	488
6.2	Knowledge of Performance (KP).....	489
7	Motorisches Gedächtnis (Motor Memory)	490
7.1	Sensorisches Gedächtnis	491
7.2	Kurzzeitgedächtnis.....	492
7.3	Langzeitgedächtnis	493
7.4	Vergessensprozesse	494
V	Zusammenfassung.....	497
VI	Ausblick	507
VII	Literaturverzeichnis.....	513
VIII	Stichwortverzeichnis	547

I Einleitung

Die Bewegungswissenschaft oder Bewegungslehre als *authentische* und *genuine* Disziplin nimmt einen festen Platz im Gebäude der Sportwissenschaft ein (vgl. Roth & Willimczik, 1999, S. 9). Der Gegenstand dieser Lehr- und Forschungsdisziplin ist die funktionsanalytische Betrachtung der menschlichen Bewegung (vgl. Göhner, 1999, S. 11).

Die Wissenschaften – insbesondere die Naturwissenschaften – agieren auf vier konzeptionellen Ebenen (vgl. Schmidt, 1988, S. 20): Beobachtungen, Gesetze, Theorien und Modelle.

Die Grundlage wissenschaftlicher Überlegungen bildet die Beobachtung von Objekten und Phänomenen mit bestimmten Untersuchungsverfahren.

Anhand der gesammelten Daten werden Gesetze abgeleitet. Gesetze sind generelle Standpunkte, welche die beobachteten Objekte und Phänomene in allgemeiner Form beschreiben oder zusammenfassen.

Der Prozess der Theoriebildung umfasst das Erklären und Verstehen der hinter den Tatsachen und Gesetzen liegenden Ursachen. Gemäß dem bekannten Physiker Stephen Hawking (1996 cit. in Magill, 2001, S. 41) hat eine hinreichend geeignete Theorie folgende Voraussetzungen zu erfüllen: „It must accurately describe a large class of observations ... and it must make definite predictions about the result of future observations.“

Auf der vierten Ebene, der von Schmidt (1988, S. 36 f.) genannten wissenschaftlichen Strukturierung, werden Modelle (Modellierungen) entwickelt, die zur Veranschaulichung der Theorien und zur Prüfung der Vorhersagen dienen.

Die Theorien und Modelle der Bewegungswissenschaft, die das Studium des motorischen Lernens sowie der motorischen Kontrolle und Steuerung einschließt, konzentrieren sich auf das Erklären des menschlichen Verhaltens. „... we look to theories to provide us with explanations about why people perform skills as they do, which means identifying the variables that account for the performance characteristics we observe“ (Magill, 2001, S. 41). So lässt sich beispielsweise beobachten, dass erlernte Bewegungsfertigkeiten in völlig unterschiedlichen Situationen erfolgreich eingesetzt werden können (motorischer Transfer). Ein Basketballspieler ist im Stande seinen Sprungwurf, aus verschiedenen Entfernungen und unterschiedlichen Spielsituationen zielsicher

auszuführen. Eine brauchbare Theorie müsste solche oder ähnliche Phänomene erklären können (vgl. Magill, 2001, S. 41).

Die rasante Entwicklung naturwissenschaftlicher Kenntnisse hat zu neuen Paradigmen geführt und die Differenzierung der Wissenschaftsdisziplinen gefördert. Der *Universalwissenschaftler* – wie ihn Descartes oder Leibniz noch verkörperte – ist verschwunden bzw. war auf Grund der Spannweite moderner Wissenschaften zum Verschwinden verurteilt. Als eine an den Naturwissenschaften partizipierende Forschungsdisziplin ist die Bewegungswissenschaft durch die neu entdeckten Paradigmen geprägt. Ohne eindeutige mutterwissenschaftliche Basis besitzt die Motorikforschung gegenüber dem Trend der Mutterwissenschaften integrierende Funktion. Im Kontext moderner Selbstorganisationstheorien sucht die Bewegungsforschung wieder nach jenen disziplinübergreifenden Wissenschaftlern, die in der Lage sind, die einzelnen Paradigmen in einer integrativen Konzeption zu vereinen. Um einem solchen Anspruch gerecht zu werden, müsste der moderne Bewegungsforscher Physiker, Informatiker, Neurophysiologe, Psychologe und Biologe zugleich sein.

Ausgelöst durch radikal naturalistische Auffassungen, hat eine Trendwende nahezu alle Gebiete der Naturwissenschaften erfasst. Der Mensch und seine Funktionsmechanismen wurden zum Vorbild technischer Entwicklungen, während sich bislang die Erforschung der menschlichen Wirkmechanismen am Computer orientierte. Mag der Mensch in vielen Bereichen an den Aufbau von Computern erinnern, ist er im Gegensatz doch ein hoch entwickeltes sensorisches System, das über eine außerordentlich leistungsfähige Wahrnehmung und Motorik verfügt (vgl. Dauterive, 1994, S. 24). Dies lässt sich an einem einfachen, aber eindrucksvollen Beispiel verdeutlichen. Je mehr Informationen dem Menschen zur Verfügung stehen, desto schneller und genauer können diese (z. B. zur Entscheidungsfindung) verarbeitet werden, während die Verarbeitungsleistung des Computers mit zunehmender Informationsmenge abnimmt (wie man beim Verfassen einer solchen Arbeit des Öfteren schmerzlich feststellen muss).

Die vorliegende Arbeit ist aus der eigenen Unzulänglichkeit entstanden, die abstrakten Vorstellungen und mathematischen Modellierungen der modernen Motorikforschung zu verstehen, geschweige denn anwenden zu können. Beim Versuch, diese Anfangsschwierigkeiten durch ein Literaturstudium zu überwinden, begegnet man entweder zahlreichen Literaturbeiträgen von populärwissenschaftlichem Charakter oder sehr fachspezifischen Schriften, die dem

Fachpublikum vorbehalten sind, da sehr spezifische Kenntnisse vorausgesetzt werden. Arbeiten, die den Einstieg in konkreter, wenngleich verständlicher Art erleichtern, sind die Ausnahme. Wenn der nun vorliegende Beitrag als einer dieser Ausnahmen gelten würde, wäre eines der gesetzten Ziele erreicht.

II Problemstellung

Vergleichbar mit dem Phänomen der sprunghaften Leistungssteigerung vollzieht sich der wissenschaftliche Erkenntnisfortschritt nicht in einer kontinuierlichen Akkumulation von Wissen, etwa durch eine aufstrebend-stringente Kette von Falsifikationsbemühungen, sondern vielmehr in einer diskontinuierlichen Abfolge von spezifischen, zeitweise dominierenden erkenntnistheoretischen Grundpositionen mit krisenhaften Übergängen (vgl. Neumann, 1985; 1992 cit. in Daus, 1994, S. 14).

Solche wissenschaftlichen Paradigmen umfassen Denkmuster und Forschungsansätze, die von übergeordneten Leitideen bis zu speziellen experimentellen Anordnungen reichen (vgl. Daus et al., 1999, S. 27).

Ist ein bestimmtes Paradigma einer zunehmenden Hinterfragung auf Grund widersprüchlicher, empirischer Befunde ausgesetzt und zeigen etablierte Wissenschaftler Interesse an den aufgeworfenen Kontradiktionen, kommt es zu einer Paradigmenkrise. Dass der Wechsel zwischen solchen wissenschaftlichen Grundpositionen in der Regel sehr langsam vor sich geht, führt Daus (1994, S. 16) auf die Verteidigung alter, dominierender Paradigmen durch Wissenschaftler, die mit diesen aufgewachsen sind und dabei persönlich sehr viel investiert haben, zurück. Die *Lebensdauer* eines Paradigmas entspricht daher mit 30 - 35 Jahren häufig der Zeitspanne einer Forschergeneration (z. B. Gestaltpsychologie, Behaviorismus, Psychomotorik).

Als mögliche Ergebnisse einer Paradigmenkrise nennt Daus (1994, S. 16):

- Beibehaltung des dominierenden Paradigmas trotz störender Widersprüche.
- Beibehaltung des dominierenden Paradigmas durch *Ad-hoc-Anpassungen*.
- Gleichzeitige Existenz zweier sich widersprechender Paradigmen mit jeweils eigenem Gültigkeitsbereich.
- Verdrängung des dominierenden Paradigmas der *normalen Wissenschaft* durch ein alternatives, *revolutionäres* Denkmuster.

Anfang der 80er Jahre wurde das Informationsverarbeitungsparadigma der Kognitionspsychologie durch die kontradiktorischen Modelle der Selbstorgani-

sationstheorien in eine Krise gestürzt. Zu welchen der von Daus angeführten, prinzipiell möglichen Ergebnissen einer Paradigmenkrise die so genannte *Motor-Action*-Kontroverse in der Bewegungswissenschaft geführt hat, soll in der vorliegenden Arbeit geklärt werden.

In ihren Überlegungen zur Bewegungsorganisation und -koordination beanstanden Nitsch und Munzert (1997, S. 50) das Fehlen einer integrativen Konzeption. Unterschiedliche Ansätze stehen weit gehend unverbunden nebeneinander und führen einen gegenseitigen Argumentationswettstreit, der nicht selten in einem überzogenen Absolutheitsanspruch mündet.

Martin et al. (1993, S. 44) fordern, die unterschiedlichen Modellvorstellungen zur Bewegungsorganisation in einen größeren theoretischen und vor allem praxisbezogenen Zusammenhang einzuordnen.

Voraussetzung für ein integratives Gesamtkonzept ist eine übergreifende Systematisierung und Relativierung des bisherigen Wissens. Viele Theorien sind in ihrer – nicht immer selbstgewählten – Forderung auf Allgemeingültigkeit widerlegt worden, was aber nicht heißt, dass sie generell falsch sind. Vielmehr bedarf es einer konsequenten Aufarbeitung, genauen Prüfung und Einordnung der Gültigkeitsbereiche der einzelnen existierenden Teilmodelle. Eine derartige Perspektive lässt sich am Beispiel der GMP-Theorie von Schmidt (vgl. Kap. I.1.3) verdeutlichen. In diesem Konzept invarianter und varianter Bewegungskomponenten werden nur rein muskuläre Kräfte zur Bewegungsproduktion einbezogen. Dass diese Vorstellung spätestens dann zu Erklärungsschwierigkeiten führt, wenn man Bewegungen betrachtet, bei denen zusätzlich Kräfte nichtmuskulärer Genese (Trägheit, Gravitation, usw.) eine Rolle spielen, mag nicht verwundern. In zahlreichen Invarianzuntersuchungen konnte Schmidts Entwurf weder generell falsifiziert noch bestätigt werden. Ihr Gültigkeitsbereich lässt sich aber auf spezifische Bewegungsformen einschränken. Welche Relevanz diese Bewegungsformen für unser alltags- und sportmotorisches Handeln hat, bestimmt zusätzlich zum theoretischen Aufklärungswert die Nützlichkeit des Modells.

Neben der Istanalyse im Sinne einer Systematisierung und Relativierung vorhandener Modellentwürfe müssen die Ziele festgelegt sein, die mit einer integrativen Konzeption verfolgt werden. Für die Bewegungswissenschaft heißt dies in erster Linie, sich die Problembereiche der Motorik und im Speziellen der Bewegungskontrolle und -steuerung sowie des motorischen Lernens zu vergegenwärtigen.

Auf der obersten Ebene ihrer Problemstrukturierung stellen Nitsch und Munzert (1997, S. 52) die Frage: „Wie läßt sich menschliche Bewegungsorganisation als komplexe, dynamische und funktionale Ordnung unter variablen Bedingungen beschreiben, erklären, vorhersagen und systematisch beeinflussen?“ Aus dieser Frage leiten die Autoren zwei zentrale, wechselseitig aufeinander bezogene Grundprobleme ab:

- Komplexitätsproblem: Was ermöglicht die Vielfalt menschlicher Bewegungsphänomene und auf welche Organisationsprinzipien lässt sich diese Vielfalt reduzieren?
- Funktionalitätsproblem: Wie entstehen Ordnungen im Bewegungsverhalten, die im Hinblick auf die Bewältigung von spezifischen Anforderungen zweckmäßig sind?

a) Komplexitätsproblem

Sucht man nach einer geeigneten Begriffsbestimmung von Komplexität, ist man bereits mit einer nicht einfach zu lösenden Aufgabe konfrontiert. So nennt der MIT-Physiker Lloyd (1990 cit. in Daugis et al., 1999, S. 17) 45 verschiedene Definitionen und der Physik-Nobelpreisträger Gell-Mann (1994 cit. in Daugis et al., 1999, S. 18) räumt ein, dass „jede Definition der Komplexität zwangsläufig kontextabhängig, ja sogar subjektiv ist“. Im Gegensatz zu Daugis et al. (1999, S. 17), die von der Suche nach einer praktikablen Umschreibung abraten, versuchen Nitsch und Munzert (1997, S. 53 f.), den Komplexitätsbegriff metrisch zu fassen. Gemäß ihrer Definition ergibt sich der Komplexitätsgrad eines dynamischen Systems – wie der menschlichen Motorik – aus der Gesamtzahl der prinzipiell möglichen alternativen Zustände des Systems und zeitlich aus den pro Zeiteinheit möglichen Zustandsänderungen.

Das Komplexitätsproblem der Bewegungsorganisation fragt danach, wie sich die vielen Subsysteme flexibel und schnell zur Lösung einer spezifischen Bewegungsaufgabe verbinden – im Sinne Bernsteins (1975, S. 150/1957): Wie gelingt „die Organisation der Steuerbarkeit des Bewegungsapparates“?

Neben der Bewegungskomplexität gilt es, den Begriff der Koordination näher zu bestimmen. Bernstein (1975, S. 150/1957) versteht unter der Koordination von Bewegungen „die Überwindung der überflüssigen Freiheitsgrade des sich bewegenden Organs“.

Turvey (1990 cit. in Nitsch & Munzert, 1997, S. 55) betont einen zweiten Aspekt des von Bernstein formulierten Redundanzproblems. Seiner Ansicht nach

liegt die entscheidende Schwierigkeit darin, die Vielfalt und Variabilität möglicher Bewegungsphänomene auf wenige Organisationsprinzipien und Informationsstrukturen zurückzuführen.

Vor diesem Hintergrund nennen Nitsch und Munzert (1997, S. 56) drei grundlegende Problemkreise, die für die Bewegungsforschung maßgeblich sein sollten:

- Strukturproblem:
 - Aus welchen Grundkomponenten (Subsystemen) besteht eine komplexe Bewegung?
 - In welcher formalen Beziehung stehen die einzelnen Komponenten zueinander?
 - Welche Anordnung ist anforderungsspezifisch optimal?
- Teil-Ganzes-Problem:
 - In welcher Beziehung stehen die einzelnen Komponenten zur Gesamtbewegung?
 - Welche Folgerungen ergeben sich daraus für die Trainingspraxis?
- Transformationsproblem:
 - Wie funktionieren Übertragungen, Wechselwirkungen und Abstimmungen zwischen qualitativ unterschiedlichen Systemkomponenten und -prozessen?

Das Strukturproblem betreffend, stehen sich zwei konträre Kontroll- bzw. Regulationsmodelle gegenüber. Der hierarchisch-sequenzielle oder *Top-down* Kontrollmodus geht davon aus, dass ein Bewegungsablauf hierarchisch ausdifferenziert wird und die einzelnen Teilziele nacheinander (sequenziell) realisiert werden. Demgegenüber beschreiben Netzwerkmodelle eine heterarchisch, parallel organisierte Bewegungsorganisation und Kontrollstruktur (vgl. Dauterive, 1994, S. 26).

Die Teil-Ganzes-Problematik umfasst neben dem beobachteten Phänomen, dass eine Gesamtbewegung Eigenschaften aufweist, die sich nicht aus der Summation der Eigenschaften ihrer Teile ableiten, die Gestaltkonstanz von Bewegungen. Dazu zählen Nitsch und Munzert (1997, S. 61) u. a. das Problem der Äquifinalität, d. h. das Erreichen eines gleichen Endzustandes von unterschiedlichen Ausgangsbedingungen, und das Problem der motorischen Äquivalenz, das die Erzeugung gleicher Bewegungsleistungen durch den Einsatz oder

die Kombination verschiedener Körperteile, Muskelgruppen bzw. Gelenke meint.

Im letztgenannten Problembereich zur motorischen Komplexität geht es um die Aufklärung der Transformationsmechanismen zwischen den Systemkomponenten. In Anlehnung an Gallistel (1980) nennen Nitsch und Munzert (1997, S. 63) die Beziehung zwischen psychischen und körperlichen Prozessen, zwischen Energie und Information, zwischen Reiz- und Gedächtnisinformation, zwischen Afferenz und Efferenz und zwischen unterschiedlichen Sinnesinformationen als besonders aufklärungsbedürftig und bedeutungsvoll für die Bewegungsorganisation.

b) Funktionalitätsproblem

Der zweite übergeordnete Fragenkatalog bezieht sich auf die Funktionalität der Bewegungsorganisation. Motorische Bewegungen besitzen in der Regel eine spezifische Funktion in der Bewältigung bestimmter Anforderungen und Aufgabenstellungen. Es geht also nicht mehr primär um die Veränderung von unorganisierten zu organisierten, sondern von schlecht und gut organisierten Bewegungen (vgl. Ashby, 1962 cit. in Nitsch & Munzert, 1997, S. 64).

Der funktionalen Bewegungsorganisation sind nach Nitsch & Munzert (1997, S. 64) drei Problembereiche untergeordnet:

- Lernproblem:
 - Wie wird die funktionale Ordnung von Bewegungen in reproduzierbarer Weise erfahrungsabhängig und anforderungsspezifisch optimiert?
- Intentionalitätsproblem:
 - Wie kommt es, dass von vielen potenziellen Ordnungen offenbar jeweils ganz bestimmte bevorzugt und intendiert werden?
- Repräsentationsproblem:
 - Wieweit setzen Reproduzierbarkeit und Absichtlichkeit von Bewegungen interne Repräsentationsstrukturen voraus?

Als die praxisrelevante Fragestellung schlechthin erörtert das motorische Lernproblem die grundlegenden Prinzipien des Bewegungslernens und Techniktrainings, um im Hinblick auf eine gestellte Bewegungsaufgabe die bestmögliche Lernstrategie zu verfolgen. In einer ersten Annäherung ist die Frage zu klären,

welche zeitlich überdauernden Veränderungen der Bewegungsorganisation auf Lernvorgängen beruhen und welche durch andere Mechanismen, wie Reifungsprozesse oder veränderte konditionelle Voraussetzungen, zu Stande kommen. Im zweiten Schritt müssen die Fragen, was kann und was sollte gelernt werden, beantwortet werden, bevor man sich den Problemen inhaltsspezifisch optimaler Lernstrategien widmet (Nitsch & Munzert, 1997, S. 64 f.).

Das Intentionalitätsproblem wendet sich der Bewegungsorganisation unter subjektiven Ziel-, Zweck- und Sinnbezügen zu, die geplant, initiiert und reguliert werden. Wenn Bewegungen intentional geplant sind, scheint dies eine Instanz, die die Intention ausbildet, vorauszusetzen (*Homunculus-Problem*). Wie lässt sich aber die Vorstellung sich selbst organisierender Systeme mit einer intentionalen Bewegungsorganisation vereinbaren und wie können überhaupt zielführende und realisierbare Intentionen gebildet werden, wenn die Informationen für Entscheidungsfindung unvollständig, mehrdeutig oder widersprüchlich sind (Nitsch & Munzert, 1997, S. 66 f.)?

Im Repräsentationsproblem stellen Nitsch und Munzert (1997, S. 67 f.) die beiden grundsätzlich möglichen und alternativ gehandelten Organisationsformen gegenüber. Die Selbstorganisation erklärt die Ordnungsbildung rein anhand der Wechselwirkung der Systemelemente, wohingegen die Fremdorganisation interne Repräsentationsstrukturen vor allem dann als notwendig erachtet, wenn Bewegungen willkürlich erzeugt werden oder neuartige Bewegungsmuster zur Bewältigung wiederkehrender Anforderungen gelernt werden müssen. Setzt man interne Bewegungsrepräsentationen zur Bewegungsorganisation voraus, ergibt sich eine Reihe von Teilproblemen (vgl. Nitsch & Munzert, 1997, S. 69):

- Speicherproblem: Es ist denkbar unökonomisch, anzunehmen, dass jede Bewegung intern repräsentiert ist. Neben der begrenzten Speicherkapazität würden die Zugriffszeiten bei der Auswahl spezifischer Bewegungsrepräsentationen zu lang werden.
- Invarianzproblem: Was sind die klassenbildenden Gemeinsamkeiten verschiedener Bewegungen und Bewegungssituationen? Was wird wie repräsentiert, wenn man das Speicher- und Abrufproblem berücksichtigt?
- Neuigkeitsproblem: Wie lässt sich das Entstehen neuartiger, bislang noch nicht ausgeführter Bewegungen oder Bewegungskombinationen auf der Basis interner Repräsentationen erklären?

Die erläuterten Problembereiche und Fragestellungen der Organisation und Koordination motorischer Bewegungen sind in Abb. 1 zusammengefasst.

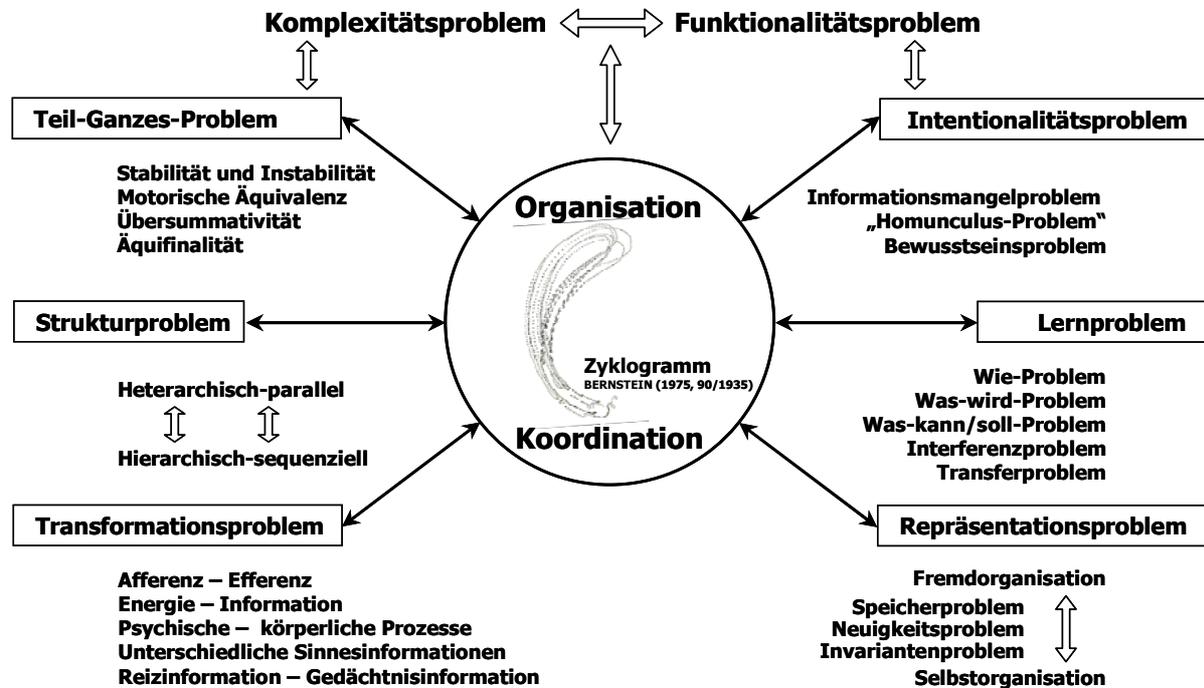


Abb. 1: Übersicht über die theoretischen Grundprobleme der Bewegungsorganisation und -koordination (in Anlehnung an Nitsch und Munzert, 1997, S. 71)

Es ist das erklärte Ziel der vorliegenden Arbeit, die aktuellen Theorien und Modelle zur Kontrolle und Steuerung von Bewegungen sowie zum motorischen Lernen auf ihre Fähigkeit kritisch zu prüfen, die genannten Problembereiche und Fragestellungen der Bewegungsorganisation und -koordination zu lösen. Die dabei verfolgte Strategie umfasst die Aufarbeitung historischer Zusammenhänge, die detaillierte und verständliche Darstellung der Untersuchungsverfahren anhand konkreter Beispiele und die Weiterentwicklung eines praktisch-methodischen Modells zum Bewegungslernen auf der Basis des differenziellen Übens.

III Kontrolle und Steuerung von Bewegungen

„The human motor system is a very complex whole with many interacting pieces, processes, and mechanisms, and to attempt to successfully understand the entire system would be extremely difficult“ (Schmidt & Lee, 1999, S. 93).

Die Bewegungswissenschaft umfasst zwei große Teilbereiche, die sich in ihrer Theoriebildung zwingend ergänzen. Ihre zentralen Fragestellungen lauten:

- Wie werden Bewegungen kontrolliert und gesteuert?
- Wie werden Bewegungen gelernt?

Motorisches Lernen (*Motor Learning*) kann nicht begriffen werden, solange man nicht weiß, wie die Bewegungssteuerung funktioniert, denn das motorische Lernen ist nichts anderes als die erfahrungsbedingte Veränderung der Bewegungssteuerung im Lauf der Übungszeit. Umgekehrt ist die Beständigkeit jeglicher Theorie der Bewegungskontrolle (*Motor Control*) nur auf der Grundlage des motorischen Lernphänomens überprüfbar, indem sich Bewegungssteuerung und motorisches Lernen gegenseitig beeinflussen (vgl. Glencross et al., 1994 cit. in Pesce, 2003, S. 31).

Im Mittelpunkt einer Bewegungsforschung, die sich mit den Kontroll- und Steuerungsmechanismen des motorischen Systems beschäftigt, stehen Theorien zur Bewegungsorganisation und -koordination. Obwohl gemeinhin synonym verwendet, verstehen Nitsch und Munzert (1997, S. 50) Bewegungsorganisation als den allgemeineren Begriff, „der sich auf alle am Zustandekommen einer geordneten Bewegung beteiligten physikalischen, biologischen und psychologischen Faktoren und Prozesse im Rahmen einer konkreten Person-Umwelt-Aufgabe-Konstellation bezieht“. Bewegungskoordination bezeichnet konkreter die gegenseitige Abstimmung aller Bewegungskomponenten im Zusammenwirken von Mensch und Umwelt – „the patterning of body and limb motions relative to the patterning of environmental objects and events“ (Magill, 2001, S. 43).

Innerhalb hinreichend geeigneter Theorien zur Bewegungskoordination müssen, unabhängig von ihren theoretischen Standpunkten, folgenden Kernprobleme motorischer Kontroll- und Steuerungsprozesse lösbar sein (vgl. Rockmann-Rüger, 1991, S. 20):

- Motorische Äquivalenz: Warum weisen gleiche Bewegungen, von verschiedenen Muskelgruppen ausgeführt, die gleichen Charakteristika auf?
- Stabilität und Variabilität: Wie können Bewegungen sowohl stabil als auch variabel sein?
- Komplexität (*Degrees-of-Freedom Problem*): Wie können die überflüssigen Freiheitsgrade des sich bewegenden Organs überwunden werden?

Beim Versuch, diese Problembereiche zu lösen und das Zustandekommen von Bewegungen zu erklären, stehen sich seit Anfang der 80er Jahre zwei ursprünglich rein kontradiktorisch dargestellte Ansätze gegenüber. Diese als *Motor-Action-Kontroverse* bekannte Auseinandersetzung umfasste einerseits das in der Kognitionspsychologie verwurzelte Informationsverarbeitungsparadigma und andererseits die als *Action Approach* bezeichneten Selbstorganisations-theorien einer ganzheitlichen Betrachtungsweise.

Die Grundannahme der verschiedenen Informationsverarbeitungsmodelle betrifft die hierarchische Organisation der Bewegungskontrolle und die Integration von Wahrnehmung, interner Repräsentation und motorischer Ausführung durch Programme oder kybernetische Regelkreise.

Tab. 1: Klassifikation interner Repräsentationen nach Wiemeyer (1994, S. 235)

Ordnungsaspekte	Interne Repräsentationen
Inhalte	Bewegungsprogramme; Schemaregeln; präskriptives, interpretatives und prozedurales Wissen; Aktionen, Effekte, Aktions-Effekt-Relationen
Zeitliche Bedingungen	Prä-, syn-, postaktional; Produkt, Prozess
Grad der Bewusstheit	Primär-bewusst, latent-bewusstseinsfähig, unbewusst; implizit, explizit
Kodierungsformat	Bildhaft-analog, symbolisch-propositional episodisch; kinästhetisch, räumlich-bildhaft, sprachlich-symbolisch, motorisch; modalitätsspezifische Marken, modalitätsübergreifende Konzepte
Verarbeitungsebenen	Anatomische Ebene, physiologische Ebene, Verhaltensebene; Körper-, Informations-, Lebenswelt; physikalische, phonemische, semantische Ebene
Struktur	Assoziatives Netzwerk, Hierarchie
Grad der Stabilität	Stabil (statisch), labil (dynamisch)

Neben der Trennung in programmorientierte Open-Loop-Konzepte und kybernetisch orientierte Closed-Loop-Modelle beruht die Vielzahl an verschiedenen Ansätze zur Informationsverarbeitung auf den Unterschieden in den internen Bewegungsrepräsentationen. Wiemeyer (1994, S. 235) nimmt eine Klassifikation der abweichenden Entwürfe vor (vgl. Tab. 1), wobei er sich die Frage

stellt, ob die eingeführten Ordnungsaspekte lediglich unterschiedliche Perspektiven einer multimodalen Gedächtnisrepräsentation darstellen oder ob tatsächlich separate Repräsentationen vorliegen.

Die Selbstorganisationstheorien der Aktionsmodelle wenden sich explizit gegen die Auffassung irgendwie gearteter Repräsentationskonstrukte zur Bewegungskontrolle und -steuerung. Organisation und Koordination von Bewegungen erfolgt hingegen über heterarchische, dynamische, selbstorganisierende Aktionssysteme.

Wegbereiter des modellübergreifenden Selbstorganisationspostulats in der Motorik waren Bernsteins Überlegungen zum *Überwinden der Freiheitsgrade*, zur *Nichteindeutigkeit von Zentrum und Peripherie* und zur *kontextbezogenen Variabilität* und Gibsons Vorstellungen einer direkten Wahrnehmung, der die Annahme der Untrennbarkeit von Mensch und Umwelt, die als gleichberechtigte komplementäre Systeme interagieren, zu Grunde liegt. Bewegungskontrolle verlangt keine interne Vergleichsinstanz der wahrgenommenen Informationen, sondern ergibt sich selbstorganisierend aus dem Mensch-Umwelt-System als funktionaler Einheit.

Sowohl Bernsteins kybernetische Perspektive der motorischen Koordination als auch Gibsons *Perception-Action Coupling* zur Onlineregulation von Bewegungen verfolgen eine ganzheitliche Sichtweise, deren Wurzeln in der Gestaltpsychologie zu finden sind.

Der moderne Selbstorganisationsansatz in der Bewegungswissenschaft orientiert sich vor allem bei der Wahl seiner Forschungsmethoden an der Chaostheorie, der Synergetik und dem Konnektionismus. Die Attraktivität dieser Konzepte liegt in der physikalisch-mathematischen Modellierung sich selbstorganisierender Systeme der belebten und unbelebten Natur. Mithilfe der *exakten Wissenschaften* wird die Bewegungskoordination als ein dynamisches System, das den Prinzipien der Selbstorganisation unterliegt, analysiert.

Die beiden Forschungsstrategien in der Motor-Action-Kontroverse – das Informationsverarbeitungs- und das Selbstorganisationsparadigma – unterscheiden sich neben ihrer theoretischen Annahmen in der Art der Fragestellungen, den Analysemethoden und in der Weise, wie sie experimentieren.

Die so genannten Frequenz- oder Fourierkodierungsmodelle vertreten die Modellvorstellung, dass komplexe Bewegungsabläufe in Form von Frequenzkomponenten im Gehirn repräsentiert sind. Hinsichtlich der Annahme einer zentralen Bewegungskodierung stimmen sie mit den kognitionspsychologischen Mo-

dellen überein. Gegenüber dem traditionellen Ansatz der Informationsverarbeitung ist diese Art der internen Repräsentation aber nicht elementgebunden, sondern besitzt ganzheitlichen Charakter.

Ausgangspunkt ist die Beobachtung Bernstein (1975, S. 72/1935), dass sich rhythmische Bewegungsabläufe als Summen harmonischer Oszillationen beschreiben lassen. Die Frequenzkodierungsmodelle bieten einerseits einen Ansatz zur Lösung des Komplexitätsproblems und andererseits den Vorteil, dass zur motorischen Steuerung keine ständige Führung untergeordneter motorischer Zentren erforderlich ist. Da die überlagerten Sinusschwingungen laut Stadler et al. (1996, S. 145) ebenso im Sinne der Synergetik als Ordnungsparameter interpretieren werden können, sind Fourierkodierungsmodelle zwischen *Motor* und *Action Approach* anzusiedeln.

Als gleichfalls eigenständige Konzeption entwerfen die ingenieurwissenschaftlich orientierten Optimierungsmodelle (*Engineering Approach*) eine Koordinationstheorie, die das Überwinden der überflüssigen Freiheitsgrade zur Bewegungssteuerung anhand der Minimierung bzw. Optimierung physikalischer und/oder physiologischer Größen zu begründen versucht. Im Vordergrund stehen verschiedene Effektivitätsprinzipien, die die Auswahl der Bewegungstrajektorie festlegen, um von einer Ausgangsposition zu einer gewünschten Endposition zu gelangen.

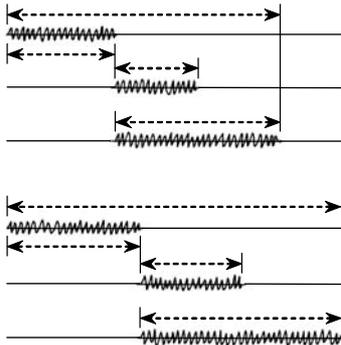
Nachfolgend werden ausgewählte Modelle der Informationsverarbeitung, der Systemdynamik, der Frequenzkodierung und der Optimierung detailliert vorgestellt und im Hinblick auf ihre Fähigkeit zur Lösung der zentralen Probleme in der Motorik überprüft. Abb. 2 bietet einen Überblick über die erfolgreichsten Ansätze und Modelle sowie über die grundlegenden Problembereiche der Bewegungskontrolle und -steuerung.

Zur Begriffsklärung werden anschließend die gängigsten Klassifikationsformen des motorischen Verhaltens erläutert.

Die Einteilung motorischer Handlungen in bestimmte Klassen von Bewegungen erachtet Schmidt (1988, S. 45; Schmidt & Lee, 1999, S. 16) aus zwei Gründen für notwendig. Erstens werden in der Literatur verschiedene Ausdrücke verwendet, um Aufgaben und Bewegungen zu beschreiben. Das Verstehen dieser Terminologie ist Voraussetzung für eine wissenschaftliche Diskussion. Zweitens scheinen Gesetze motorischen Verhaltens von der Art der Bewegung abhängig zu sein. Eine entsprechende Klassifikation der Bewegungsformen dient zur Vereinfachung und soll helfen, die Kontrolle und Steuerung von Bewegun-

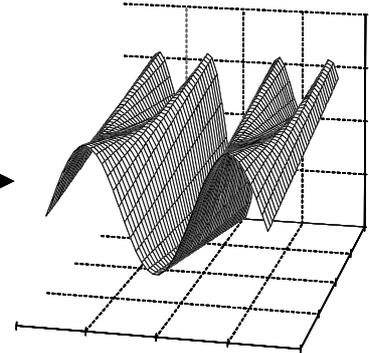
gen besser zu verstehen. „In any field of study, the objects under investigation are usually classified according to some scheme or framework to simplify the discussion. The field of motor behavior is no exception” (Schmidt, 1988, S. 45; Schmidt & Lee, 1999, S. 16).

Informationsverarbeitungsmodelle



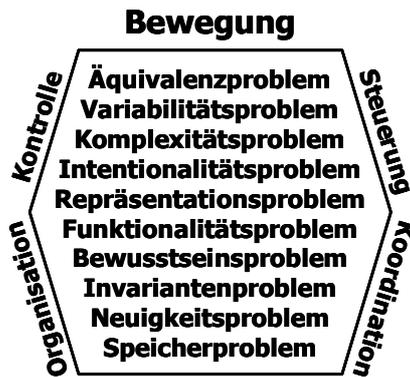
Open-Loop-Approach
 Closed-Loop-Approach
 Mixed-Approach
 GMP-Theorie
 Masse-Feder-Modelle

Systemdynamische Modelle

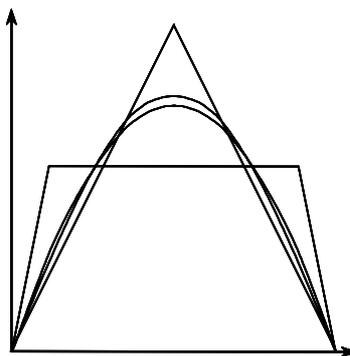


Gestaltpsychologie
 Koordinationsmodell nach Bernstein
 Ökologische Psychologie nach Gibson
 Konnektionismus
 Chaostheorie
 Synergetik

Motor-Action-Kontroverse



Optimierungsmodelle



Minimierung der Drehmomentänderung
 Minimierung der Bewegungszeit
 Minimierung der Anstrengung
 Minimierung des Impulses
 Minimierung der Energie
 Minimierung des Rucks
 Maximierung des Komforts

Frequenzkodierungsmodelle

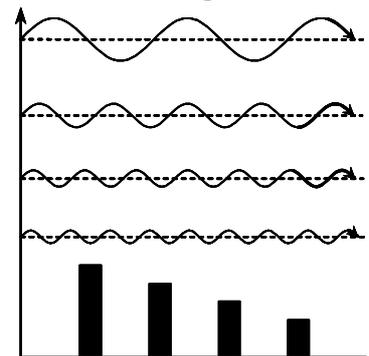


Abb. 2: Strukturierung der Organisations- und Koordinationsmodelle zur Kontrolle und Steuerung von Bewegungen

Rieder (1991, S. 16 f.) nennt folgende Begriffspaare, die zwar in sich disjunkt sind, dennoch aber im Vergleich zu anderen Begriffspaaren Überschneidungen ergeben:

a) Offen – geschlossen

Offene Handlungen kommen zum Tragen, wenn sich die Umweltbedingungen ständig ändern, wie z. B. im Fechten (Schmidt, 1988, S. 47; Schmidt & Lee, 1999, S. 17). Geschlossene Bewegungen sind im Ablauf bekannt, dieser ist klar vorgezeichnet und kann gesteuert werden, wie z. B. der Fosburyflop (Rieder, 1991, S. 16).

b) Zyklisch – azyklisch

Die Einteilung in zyklische und azyklische Bewegungsformen orientiert sich an der Wiederholungszahl der Bewegung, wobei sich bei zyklischen Bewegungen gleiche Teile vielfach wiederholen, während azyklische nur einmalig ablaufen bzw. sich bei mehrmaliger Ausführung deutlich ändern (Rieder, 1991, S. 16 f.).

c) Ohne Zeitdruck – mit Zeitdruck

Die Trennung in Bewegungsformen mit und ohne Zeitdruck verhilft zu einem Evaluationsprozess für den Lernerfolg, der nach Rieder (1991, S. 17) erst dann gesichert ist, wenn Bewegungen auch unter solchen Störeinflüssen gelingen.

d) Einfach – komplex

Der Schwierigkeitsgrad einer Bewegung ist Grundlage für die Unterteilung in einfache und komplexe Bewegungsformen. Einfache Bewegungen liegen dann vor, wenn sich Körper und Objekt in Ruhe befinden (z. B. Golfschlag), komplexe bzw. schwierige dann, wenn Körper und Objekt in Bewegung sind (z. B. Ringkampf) – (vgl. Rieder, 1991, S. 17).

e) Grobmotorisch – feinmotorisch

Der Begriff grobmotorisch beinhaltet umfangreiche, ganzheitliche, deutlich beobachtbare Bewegungen, welche die Anwendung großer Bereiche der Skelettmuskulatur bedingen. Feinmotorische Bewegungen sind im Allgemeinen präzisionszentriert (Singer, 1985, S. 18).

f) Großmotorisch – kleinmotorisch

Die Systematisierung in groß- und kleinmotorisch richtet sich nach der Anzahl der beteiligten Bewegungselemente (Schöllhorn, 1998, S. 30).

g) Bewusstseinspflichtig – automatisiert

Automatisierte Bewegungen, wie das Gehen, können ohne bewusste Kontrolle und Steuerung der Bewegung ablaufen (vgl. Rieder, 1991, S. 18).

Schöllhorn (1998, S. 28 ff.) ergänzt diese Klassifizierungen um die nachfolgende Einteilung der Bewegungsformen:

a) Diskret (seriell) – kontinuierlich

Diskrete Bewegungen besitzen, im Gegensatz zu kontinuierlichen, einen erkennbaren Anfang und ein erkennbares Ende, wie z. B. Wurfbewegungen (Schmidt, 1988, S. 46; Schmidt & Lee, 1999, S. 16).

b) Geführt – ballistisch

Geführte Bewegungen unterliegen einer ständigen Regelung und weisen eine hohe Ziel- und Ablaufpräzision auf. Ballistische Bewegungen hingegen versuchen, eine (sub-)maximale Geschwindigkeit zu erreichen (Schöllhorn, 1998, S. 29).

c) Selbstbestimmt (self-paced) – fremd-(situations-)bestimmt (externally-paced)

Singer (1985, S. 21 f.) unterscheidet Bewegungsformen hinsichtlich ihrer Eigenart und Anforderung an den Lernenden. Bewegungen, bei denen der Ausführende den Ablauf weitestgehend selbst bestimmen kann, werden als selbstbestimmt (self-paced) bezeichnet. Beeinflussen vorwiegend die aufgaben- und situationsspezifischen Anforderungen den Ablauf der Bewegung, so sind sie fremdbestimmt (externally-paced).

1 Informationsverarbeitungsansätze

„In Informationsverarbeitungsansätzen (Motor Approaches) wird der Mensch nach dem technischen Vorbild des Computers als Prozessor von Informationen aufgefasst. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen Aspekte der Speicherung, Kodierung, Transformation und des Abrufs verhaltensrelevanter Informationen“ (Roth & Willimczik, 1999, S. 177).

Die Kodierung der Informationen in Algorithmen (Programme) ist zentraler Bestandteil der Informatik und Computerwissenschaften. Die hierarchisch strukturierte Arbeitsweise des Computers wurde auf den Ablauf der menschlichen Bewegungssteuerung übertragen (vgl. Abb. 3) und als *erkenntnisleitende Metapher* verwendet (vgl. Wollny, 1993, S. 36 f.; Roth & Willimczik, 1999, S. 176 f.).

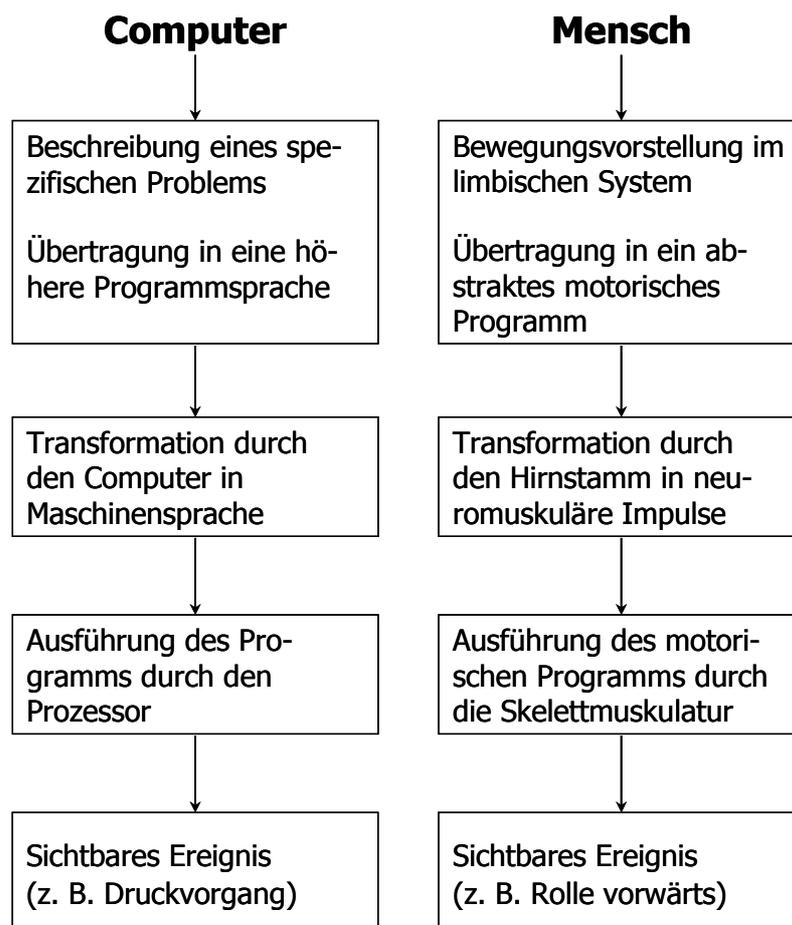


Abb. 3: Allgemeine Vorstellung über die Stufen der Algorithmusausführung in einem Computer im Vergleich zur Kontrolle menschlicher Bewegungen durch motorische Programme (nach Wollny, 1993, S. 37)

1.1 Kybernetisch orientierte Modelle

Die Kybernetik beschäftigt sich mit Steuerungs-, Regelungs- und Kommunikationsprozessen. Nach Singer (1985, S. 110) erklärt die Kybernetik „menschliches Verhalten als ein dynamisches internes Modell, wobei Handlungen von der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Reaktionen abhängig sind“.

Kybernetisch orientierte Ansätze zur Kontrolle und Steuerung von Bewegungen beziehen sich auf Regelkreismodelle, in denen die sensorischen (afferenten) Rückmeldungen zur Bewegungssteuerung herangezogen werden (vgl. Abb. 4). In einem Referenzmechanismus werden die Bewegungsziele als Input mit dem aus der Bewegung abgeleiteten Feedback verglichen. Die Abweichungen werden der Entscheidungsebene gemeldet, welche der Wirkungsebene entsprechende Instruktionen vermittelt. Der daraus folgende Output an die Umwelt ermöglicht die Bewegungskorrektur und damit die Kontrolle der Bewegung. Solche sich selbst regulierenden Systeme werden als Servomechanismus oder Closed-Loop-Systeme (geschlossener Kontrollkreis, ausgehend von der Umwelt über Entscheidung und Handlung wieder zurück zur Umwelt) bezeichnet (Schmidt, 1988, S. 142 f.; Schmidt & Lee, 1999, S. 97 f.).

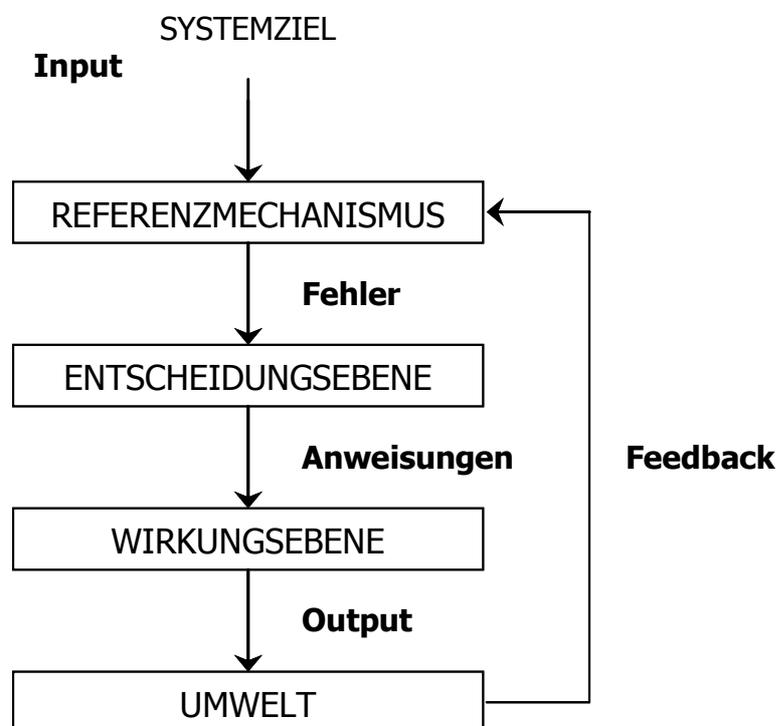


Abb. 4: Bestandteile typischer Closed-Loop-Kontrollsysteme (nach Schmidt, 1988, S. 142; Schmidt & Lee, 1999, S. 97)