

Marion Hoffmann

Koordination und Ermüdung

Experimentelle Untersuchung zu
Veränderungen der Bewegungskoordination
unter dem Einfluß von Ermüdung



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Univ. der Bundeswehr, 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-89675-879-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 17 |
| 2 | FRAGESTELLUNG | 61 |
| 3 | METHODIK | 67 |
| 3.1 | Untersuchungsteilnehmer und Versuchsablauf | 67 |
| 3.2 | Experimentalbewegung | 70 |
| 3.3 | Meßwerte | 71 |
| 3.4 | Untersuchungsverfahren | 75 |
| 3.4.1 | <i>Zielpräzision</i> | 75 |
| 3.4.2 | <i>Bewegungsanalyse</i> | 76 |
| 3.4.3 | <i>Analyse physiologischer Parameter</i> | 82 |
| 3.4.4 | <i>Analyse muskulärer Parameter</i> | 83 |
| 3.4.5 | <i>Analyse zentral-nervöser Parameter</i> | 85 |
| 3.5 | Untersuchungsdurchführung | 87 |
| 4 | ERGEBNISSE | 93 |
| 4.1 | Lernversuch und Re-Test | 94 |
| 4.1.1 | <i>Bewegungsergebnis</i> | 94 |
| 4.1.2 | <i>Kinematik</i> | 101 |
| 4.1.3 | <i>Intersegmentelle Dynamik</i> | 126 |
| 4.1.4 | <i>Physiologische Parameter</i> | 145 |
| 4.2 | Ermüdungsversuch | 151 |
| 4.2.1 | <i>Bewegungsergebnis</i> | 151 |
| 4.2.2 | <i>Kinematik</i> | 156 |
| 4.2.3 | <i>Intersegmentelle Dynamik</i> | 177 |
| 4.2.4 | <i>Physiologische Parameter (Herzfrequenz und Laktat)</i> | 198 |
| 4.2.5 | <i>Muskuläre Parameter</i> | 200 |
| 4.2.6 | <i>Zentral-nervöse Parameter</i> | 208 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3 | Zusammenfassung der Ergebnisse | 210 |
| 4.3.1 | <i>Veränderungen im Lernen</i> | 210 |
| 4.3.2 | <i>Veränderungen unter dem Einfluß von Ermüdung</i> | 212 |
| 5 | DISKUSSION | 227 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG | 247 |
| | LITERATURVERZEICHNIS | 251 |
| | ANHANG | 267 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----|
| ABB. 1: BELASTUNGS-BEANSPRUCHUNGS-KONZEPT (NACH ROHMERT, IN OLIVIER 1996, S. 43) | 41 |
| ABB. 2: VERSUCHSPERSONENPOSITION VON DORSAL-LATERAL UND VERSUCHSANORDNUNG | 71 |
| ABB. 3: TREFFERFELD UND TREFFERAUSWERTUNG | 75 |
| ABB. 4: VERSUCHSANORDNUNG | 77 |
| ABB. 5: MAXIMALKRAFTMESSUNG DES M.TRICEPS BRACHII AM DIAGNOS M3 | 84 |
| ABB. 6: DARSTELLUNG EXEMPLARISCHER VERLÄUFE FÜR DIE ZIELPRÄZISION UND ABFLUG- GESCHWINDIGKEIT IM LERNVERSUCH UND RE-TEST ALS AUCH DER ENTSPRECHENDEN REGRESSIONSGERADEN | 97 |
| ABB. 7: PRÄZISION UND ABFLUGGESCHWINDIGKEIT GEMITTELT ÜBER ALLE VERSUCHSPERSONEN | 100 |
| ABB. 8: STANDARDABWEICHUNG FÜR DIE PRÄZISION UND ABFLUGGESCHWINDIGKEIT FÜR VP1-8 | 100 |
| ABB. 9: BEWEGUNGSSTRUKTUR DES WURFES (DARGESTELLT AN EINEM RECHTEN WURFARM) | 102 |
| ABB. 10: VERDEUTLICHUNG DES BEWEGUNGSABLAUFES ANHAND DER ARMPOSITIONEN BEI BEWEGUNGSBEGINN, AM ÜMKEHRPUNKT UND IM ABWURF | 103 |
| ABB. 11: BEWEGUNGSSTRUKTUR UND TRAJEKTORIE DER HAND | 104 |
| ABB. 12: VERGLEICH DER TRAJEKTORIEN DER HAND VOR, IM UND NACH DEM LERNEN | 106 |
| ABB. 13: VERGLEICH DER RESULTIERENDEN GESCHWINDIGKEIT VOR, IM UND NACH DEM LERNEN | 110 |
| ABB. 14: VERGLEICH DER RESULTIERENDEN BESCHLEUNIGUNG VOR, IM UND NACH DEM LERNEN | 112 |
| ABB. 15: VERDEUTLICHUNG DER WINKELBERECHNUNG AM MODELL DES WURFARMES | 114 |
| ABB. 16: VERDEUTLICHUNG EINER FLEXION BZW. EXTENSION AM BEISPIEL EINES WINKEL-ZEIT- VERLAUFS FÜR DAS ELLBOGENGELENK | 114 |
| ABB. 17: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE FÜR DAS HANDGELENK VOR (LV 1) UND NACH DEM LERNEN (RE 4) | 118 |
| ABB. 18: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE FÜR DAS ELLBOGENGELENK VOR (LV 1) UND NACH DEM LERNEN (RE 4) | 120 |
| ABB. 19: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE FÜR DAS SCHULTERGELENK VOR (LV 1) UND NACH DEM LERNEN (RE 4) | 121 |
| ABB. 20: VERGLEICH DER WINKEL-WINKEL-VERLÄUFE FÜR DAS ELLBOGEN- UND SCHULTERGELENK VOR (LV 1) UND NACH DEM LERNEN (RE 4) | 123 |
| ABB. 21: EXEMPLARISCHE GELENK- UND MUSKELMOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 5 UND 6) AM HAND-, ELLBOGEN- UND SCHULTERGELENK NACH DEM LERNEN | 128 |
| ABB. 22: EXEMPLARISCHE VERLÄUFE (VP 1) VOR (OBEN) UND NACH DEM LERNEN (UNTEN) FÜR DAS NETTO- UND DAS MUSKELMOMENT AN ALLEN DREI GELENKEN | 129 |
| ABB. 23: EXEMPLARISCHE ELLBOGENMOMENT-SCHULTERMOMENT-VERLÄUFE (VP 1 UND 7) „GELERNT“ | 131 |
| ABB. 24: EXEMPLARISCHE ELLBOGENMOMENT-SCHULTERMOMENT-VERLÄUFE VP 1 (LINKS) UND VP 2 (RECHTS) VOR, IM UND NACH DEM LERNEN | 132 |

| | |
|---|-----|
| ABB. 25: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 1 UND 4) FÜR DAS HANDGELENK „GELERNT“ | 134 |
| ABB. 26: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 7) FÜR DAS HANDGELENK VOR UND NACH DEM LERNEN | 135 |
| ABB. 27: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 7 UND 4) FÜR DAS ELLBOGEGELENK „GELERNT“ | 138 |
| ABB. 28: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 2) „UNGELERNT“ UND „GELERNT/ UNERMÜDET“ FÜR DAS ELLBOGEGELENK | 139 |
| ABB. 29: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEITVERLÄUFE (VP 4 UND VP 8) „GELERNT“ FÜR DAS SCHULTER- GELENK | 143 |
| ABB. 30: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEITVERLÄUFE (VP 1) „UNGELERNT“ UND „GELERNT“ FÜR DAS SCHULTERGELENK | 144 |
| ABB. 31: EXEMPLARISCHE EMG-VERLÄUFE VP 5 (LINKS) UND VP 8 (RECHTS) NACH DEM LERNEN FÜR DEN M. DELTOIDEUS | 148 |
| ABB. 32: EXEMPLARISCHE EMG-VERLÄUFE VP 2 (LINKS) UND VP 8 (RECHTS) NACH DEM LERNEN FÜR DEN M. TRICEPS | 149 |
| ABB. 33: EXEMPLARISCHE EMG-VERLÄUFE (VP 7) FÜR TRIZEPS, DELTA UND BIZEPS „UNGELERNT“ (LINKS) UND „GELERNT“ (RECHTS) | 150 |
| ABB. 34: ZIELPRÄZISION UND ABFLUGGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ (VP 1- 4) IM ERMÜDUNGSVERSUCH | 152 |
| ABB. 35: ZIELPRÄZISION UND ABFLUGGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ (VP 5 UND 6) IM ERMÜDUNGSVERSUCH | 153 |
| ABB. 36: ZIELPRÄZISION UND ABFLUGGESCHWINDIGKEIT FÜR DIE GRUPPE „RAD“ (VP 7 UND 8) IM ERMÜDUNGSVERSUCH | 153 |
| ABB. 37: VERGLEICH DER TRAJEKTORIEN FÜR DIE GRUPPE „WURF“ (VP 1-4), „KRAFT“ (VP 5+6) UND „RAD“ (VP 7+8) VOR , WÄHREND UND AM ENDE DER BELASTUNG | 158 |
| ABB. 38: RESULTIERENDE GESCHWINDIGKEIT FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ „UNBELASTET“, „BELASTET“ NACH 250-275 WÜRFEN UND NACH 400 WÜRFEN | 164 |
| ABB. 39: RESULTIERENDE GESCHWINDIGKEIT FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ „UNBELASTET“, UND NACH EINER MAXIMALKRAFTREDUZIERUNG VON RUND 50% IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 BZW. 60% IN DER BELASTUNGSSTUFE 6 | 165 |
| ABB. 40: RESULTIERENDE GESCHWINDIGKEIT FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ „UNBELASTET“, IN DER BELASTUNGSSTUFE 2=120% DER IANS UND „AUSBELASTET“ | 165 |
| ABB. 41: RESULTIERENDE BESCHLEUNIGUNG FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ „UNBELASTET“, „BELASTET“ NACH 250-275 WÜRFEN UND NACH 400 WÜRFEN | 166 |
| ABB. 42: RESULTIERENDE BESCHLEUNIGUNG FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ „UNBELASTET“, NACH EINER MAXIMALKRAFTREDUZIERUNG VON RUND 50% IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 BZW. 60% IN DER BELASTUNGSSTUFE 6 | 167 |

| | |
|---|-----|
| ABB. 43: RESULTIERENDE BESCHLEUNIGUNG FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ „UNBELASTET“, IN DER BELASTUNGSSTUFE 2=120% DER IANS UND „AUSBELASTET“ | 168 |
| ABB. 44: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM HANDGELENK FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ „UNBELASTET“, „BELASTET“ NACH 250-275 WÜRFEN UND NACH 400 WÜRFEN | 169 |
| ABB. 45: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM HANDGELENK FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ „UNBELASTET“, NACH EINER MAXIMALKRAFTREDUZIERUNG VON RUND 50% IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 BZW. 60% IN DER BELASTUNGSSTUFE 6 | 170 |
| ABB. 46: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM HANDGELENK FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ „UNBELASTET“, IN DER BELASTUNGSSTUFE 2=120% DER IANS UND „AUSBELASTET“ | 170 |
| ABB. 47: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM ELLBOGENGELLENK FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ „UNBELASTET“, „BELASTET“ NACH 250-275 WÜRFEN UND NACH 400 WÜRFEN | 171 |
| ABB. 48: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM ELLBOGENGELLENK FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ „UNBELASTET“, NACH EINER MAXIMALKRAFTREDUZIERUNG VON RUND 50% IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 BZW. 60% IN DER BELASTUNGSSTUFE 6 | 172 |
| ABB. 49: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM ELLBOGENGELLENK FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ „UNBELASTET“, IN DER BELASTUNGSSTUFE 2=120% DER IANS UND „AUSBELASTET“ | 172 |
| ABB. 50: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM SCHULTERGELENK FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ „UNBELASTET“, „BELASTET“ NACH 250-275 WÜRFEN UND NACH 400 WÜRFEN | 173 |
| ABB. 51: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM SCHULTERGELENK FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ „UNBELASTET“, NACH EINER MAXIMALKRAFTREDUZIERUNG VON RUND 50% IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 BZW. 60% IN DER BELASTUNGSSTUFE 6 | 174 |
| ABB. 52: WINKEL-ZEIT-VERLÄUFE AM SCHULTERGELENK FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ „UNBELASTET“, IN DER BELASTUNGSSTUFE 2=120% DER IANS UND „AUSBELASTET“ | 174 |
| ABB. 53: ELLBOGENWINKEL-SCHULTERWINKEL-VERLÄUFE FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ „UNBELASTET“, „BELASTET“ NACH 250-275 WÜRFEN UND NACH 400 WÜRFEN | 176 |
| ABB. 54: ELLBOGENWINKEL-SCHULTERWINKEL-VERLÄUFE FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ „UNBELASTET“, IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 UND 6 | 176 |
| ABB. 55: ELLBOGENWINKEL-SCHULTERWINKEL-VERLÄUFE FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ „UNBELASTET“ (BLAU), IN DER BELASTUNGSSTUFE 2 UND „AUSBELASTET“ | 177 |
| ABB. 56: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 1/ GRUPPE I „WURF“) FÜR GELENK- UND MUSKELMOMENTE AN HAND-, ELLBOGEN- UND SCHULTERGELENK „UNBELASTET“ (OBEN) UND „BELASTET“ (UNTEN) | 179 |
| ABB. 57: EXEMPLARISCHE ELLBOGENMOMENT-SCHULTERMOMENT-VERLÄUFE (VP 1) FÜR DIE GRUPPE „WURF“ „UNGELEHRT“, „GELEHRT/ UNBELASTET“ UND „BELASTET“ | 181 |
| ABB. 58: EXEMPLARISCHE ELLBOGENMOMENT-SCHULTERMOMENT-VERLÄUFE (VP 6) FÜR DIE GRUPPE „KRAFT“ „UNBELASTET“ (LINKS) UND „BELASTET“ IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 (MITTE) BZW. 6 (RECHTS) | 182 |

| | |
|--|-----|
| ABB. 59: EXEMPLARISCHE ELLBOGENMOMENT-SCHULTERMOMENT-VERLÄUFE (VP 8) FÜR DIE GRUPPE „RAD“ „UNBELASTET“ (LINKS) UND „AUSBELASTET“ AM ANFANG (MITTE) BZW. AM ENDE DER WURFSERIE (RECHTS) | 182 |
| ABB. 60: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 1) AM HANDGELENK FÜR DIE GRUPPE „WURF“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND „BELASTET“ NACH 400 WÜRFEN“ (UNTEN) | 184 |
| ABB. 61: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 6) AM HANDGELENK FÜR DIE GRUPPE „KRAFT“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 (UNTEN) | 185 |
| ABB. 62: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE GRUPPE „RAD“ (VP 8) „GELERNT/ UNBELASTET“ (OBEN) UND „AUSBELASTET“ (UNTEN) FÜR DAS HANDGELENK | 187 |
| ABB. 63: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 2) AM ELLBOGENGELENK FÜR DIE GRUPPE „WURF“ „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ NACH 400 WÜRFEN | 189 |
| ABB. 64: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE GRUPPE (VP 6) AM ELLBOGENGELENK FÜR DIE GRUPPE „KRAFT“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 (UNTEN) | 191 |
| ABB. 65: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 8) AM ELLBOGENGELENK FÜR DIE GRUPPE „RAD“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND „AUSBELASTET“ (UNTEN) | 192 |
| ABB. 66: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 1) AM SCHULTERGELENK FÜR DIE GRUPPE „WURF“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND „BELASTET“ NACH 400 WÜRFEN (UNTEN) | 194 |
| ABB. 67: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 5) AM SCHULTERGELENK FÜR DIE GRUPPE „KRAFT“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND IN DER BELASTUNGSSTUFE 5 (UNTEN) | 196 |
| ABB. 68: EXEMPLARISCHE MOMENT-ZEIT-VERLÄUFE (VP 8) AM SCHULTERGELENK FÜR DIE GRUPPE „RAD“ „UNBELASTET“ (OBEN) UND „AUSBELASTET“ (UNTEN) | 197 |
| ABB. 69: EXEMPLARISCHE EMG-VERLÄUFE (VP 2) FÜR DIE GRUPPE „WURF“ „UNBELASTET“ (LINKS) UND „BELASTET“ (RECHTS) | 201 |
| ABB. 70: EXEMPLARISCHE EMG-VERLÄUFE (VP 6) FÜR DIE GRUPPE „KRAFT“ „UNBELASTET“ (LINKS) UND „BELASTET“ (RECHTS) | 203 |
| ABB. 71: EXEMPLARISCHE EMG-VERLÄUFE (VP 8) FÜR DIE GRUPPE „RAD“ „UNBELASTET“ (LINKS) UND „BELASTET“ (RECHTS) | 205 |
| ABB. 72: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG (VP 1) DER WICHTIGSTEN VERÄNDERUNGEN IM LERNEN UND UNTER DEM EINFLUSS VON ERMÜDUNG FÜR DIE GRUPPE „WURF“ | 222 |
| ABB. 73: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG (VP 6) DER WICHTIGSTEN VERÄNDERUNGEN IM LERNEN UND UNTER DEM EINFLUSS VON ERMÜDUNG FÜR DIE GRUPPE „KRAFT“ | 224 |
| ABB. 74: EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG (VP 8) DER WICHTIGSTEN VERÄNDERUNGEN IM LERNEN UND UNTER DEM EINFLUSS VON ERMÜDUNG FÜR DIE GRUPPE „RAD“ | 226 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|--|-----|
| TAB. 1: EINIGE MÖGLICHE „FEHLERQUELLEN“ BEI ERMÜDUNG (NACH BIGLAND-RITCHIE 1981B, S. 131) | 50 |
| TAB. 2: EINIGE MÖGLICHE FEHLERQUELLEN UND URSACHEN DER ERMÜDUNG NACH DEN ERKENNTNISSEN DES SYMPOSIUMS 1994 | 53 |
| TAB. 3: KENNWERTE UND ANTHROPOMETRISCHE DATEN DER VERSUCHSPERSONEN | 68 |
| TAB. 4: ÜBERSICHT ÜBER DEN VERSUCHSABLAUF | 69 |
| TAB. 5: ÜBERBLICK ÜBER MEßWERTE, ZEITPUNKT DER MESSUNGEN SOWIE DIE DAMIT VERBUNDENE ZIELSETZUNG | 74 |
| TAB. 6: BESCHREIBUNG DER GELENKZENTREN, DER MARKERTYPEN UND DEREN PLATZIERUNG | 76 |
| TAB. 7: RÄUMLICHE AUSRICHTUNG DER KAMERAS | 78 |
| TAB. 8: VERGLEICH DER ZIELPRÄZISION ZU BEGINN (LV 1) UND AM ENDE(RE 4) DES LERNPROZESSES | 98 |
| TAB. 9: VERGLEICH DER ABFLUGGESCHWINDIGKEITEN ZU BEGINN (LV 1) UND AM ENDE(RE 4) DES LERNPROZESSES | 98 |
| TAB. 10: VERGLEICH DER MITTELWERTE SOWIE DER STANDARDABWEICHUNG HINSICHTLICH ABFLUG- GESCHWINDIGKEIT [CM/ S] IM LERNVERSUCH UND RE-TEST | 99 |
| TAB. 11: PROZENTUALER ZEITANTEIL DER AUSHOL- UND DER WURFPHASE IM LERNVERSUCH | 108 |
| TAB. 12: GEGENÜBERSTELLUNG DER UNTERSCHIEDLICHEN NOMENKLATUR FÜR GELENKBEWEGUNGEN IN DER BIOMECHANIK UND DER ANATOMIE | 116 |
| TAB. 13: WINKELÄNDERUNGEN IN DER AUSHOL- BZW. WURFPHASE ZU BEGINN DES LERNENS (LV 1) UND AM ENDE DES LERNENS (RE 4) | 125 |
| TAB. 14: HERZFREQUENZEN [SCHLÄGE/ MIN.] IM LERNPROZEß | 146 |
| TAB. 15: LAKTATWERTE [MMOL/ L] IM LERNPROZEß | 147 |
| TAB. 16: VERGLEICH DER DURCHSCHNITTLICHEN ZIELPRÄZISION „UNBELASTET“ ZU „BELASTET“ FÜR DIE DREI EXPERIMENTALGRUPPEN | 154 |
| TAB. 17: VERGLEICH DER ABFLUGGESCHWINDIGKEIT IM BELASTETEN ZUM UNBELASTETEN ZUSTAND FÜR ALLE DREI EXPERIMENTALGRUPPEN | 155 |
| TAB. 18: BEWEGUNGSUMFANG DER WURFPHASE IN X-RICHTUNG „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ | 162 |
| TAB. 19: BEWEGUNGSUMFANG DER WURFPHASE IN Z-RICHTUNG „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ | 162 |
| TAB. 20: BEWEGUNGSUMFANG DER AUSHOLPHASE IN X-RICHTUNG „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ | 163 |
| TAB. 21: BEWEGUNGSUMFANG DER AUSHOLPHASE IN Z-RICHTUNG „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ | 163 |
| TAB. 22: HERZFREQUENZEN [SCHLÄGE/ MINUTE] UND LAKTATWERTE [MMOL/ L] IM ERMÜDUNGS- VERSUCH FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ | 198 |
| TAB. 23: HERZFREQUENZEN [SCHLÄGE/ MINUTE] UND LAKTATWERTE [MMOL/ L] IM ERMÜDUNGS- VERSUCH FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ | 199 |
| TAB. 24: HERZFREQUENZEN [SCHLÄGE/ MINUTE] UND LAKTATWERTE [MMOL/ L] IM ERMÜDUNGS- VERSUCH FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ | 199 |

| | |
|---|-----|
| TAB. 25: VERGLEICH DER MAXIMALKRAFT (F_{MAX}) DES M. TRICEPS BRACHII „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ | 206 |
| TAB. 26: VERGLEICH DER MAXIMALKRAFT (F_{MAX}) DES M. TRICEPS BRACHII „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ | 207 |
| TAB. 27: VERGLEICH DER MAXIMALKRAFT (F_{MAX}) DES M. TRICEPS BRACHII „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ | 207 |
| TAB. 28: VERGLEICH DER REAKTIONSZEITEN „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ FÜR DIE GRUPPE I „WURF“ | 208 |
| TAB. 29: VERGLEICH DER REAKTIONSZEITEN „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ FÜR DIE GRUPPE II „KRAFT“ | 209 |
| TAB. 30: VERGLEICH DER REAKTIONSZEITEN „UNBELASTET“ UND „BELASTET“ FÜR DIE GRUPPE III „RAD“ | 209 |
| TAB. 31: EINSCHÄTZUNG DES SUBJEKTIVEN BEANSPRUCHUNGSEMPFINDENS FÜR DIE GRUPPEN I-III | 210 |

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|------------|--|
| AB | Abwurf |
| BB | Bewegungsbeginn |
| BD | Bewegungsdauer |
| BST | Belastungsstufe |
| EV | Ermüdungsversuch |
| F_{\max} | Maximalkraft |
| IANS | Individuelle Anaerobe Schwelle |
| LV | Lernversuch |
| MW | Mittelwert |
| RE | Re-Test |
| SKW | Schwerkraftwechsel |
| Stabw | Standardabweichung |
| UP | Umkehrpunkt |
| VP | Versuchsperson |
| haaa | Handwinkelbeschleunigung (angular acceleration) |
| haav | Handwinkelgeschwindigkeit (angular velocity) |
| uaaa | Unterarmwinkelbeschleunigung (angular acceleration) |
| uaav | Unterarmwinkelgeschwindigkeit (angular velocity) |
| oaaa | Oberarmwinkelbeschleunigung (angular acceleration) |
| oaav | Oberarmwinkelgeschwindigkeit (angular velocity) |
| schla | Schulterlinearbeschleunigung (linear acceleration) |
| mus | Muskelmoment |
| net | Nettomoment |
| gra | Schwerkraft (gravity) |

1 EINLEITUNG

„The motor activity of organisms is of enormous biological significance – it is practically the only way in which the organism not only interacts with the surrounding environment, but also actively operates on this environment, altering it with respect to particular results.“ Bewegung in all ihren Facetten spielt, wie BERNSTEIN (1986, S. 344) es formulierte, in allen biologischen Systemen eine bedeutende Rolle. So ist der Erfolg eines Bewegungsablaufes im Tierreich, wie etwa das Jagen und Erlegen der Beute, existentiell. Auch im menschlichen Leben ist die Fähigkeit sich zu bewegen, vor allem sich selbständig und koordiniert zu bewegen, eine Voraussetzung, um autonom, frei und abwechslungsreich das eigene Leben gestalten zu können. Slogans wie „Leben ist Bewegung – Bewegung ist Leben“ bringen dies in überspitzter Form zum Ausdruck. Die Motorik tangiert dabei alle Lebensbereiche, vom Alltag über Beruf und Freizeit bis hin zur zwischenmenschlichen Kommunikation. Die Bewegungsabläufe variieren von einfachen Alltagsbewegungen, wie etwa das Anheben und Trinken aus einem Glas oder das Überqueren der Straße, über zeitlich und räumlich exakte Bewegungsabläufe im Berufsleben, wie etwa bei der Fließbandarbeit, über Bewegungen, die unsere Mimik und Gestik ausmachen, und damit ein wesentlicher Bestandteil unserer Kommunikation mit anderen ist, bis hin zur Motorik des Pianisten oder Leistungssportlers, die mit koordinativen Höchstleistungen das Publikum begeistern und staunen lassen. Nicht nur die Vielfalt der menschlichen Bewegung und die unendlichen Bewegungskombinationen stellen die Motorikforschung vor eine faszinierende wie schwierige Aufgabe, sondern auch die Tatsache, daß der Mensch durch die Vielzahl seiner Gelenke und Gliedmaßen ein sehr komplexes System darstellt, und die Steuerung und Kontrolle seiner Bewegungen nicht direkt beobachtbar oder meßbar sind, sondern quasi „im Verborgenen“ ablaufen.

„The coordination of the body and limbs during every day movements often goes completely unnoticed by most people. The neural activity and subsequent muscular involvement for a simple task, such as reaching out for an object, are finely coordinated and seemingly accomplished with little conscious thought“ (HEISE 1994). Die Koordination von Bewegungen, speziell von Alltagsbewegungen und auch sportlichen

Bewegungen, die sicher erlernt und automatisiert sind, spielt sich meist unbewußt – sozusagen im Hintergrund – ab und ist für uns quasi selbstverständlich. Kein gesunder Mensch überlegt, wie er den Arm nach vorne zum Glas führen muß, das Glas ergreift, zielsicher zum Mund führt und anschließend daraus trinkt. Auch der geübte Tennisspieler oder Skifahrer plant nicht bewußt die einzelnen Bewegungsabschnitte eines Schlages oder Schwunges. Wir werden uns – egal ob als Beteiligter oder als Beobachter – der Prozesse der Bewegungssteuerung und der Bewegungskontrolle eigentlich erst dann bewußt und „er-leben“ diese, wenn die Koordination aus verschiedenen Gründen noch nicht oder nicht mehr funktioniert.

So registrieren wir die ersten Greifversuche des Babys oder die ersten Krabbel- oder Gehversuche des Kleinkindes als „un-koordiniert“, uneffektiv und unökonomisch, und sehen als Augenzeuge dann erst deutlich den Kontrast zum selbstverständlichen, glatten, mühelosen, „gekonnten“ Bewegungsablauf beim Kind, Jugendlichen oder gesunden Erwachsenen. Auch fällt uns die nachlassende Koordination von Alltagsbewegungen bei älteren Menschen auf. Wir müssen sogar die Unabänderlichkeit dieses Vorgangs akzeptieren und notgedrungen erkennen, daß diese Verschlechterung im Alter auch diejenigen trifft, die unter Umständen als Leistungssportler früher ihre motorische Koordination in hohem Maße trainiert haben und ihren Körper exzellent beherrscht haben.

Am eigenen Leib werden wir uns der Bewegungskoordination am ehesten bewußt, wenn diese aus gesundheitlichen oder pathologischen Gründen nicht mehr „funktioniert“. Solche Koordinationsschwierigkeiten bzw. -störungen treten oft nach Verletzungen oder infolge von Krankheit auf. Im Zuge der Rehabilitation nach orthopädischen Eingriffen muß beispielsweise ein Patient, der am vorderen Kreuzband operiert worden ist, das „richtige“ Gehen erst wieder lernen. Noch markanter verändern sich die motorische Steuerung und Kontrolle infolge von Krankheiten wie Parkinson, Multiple Sklerose, Kleinhirnschäden etc.. Zur Bewältigung der Krankheit müssen die Betroffenen die Koordination gewohnter Bewegungsabläufe wieder neu lernen oder sich dementsprechende Kompensationsmechanismen aneignen. Oft bemerken wir selbst Veränderungen im Bewegungsablauf gar nicht, besonders wenn die Störungen (noch) geringfügig sind, oder sich seit langem konstituiert haben. Erst der spezialisierte Therapeut kann die „Fehler“ – im Sinne von unphysiologischen, schädigenden

Bewegungsabläufen – bewußt machen und helfen, richtige Bewegungsmuster wiederaufzubauen oder kompensatorische zu erlernen.

Ein anderes Medium, das Koordination „spürbar“ werden läßt und auch die Tragweite der motorischen Koordination sehr deutlich vor Augen führt, ist der Sport. Als Zuschauer sind wir begeistert von der Körperbeherrschung der Athleten und Sportler in den verschiedensten Sportarten bzw. -disziplinen. Wir halten den Atem an ob der gezeigten Akrobatik im Turnen und mancher halsbrecherischer Aktionen, wenn es im Abfahrtslauf einem Athleten noch gelingt, auf einem Ski durchs Ziel zu fahren. Anerkennend registrieren wir die feine Abstimmung zwischen zwei Sportlern wie etwa bei den Paaren im Eiskunstlauf oder im Tanzsport. Wir bemerken die gute „Zusammenarbeit“ zwischen den Teammitgliedern in den Ballsportarten. Und auf der anderen Seite kann das Fernsehpublikum es gar nicht fassen, warum „dieser Elfmeter nicht ins Tor gegangen ist“, „der Eiskunstläufer bereits zum dritten Mal nach einem Sprung auf dem Hintern landet“ oder der Weltklasse-Tennispieler mehrere Doppelfehler macht. Wie schwer oder leicht eine bestimmte Bewegungsleistung zu erbringen ist, kann der Laie ebenso schlecht einschätzen wie den schmalen Grad zwischen Erfolg und Mißlingen bei motorischen Handlungen.

Auch im motorischen Lernprozeß muß sich der Anfänger als „Involvierter“ erst nach und nach der Koordination seiner Bewegungsabläufe bewußt werden. Aber – wie beispielsweise bei der Übungsleiter- und Trainerausbildung sichtbar wird – fällt es selbst Leistungssportlern, Übungsleitern und Trainern zunächst schwer, die Unterschiede zwischen den koordinierten Bewegungsabläufen des Könners im Gegensatz zum Anfänger detailliert zu beschreiben. Meist sticht nur ins Auge, daß sich in der Koordination etwas geändert hat. Was sich aber geändert hat, kann nur schwer erkannt oder gar formuliert werden. Erst durch intensive Beschäftigung mit der Thematik und durch Übung ist der Beobachter, Trainer oder auch Wertungsrichter in der Lage, Merkmale auszumachen, die den jeweiligen Könnensstand und das Koordinationsniveau genauer charakterisieren. Um aber beispielsweise den Bewegungsablauf wirksam verbessern zu können, ist die Kenntnis der Ursachen für Veränderungen in der Koordination und das Wissen um die dahinterstehenden Mechanismen unerläßlich.

Neben dem bereits erläuterten Aspekt des „Unbewußten“, sind im Kontext von Koordination gerade auch deren *Veränderungen* von Belang. Solche Veränderungen der Motorik können durch Reifung und Entwicklung, durch pathologische Prozesse, Verletzungen oder auch durch Einflußfaktoren wie Alkohol und Drogen bedingt sein. Wie sich die Koordination im Zusammenhang mit Lernen und Ermüdung verändert, ist für die Motorikforschung von besonderem Interesse.

Im motorischen Lernprozeß werden Veränderungen der Koordination im Sinne einer Verbesserung explizit angestrebt. Für BERNSTEIN liegt der Sinn dieses Prozesses darin, die Bewegungstechnik immer wieder zu verändern und zu perfektionieren, um so allmählich zu einer optimalen Lösung des Bewegungsproblems zu gelangen: „The process of practice towards the achievement of new motor habits essentially consists in the gradual success of a search for optimal motor solutions to the appropriate problems. Because of this, practice, when properly undertaken, does not consist in repeating the *means of solution* of a motor problem time after time, but in the *process of solving* this problem again and again by techniques which we changed and perfected from repetition to repetition“ (1986, S. 362).

Leistungsmindernde Veränderungen der Bewegungskoordination indes – z. B. durch Ermüdung – sind zweifellos unter verschiedenen Aspekten unerwünscht. So gilt es, etwa unter dem Wettkampf-Aspekt koordinative Verschlechterungen und einen möglicherweise daraus resultierenden Leistungsabfall zu verhindern oder auch unter dem Aspekt der Stabilität und Kontinuität den Lernprozeß und den Erwerb gut koordinierter Bewegungsmuster nicht durch negative Einflußfaktoren zu verzögern oder gar zu gefährden. Die Crux ist, daß Ermüdung einerseits im Training ein notwendiges Ziel darstellt, um überhaupt Adaptationen als Folge des Wechsels von Belastung – Ermüdung – Erholung auszulösen und einen Trainingseffekt zu erzielen. Ermüdung ist aufgrund dieser biologischen Funktionsweise eine objektiv notwendige physiologische Begleiterscheinung des Trainings und Voraussetzung für sportliche Leistungssteigerungen, da nur wiederholte Belastungen, die zu Ermüdungserscheinungen führen, Überkompensations-Prozesse mit Anpassungswirkungen im Organismus auslösen (z.B. DE MARÉES 1989, S. 487, FINDEISEN 1980, S. 212/ 236 ff., SCHNABEL/ THIEB 1993 u.a.). Andererseits soll eine mögliche negative Beeinflussung der Leistung oder auch des Lernens ausgeschlossen bzw. minimiert werden.

Aufgrund der komplexen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, sowohl von konditionellen und koordinativen Fähigkeiten, als auch von Techniktraining und Konditionstraining herrschte lange Zeit in der Trainingswissenschaft die Meinung vor, daß Techniktraining nur im ausgeruhten, unermüdeten Zustand sinnvoll sei. LETZELTER (1987, S. 73) beispielsweise postuliert wie zahlreiche seiner Kollegen in diesem Rahmen: „Techniktraining erlaubt keine vorherige Ermüdung, weil nur im ausgeruhten Zustand das optimale Zusammenspiel der einzelnen Muskelgruppen im Sinne der intra- und intermuskulären Koordination möglich ist.“ Eine derartige Lehrmeinung, auf die zu einem späteren Zeitpunkt noch genauer eingegangen wird, hat dementsprechende Konsequenzen nicht nur für die Gestaltung des Techniktrainings und das Neulernen von Bewegungen, sondern auch auf die zeitliche Gestaltung des Trainingsprozesses und die Verteilung der Trainingsinhalte sowohl bei der kurz- als auch bei der mittelfristigen Trainingsplanung.

Zwar sind koordinative Veränderungen oder Störungen nicht immer so eklatant wie beispielsweise bei den Olympischen Spielen 1984 in Los Angeles, als die Schweizer Marathonläuferin Gaby Andersen-Schiess nur noch ins Ziel torkeln konnte oder beim Ironman 1997 in Hawaii, als beim Kampf um Platz vier Sian Welch (Canada) und Wendy Ingraham (USA) nur noch ins Ziel kriechen konnten. Insgesamt gesehen ist Ermüdung aber ein potentieller Einflußfaktor auf die motorische Koordination und eine wichtige Größe der Trainingssteuerung.

Im folgenden soll nun zunächst auf den Begriff der Koordination und einige aktuelle Modelle zur Bewegungskoordination eingegangen werden. Im Anschluß daran soll der Begriff der Ermüdung näher beleuchtet und der Kenntnisstand zu Theorien der Ermüdung dargelegt werden.

Zum Begriff der Bewegungskoordination und den entsprechenden Theorien

„The first clear biomechanical distinction between the motor apparatus in man and the higher animals and any artificial self-controlling devices, as I have repeatedly emphasized, lies in the enormous number (which often reaches three figures) of *degrees of freedom* which it can attain, both in respect to the kinematics of the multiple linkages of its freely jointed kinematic chains, and to the elasticity due to the resilience of their connections – the muscles“ (BERNSTEIN 1986, S. 354). Entsprechend der

biomechanischen Komplexität des bewegten Systems Mensch und der Vielzahl an Freiheitsgraden definiert BERNSTEIN die Bewegungskoordination als allmähliches Meistern dieser Freiheitsgrade, so daß ein kontrollierbares System entsteht. „The co-ordination of a movement is the *process of mastering redundant degrees of freedom* of the moving organ, in other words its conversion to a controllable system. More briefly, co-ordination is the *organization of the control* of the motor apparatus“ (1986, S. 355).

Auch BEEK schickt seiner Definition von Bewegung Überlegungen zum Problem der Freiheitsgrade voraus. Er schätzt, daß der menschliche Bewegungsapparat aus nicht weniger als 100 Freiheitsgraden besteht und damit wohl als komplexes System gelten darf. „A system composed of such a large number of degrees of freedom is, both technically and intuitively, referred to as a *complex system*. Movement coordination is the art of establishing soft-molded linkages across these many degrees of freedom, which is to say that a biokinematic system can be assembled temporarily to achieve a particular task goal from whatever neural and skeletomuscular components are appropriate“ (1989, S.2).

KELSO UND KOLLEGEN (KELSO 1994, KELSO & SCHÖNER 1988 oder SCHÖNER ET AL 1992) nehmen sogenannte „self-organized coordination dynamics“ als Grundlage für die Bewegungskoordination an. Ihre Vorstellung „is based on the central hypothesis that, in order to achieve coordination, the central nervous system (CNS) assembles dynamics, that is, equations of motion that govern its coordination activity. These are not the biochemical dynamics of the moving masses but rather abstract dynamics expressing the coordination tendencies of the CNS. Such dynamics can be concretely modeled in terms of collective variables that capture the abstract nature of the coordinated movement“ (1992, S. 30).

ATKESON (1989, S.159) schließt sich in seiner Sichtweise von Koordination HOLLERBACH (1982) an: „Motor control may be viewed as a series of transformations (kinematic or dynamic transformations, Ergänzung durch die Autorin) from a specified behavioral objective to a plan specifying the desired mechanical output of the motor apparatus and finally to a pattern of activation of the muscles.“

Koordinierte Bewegungen charakterisieren beispielsweise FITCH ET AL wie folgt: „Coordinated movements characteristically exhibit a fixed relationship among variables of the system but allow the variables to assume different absolute values. We say that

coordinated movements exhibit relational (sometimes called structural) invariance over metrical change“ (1982, S. 272).

Alternativ zu dieser kleinen Auswahl an Definitionen aus dem englischen Sprachraum, die jeweils eng verbunden sind mit den unterschiedlichen Konzepten der Autoren, definiert beispielsweise RÖTHIG (1992, S. 82) die Koordination wie folgt: „Unter Bewegungskoordination wird die zeitliche, räumliche und kraftmäßige Steuerung einer Einzelbewegung oder komplexer Bewegungsvollzüge verstanden, die entsprechend sensorisch vermittelter Vorgaben oder Ziele zustande kommen“. Die physiologische Perspektive wird in der sportmedizinischen Definition der Koordination betont, die sie als „das Zusammenwirken von Zentralnervensystem und Skelettmuskulatur innerhalb eines gezielten Bewegungsablaufes“ (HOLLMANN 1980, S. 243) definiert. Dabei wird zwischen der „intra- und intermuskulären“ Koordination unterschieden. Erstere bezieht sich auf „das Zusammenwirken von Nerv und Muskel in einem Muskel“, während letztere „das Zusammenwirken von verschiedenen (z.B. agonistischen und antagonistischen) Muskeln“ (Röthig 1992, S.251, vgl. auch Schnabel/Thieß 1993, S.471) determiniert. Der für die Sport-, Trainings- und Lehrpraxis wichtige Aspekt, wie sich Koordination im Bewegungsvollzug äußert, wird in folgende Definition (ANSKEL 1991, S. 37) mit einbezogen: „coordination“ sei „1. Harmonious movement of independent body parts. 2. In regard to motor control, the relationship among movement variables (the potentially free variables) that constrain them into a behavioral unit“. „In der Sportpraxis wird die Bewegungskoordination in der Zusammenordnung von Bewegungsphasen (Phasenstruktur) oder Teilbewegungen sichtbar. Sie kann anhand bestimmter Bewegungsmerkmale (Bewegungskombination, Bewegungskopplung, Phasenverschmelzung) beschrieben und präziser mit Hilfe sportmotorischer Tests oder auch biomechanischer Methoden (z.B. Kinemetrie, Dynamometrie) erfaßt werden“ (RÖTHIG 1992, S.83).

Die Theorien zur Bewegungskoordination sind eng verquickt mit den theoretischen Ansätzen zum motorischen Lernen. Obwohl sich Forscher seit mehr als hundert Jahren mit „motor skills“ beschäftigen (vgl. ADAMS 1987), ist es bisher noch nicht gelungen eine einheitliche, allgemein anerkannte Theorie zu bilden. So stehen sich seit Ende der 70-er Jahre zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen gegenüber (MEIJER & ROTH 1988): der sog. „motor approach“ und der „action approach“. Inhaltlich unterscheiden

sich die beiden Ansätze hauptsächlich darin, ob zentrale Bewegungsprogramme oder ähnliche Strukturen angenommen werden, und inwieweit diese an der Bewegungssteuerung beteiligt sind. Die Repräsentanten des „motor approach“ (z.B. STELMACH, SCHMIDT, ZIMMER, vgl. MEIJER & ROTH 1988) vertreten den Hierarchiegedanken, d.h. sie gehen von der Existenz einer zentralen Struktur und deren maßgeblicher Beteiligung an der Bewegungssteuerung aus. Charakteristisch für diese Richtung sind Konstrukte wie „Pläne“, „Programme“, „Schemata“ und die zentrale Bedeutung der internen Repräsentation. Die Vertreter des „action approach“ (z.B. BERNSTEIN, TURVEY, KELSO, KUGLER, REED, vgl. dazu MEIJER & ROTH 1988, SINGER 1985, WULF 1994, ROTH 1991 u.a.) hingegen stellen die Notwendigkeit von Programmen generell in Frage. Sie nehmen heterarchische, dynamische, sich selbstorganisierende Systeme an.

Die zugrundeliegenden divergierenden Vorstellungen zur Kontrolle von Bewegungen als „open-loop“- versus „closed-loop“-Kontrolle schienen sich bis zur Entwicklung der Schema-Theorie (SCHMIDT 1975) gegenseitig auszuschließen. Heute werden sie allerdings nicht mehr als konkurrierende Alternativen gesehen, sondern als Erklärungsmodelle mit einem spezifischen Gültigkeitsbereich herangezogen. So dient das „closed-loop“-Modell im allgemeinen für die Erklärung langsamer Bewegungen ohne Zeitdruck und das „open-loop“-Modell für die Deutung schneller Bewegungen unter Zeitdruck (vgl. ROCKMANN-RÜGER 1991). Beide Aspekte vereinen die Schematheorien oder auch sogenannten „mixed approaches“.

Zur Open-loop versus Closed-loop-Kontrolle

Die sogenannten „closed-loop“-Modelle gehen davon aus, daß sinnvolle Bewegungen und eine zielgerichtete Bewegungsregulation ohne peripheres Feedback nicht möglich sind. Bewegungsbegleitende und resultatsbezogene sensorische Informationen dienen der Istwertbestimmung. Ein Vergleich zwischen diesem Istwert und einem gespeicherten Referenzwert (Sollwert) ermöglicht dann die Bewegungsregulation auf der Basis eventueller Diskrepanzen zwischen der rückgekoppelten Information und dem Sollwert. Von zentraler Bedeutung für diese Modelle ist jedenfalls der Mechanismus des Ist-Sollwert-Vergleichs. Unterstützung für ihre Annahmen beziehen Closed-loop-Theorien vor allem aus Untersuchungen, in denen das periphere Feedback manipuliert

wurde. Aus der „Abhängigkeit motorischer Leistungen von dem zur Verfügung stehenden Feedback wird auf die besondere Bedeutung sensorischer Informationen für die Kontrolle von Bewegungen geschlossen“ (WULF 1994). Ein Vertreter dieser Richtung, der SINGER (1985) u.a. zufolge initiiierend wirkte, eine rege Forschungsarbeit auslöste und damit erheblichen Einfluß auf die Entwicklung der Motorikforschung nahm, ist ADAMS mit seiner 1968 im *Psychological Bulletin* und dann 1971 im *Journal of Motor Behavior* veröffentlichten „Closed-Loop Theory of Motor Learning“ (zur Closed-Loop Theory von ADAMS s. z.B. ADAMS 1971 oder SINGER 1985 oder WULF 1994). Weitere Vertreter dieser Regelkreismodelle (der Begriff des „geschlossenen Regelkreises“ wird in der Kybernetik häufig für Geräte oder Verhaltensweisen verwendet, die anscheinend selbstregulierend arbeiten) sind beispielsweise ANOKHIN (1969), BERNSTEIN (1967), SOKOLOV (1969), GREENWALD (1970), SMITH (1972) oder UNGERER (1977) (vgl. hierzu MEIJER & ROTH 1988, SINGER 1985 oder WULF 1994).

Den „closed-loop“-Theorien stehen die sogenannten „open-loop“-Modelle gegenüber. Die Vertreter dieser Richtung, wie beispielsweise KEELE (1968), SCHMIDT (1975) oder HENRY (1960) postulieren die Existenz zentral gespeicherter motorischer Programme zur Initiierung und Steuerung von Bewegungen. Generell können dieser Ansicht zufolge Bewegungen auch ohne periphere Rückmeldungen („open-loop“) gesteuert werden. Interne und/ oder externe Rückmeldungen haben ihre Funktion nur in der Initialisierung der Bewegung (richtige Programmauswahl bezogen auf die konkrete Situation), in der Kontrolle der Bewegungen (Efferenzkopien zur Ausführungsüberwachung) und in der Feinanpassung (Aktivierung des Alpha- und Gamma-Systems). Wegweisend für die Weiterentwicklung in der Motorikforschung war die Veröffentlichung von SCHMIDTS Schematheorie 1975.

Zur Theorie Generalisierter Motorischer Programme (SCHMIDT)

Das Programm-Konzept SCHMIDTS ist wie gesagt dem „motor approach“ zuzuordnen, für den das motorische Programm als interne Repräsentation von zentraler Bedeutung ist. Obgleich die Existenz motorischer Programme nicht direkt bewiesen ist (Überblick/ Literaturhinweise zur Kontroverse „Für und Wider Programme“ s. ADAMS 1971, WULF 1994 oder 1992), gibt es nach SCHMIDT (1982, S.227) drei Gründe, die für die Annahme von Programmen sprechen: 1. Zumindest bei ballistischen Bewegungen sind Feedback-

Prozesse zu langsam. Die Bewegung ist bereits beendet, bevor die Information ankommt. „Some central structure seems to be handling the details of the movement in the meantime“ (ebd.). 2. Die Reaktions- oder Latenzzeit (die Zeit vom Startsignal bis zur Bewegungsinitiierung) wächst mit der Komplexität und Dauer der auszuführenden Bewegungen an. Folglich müssen die Bewegungen irgendwie im Vorhinein geplant werden. 3. Bewegungen sind auch ohne peripheres Feedback möglich, wie Deafferentierungsstudien, die Feedback unterbinden, bewiesen haben.

Das Programm-Konzept SCHMIDTS unterscheidet sich in wesentlichen Punkten von den klassischen Programmtheorien. Für SCHMIDT kann heute nicht mehr die Frage sein, ob Feedback bei der Kontrolle von Bewegungen involviert ist oder nicht: „There is considerable evidence for a central open-loop mechanism, structured before the movement is initiated, which serves to organize limb movements in coordinated actions. Yet substantial evidence also suggests that feedback from the responding limbs can, through a variety of mechanisms, modify the movement in various ways [...] This large body of evidence suggests a centrally organized structure that is capable of handling most of the details of the actions, but that is also very sensitive to response-produced sensory information from a variety of sources. One way to view this blending of open- and closed-loop functioning is to consider a hierarchical control, where higher order open-loop control structure has under it a set of closed-loop processes that ensure the movement's intended goal in the face of various perturbations“. Damit wird angenommen, daß motorische Programme als strukturierte motorische Kommandos vor Bewegungsbeginn bereitgestellt werden, und daß ein open-loop-Mechanismus ergänzt wird durch closed-loop-Prozesse auf niederen Ebenen des ZNS. Feedback werde benötigt (a) vor dem Bewegungsstart als Information über die Ausgangsbedingungen oder um den „spinal apparatus“ „einzustimmen“, (b) während der Bewegung entweder als „Überwachungsinstanz“ für die Fehlerentdeckung oder direkt zur Bewegungskontrolle auf der Basis von Reflexen, und (c) nach der Bewegung, zur Ergebnisbewertung oder als wichtiger Bestandteil des motorischen Lernens (SCHMIDT 1982, S. 228-232 und 265). Diese Ideen veranlaßten Schmidt dazu, die frühere Definition eines motorischen Programms zu modifizieren: „The motor program is an abstract representation of action that when activated produces movement without regard to sensory information indicating errors in selection. Once the program has been

initiated, the pattern of action is carried out for at least one RT (reaction time, Ergänzung durch die Autorin) even if the environmental information indicates that an error in selection has been made. Yet during the programm's execution, countless corrections for minor errors can be executed that serve to ensure that the movement is carried out faithfully" (SCHMIDT 1982, S. 237).

Obwohl es SCHMIDT mit seiner Schematheorie gelungen ist, zwei ehemals diametral entgegengesetzte Ansätze ("closed-loop"- und die „open-loop“-Perspektiven) zu integrieren, blieben trotz der erwähnten Konzeptmodifikationen einige Kritikpunkte bestehen: Das war einerseits das sogenannte „storage problem“ und andererseits das „novelty problem“. Die Annahme einer 1:1-Speicherung, d.h. daß für jede Bewegung ein eigenes separates motorisches Programm existieren würde, erscheint in Anbetracht der vielen Bewegungsmöglichkeiten und Freiheitsgrade des komplexen Systems Mensch unwahrscheinlich, wenn nicht sogar unmöglich. Allein für die Sprechmotorik müßten schätzungsweise ungefähr 100.000 Programme gespeichert werden (MAC NEILAGE 1970, erwähnt in SCHMIDT 1982, S. 238) und nahezu unzählige Programme für die menschlichen Bewegungen. „But when I consider the number of ways in which we move other than speech, and the interaction of previous states and following states of these movements, there would have to be a nearly countless number of programs in long-term memory“ (SCHMIDT 1982, S. 238). Einen weiteren Schwachpunkt der frühen Ideen sieht SCHMIDT darin, daß das Konzept des motorischen Programms nicht erklären konnte, wie neue Bewegungen zustande kommen. Gerade dieser Aspekt ist aber im Sport von zentraler Bedeutung.

Diese zwei wichtigen Schwachstellen und Überlegungen führten SCHMIDT zu einem neuen Konzept: die Idee generalisierter motorischer Programme. Anstelle der Programmspeicherung für jede Bewegungsvariation nimmt SCHMIDT an, daß es motorische Programme (zentral gespeicherte interne Repräsentationen) für bestimmte Bewegungsklassen (z.B. Gehen, Laufen, Werfen etc.) gibt. Erst kurz vor Bewegungsbeginn wird ein solches GMP (Generalisiertes Motorisches Programm) durch die Eingabe aktueller Parameter genauer definiert und die situative Anpassung dieser grundlegenden Bewegungsmuster ermöglicht. „The idea of a generalized motor program is that a motor program for a particular class of action is stored in memory and that a unique pattern of activity will result if the program is executed. However in order