

Bewegungs- und Technikkernen im Rudern aus neurophysiologischer Perspektive

Die meisten Bewegungsabläufe die von Menschen ausgeübt werden, bzw. prinzipiell ausgeübt werden können, sind nicht natürlichen Ursprungs (im Gegensatz zu angeborenen Bewegungsmustern wie z.B. das Gehen und Laufen). Das Erlernen eines solchen Bewegungsmusters erfordert, je nach Komplexitätsgrad und individuellen Voraussetzungen (motorische Intelligenz, Körperbau, Beweglichkeit, konditionell-muskulärer Istzustand, Alter), einen m.o.w. aufwendigen und langen Lernprozess. Am Anfang besteht eine gewisse aber ungenaue Vorstellung darüber wie ein Bewegungsmuster durchzuführen ist, aufgrund derer versucht wird die Bewegung umzusetzen. Durch Ausprobieren (Versuch und Irrtum) und ei-

Zusammenspiel verschiedener Hirnstrukturen: Prä- und primärmotorische Areale im hinteren frontalen Cortex (Grosshirnrinde), somatosensorische Areale im vorderen parietalen Cortex, motorische Areale des Gyrus cinguli, Kleinhirn, Basalganglien, Thalamus, Hirnstamm (u.a. Wise & Shadmehr 2002). Obwohl es eine sehr grosse Zahl von Studien gibt die sich damit befassen wie das Gehirn Bewegungsabläufe erzeugt, lernt und steuert, sind viele Fragen noch ungeklärt. Dies liegt u.a. daran, dass die am Menschen anwendbaren neurophysiologischen Untersuchungsmethoden ungenau und nur eingeschränkt anwendbar sind. Beispiele sind die Läsionsforschung (gestützt auf meist pathologische Ausfälle von Hirnarealen), an bildgebenden Verfahren vor-

und Körperbewegungen starke Bewegungsartefakte erzeugen können, oder, wie beim fMRI, der Kopf fixiert sein muss. Soweit dieser methodische Exkurs und hin zum Thema Rudern.

Ein Anfänger braucht zuerst eine Vorstellung wie die Ruderbewegung abläuft, anhand derer er/sie versucht diese durch eine zeitlich und räumlich koordinierte Bewegung der beteiligten Körperteile umzusetzen. Dies geschieht i.d.R. unter Anleitung (Trainer, erfahrene Ruderer) oder auch nur gestützt auf Beobachtung (Trainerkinder, die oft im Motorboot mitfahren sind dafür prädestiniert). Von elementarer Bedeutung für das motorische Lernen sind Rückmeldungen (Feedback) über Erfolg oder Misserfolg der durchgeführten Bewegung. D.h. ein Bewegungsablauf oder eine Teilbewegung (Bsp. Rudern ohne Beineinsatz) wird durchgeführt oder versucht durchzuführen und man erhält ein Feedback über die Qualität der Bewegungsausführung. Das Feedback kommt von den körpereigenen Sinnessystemen zur Bewegungswahrnehmung sowie visuellen und akustischen Informationen, oder auch zusätzlich vom Trainer. Durch das Trainerfeedback wird die Bewegungsausführung qualitativ (gut bis schlecht) bewertet und mit der eigenen Wahrnehmung verknüpft (und diese damit auch gewissermaßen kalibriert).

Das körpereigene Feedback liefert einen quantitativen Sollwert-Istwert-Vergleich, d.h. den Grad der Abweichung zwischen dem geplanten und dem tatsächlich ausgeführten Bewegungsablauf. Z.B. verkantet der Anfänger im Einer ein Blatt beim Durchzug kippt (oder kentert) das Boot durch die asymmetrischen Kräfte an beiden Blättern. Ein Trainer kann dies beobachten und Anweisungen zur korrekten Blattstellung geben. Der Ruderer nimmt durch die körpereigenen Sinnessysteme eine Gewichtsverlagerung und Haltungsänderungen wahr: Die (geplant) zur Erzeugung von Vortrieb aufgebrauchten Kräfte werden durch die fehlerhafte Blattstellung z.T. umgeleitet und verursachen das nicht beabsichtigte Kippen des Bootes.

Die körpereigene Bewegungswahrnehmung stützt sich auf eine Vielzahl unterschiedlicher Sinnessysteme die, je nach Bewegungsmuster, in unter-

ner Vielzahl von Rückmeldungen (Feedback) über Erfolg/Misserfolg der Bewegungsausführung wird ein Bewegungsprogramm oder 'forward model' entwickelt und zunehmend verbessert (u.a. Wolpert et al. 1995, Desmurget & Grafton 2000). Mit zunehmender Optimierung wird auch die Bewegungsvorstellung verbessert, d.h. die Erfahrung wie sich eine gute Bewegungsausführung "anfühlt" setzt eine entsprechend gute Bewegungsausführung voraus. Im Idealfall/Endzustand repräsentiert dieses 'forward model' die Bewegung und kann sie präzise planen und ausführen, Korrekturen sind dann nur noch durch unvorhersehbare Störeinflüsse von außen (Bsp. plötzliche Windböen, Treibgut) nötig. Entwicklung und Abspeicherung des 'forward models' geschieht im

alle dem die funktionelle Kernspintomografie (functional magnetic resonance imaging/fMRI), an elektrophysiologischen Verfahren die vorübergehende Implantierung von Elektroden ins Gehirn (meist zur Epilepsiediagnostik, als Nebenprodukt können damit aber auch andere neurophysiologische Untersuchungen durchgeführt werden), und vor allem die nichtinvasive Messung hirnelektrischer Aktivität mit Elektroden von der Schädeloberfläche (Elektroenzephalogramm/EEG bzw. die darin enthaltenen und wesentlich aussagekräftigeren ereigniskorrelierten Hirnpotentiale bzw. event-related potentials/ERPs). Aus methodischen Gründen lassen sich diese Messverfahren i.d.R. nicht zur Untersuchung komplexer Bewegungsabläufe einsetzen da Kopf-



Fotos: Fritsch

schiedlichem Ausmaß von Bedeutung sind. Neben den äusseren Sinnessystemen (Sehen, Hören, Tastsinn) ist die kinästhetische Wahrnehmung von besonderer Bedeutung. Diese stützt sich auf Informationen vom Vestibularorgan im Innenohr (Lage, Drehung und Beschleunigung des Kopfes), der Muskelspindeln (diese messen Muskellänge und Geschwindigkeit der Längenänderung), Golgi-Sehnenorgane (Messung der Muskelspannung über die Dehnung der Sehne), und Gelenkrezeptoren (Messung von Gelenkstellung und Winkelgeschwindigkeit). Für das Rudern ist diese kinästhetische Wahrnehmung von elementarer Bedeutung. Jede Bewegungsausführung produziert eine Reihe dieser sensorischen Informationen die unter Beteiligung verschiedener Hirnstrukturen letztendlich im sensorischen Cortex (vorderer parietaler Cortex) verarbeitet werden. Wesentlich ist dabei der Vergleich zwischen geplanter Bewegung, des daraus erwarteten, und des tatsächlichen sensorischen Feedbacks. Dabei ist es wichtig unterscheiden zu können, ob das sensorische Feedback aus einer aktiven (selbstgenerierten) oder passiven (von außen erzeugten) Bewegung stammt. Z.B. der Doppelzweierpartner zieht plötzlich stärker durch, das Boot wird schneller, der eigene Durchzug wird dadurch ebenfalls schneller ohne dass man selbst den Kräfteinsatz erhöht hat (die Muskelspindeln messen eine schnellere Kontraktion, die Sehnenrezeptoren eine höhere Winkelgeschwindigkeit in den beteiligten Gelenken, die Sehnenrezeptoren jedoch eine geringere Spannung).

Mit diesem Wahrnehmungsproblem, der Unterscheidung aktiver und passiver Bewegung, setzten sich, unabhängig voneinander, v. Holst & Mittelstädt (1950) sowie Sperry (1950) auseinander. Mit ihrem "Reafferenzprinzip" entwickelten v. Holst & Mittelstädt das klassische kybernetische Modell zur Kontrolle von Bewegungsabläufen und Orientierung des Organismus in der bewegten und unbewegten Umwelt. Mittlerweile sind diese Modelle durch eine Vielzahl experimenteller Studien bestätigt worden (Crapse & Sommer 2008). Ein wesentlicher Bestandteil des Modells besteht im Sollwert-Istwert-Vergleich: Das aus einer Bewegung erwartete sensorische Feedback (Sollwert) wird mit dem tatsächlich erhaltenen Feedback (Istwert) verrechnet. Dazu werden die aus der Bewegungsausführung resultierenden sensorischen Rückmeldungen (Reafferenzen) mit einer "Kopie" (Efferenzko-

pie) des Signals verglichen, das vom Gehirn an die Muskulatur geschickt wird um eine Bewegung durchzuführen. Besteht eine Differenz zwischen diesen beiden Signalen können dadurch passive Bewegungsanteile identifiziert werden. V. Holst & Mittelstädt zeigten dies am Beispiel des optischen Systems. Wandert ein Objekt (z.B. ein Auto) über die Netzhaut des Auges (retinale Bildverschiebung) so kann dies drei Ursachen haben: 1. Das Auto fährt, eine Augenbewegung (horizontale Bewegung des Augapfels oder Kopf/Körperdrehung) findet nicht statt. 2. Das Auto steht, es findet eine Augenbewegung statt. 3. Auto und Auge bewegen sich. Wird das Auge aktiv bewegt wird als sensorische Konsequenz das Wandern eines (stehenden) Objektes über die Retina erwartet. Aus diesem Vergleich Objektbewegung auf der Netzhaut - Efferenzkopie der Augenbewegung (bzw. Kopf/Körperbewegung) kann errechnet werden ob sich das Objekt bewegt oder nicht.

Sollwert-Istwert-Vergleich

Ein entsprechendes Beispiel aus dem Rudern wäre der aufgezwungene schnellere Durchzug durch den höheren Kräfteinsatz des Zweierpartners: Die wahrgenommene höhere Durchzugsgeschwindigkeit weicht von der durch die Höhe des eigenen Kräfteinsatzes erwarteten Durchzugsgeschwindigkeit ab. Dieser Sollwert-Istwert-Vergleich ist auch Grundlage für die Erkennung von Fehlern als Voraussetzung für eine Korrekturbewegung, sowohl im motorischen Lernprozess als auch als Reaktion auf externe Störfaktoren (z.B. die Windböe). Zu beachten ist dabei, dass gemachte Fehler nicht rückgängig gemacht werden können. Es kann auf die Auswirkungen des Fehlers/des Störfaktors im Sinne einer Schadensbegrenzung reagiert werden (z.B. eine Gewichtsverlagerung nach einem "Krebs") sowie eine Wiederholung des Fehlers im nächsten Ruderschlag vermieden werden.

Bewegungskorrekturen werden dazu herangezogen, das Bewegungsprogramm/'forward model' im motorischen Gedächtnis zu verbessern. Eigene elektrophysiologische Arbeiten zum visuomotorischen Lernen unterstützen dieses Lernmodell (Hill & Raab 2005, Hill 2009, 2014). ERP-Messungen wurden bei verschiedenen Trackingaufgaben eingesetzt, dabei bewegte sich ein Zielobjekt (Target) zufallsgesteuert über einen Computermonitor und der Proband versuchte mit einem joystick- oder mausgesteuerten Cursor den Ab-

stand zum Target so gering wie möglich zu halten. Im Lernverlauf zeigte sich eine größere und/oder früher einsetzende (je nach Aufgabentyp) Aktivität über motorischen Cortexarealen als Korrelat einer verbesserten Reaktion des Probanden auf die (computergesteuerten) Richtungsänderungen des Targets. In Folge einer verbesserten Fehlerkorrektur durch den Probanden nahm die Aktivität im Zeitbereich 150-300 ms nach der erfolgreichen Korrektur über dem posterioren parietalen Cortex (PPC) ab. Im PPC laufen verschiedene Informationen zusammen und werden verarbeitet. Die visuelle Information über die erfolgreiche Fehlerkorrektur benötigt relativ viel Zeit. Die Verringerung des Target-Cursor Abstands muss am Monitor über den Zeitverlauf erkennbar sein. Dazu kommt die Latenzzeit im visuellen System von der Netzhaut zum visuellen Cortex (ca. 100 ms) und weiter zum PPC wo, nach diesem Modell, die visuelle Information mit der Efferenzkopie des motorischen Signals und der kinästhetischen Wahrnehmung



verrechnet wird. Als Folge wird diese Information im motorischen Cortex zur Optimierung des 'forward models' der Auge-Joystick/Maus-Hand Koordination verarbeitet. Darauf deutete eine Aktivierungsänderung im Lernverlauf hin, die ca. 100 ms nach einem Korrekturvorgang parietal einsetzte, und im Verlauf der nächsten 500 ms zu den frontalen motorischen Arealen wanderte.

Motorisches Lernen im Rudern beschränkt sich nicht auf die Entwicklung vom Anfänger bis zur Beherrschung von Skull- und Riementechnik in den verschiedenen Bootsgattungen sondern die Interaktionen im Mannschaftsboot erfordern weitere Lern- und Anpassungsprozesse. Durch die individuellen anthropometrischen und muskelphyologischen Voraussetzungen kann da-

von ausgegangen werden, dass jede/r Ruderer/in seine optimale Technik hat, was sich u.a. schon an den unterschiedlichen Kraft-Zeit-Verläufen erkennen lässt ("Handschrift des Ruderers", Nolte 1981). Weiterhin ist es naheliegend, dass das Rudern in Mannschaftsbooten effektiver ist wenn die Rudertechniken ähnlich sind (bzw. genauer die durch die Rudertechnik erzeugten Kräfte). Dabei ist zwischen symmetrischen (Doppelzweier und -vierer) und asymmetrischen Bootsgattungen (vor allem die Riemenzweier) zu unterscheiden. Entscheidend ist, dass die aufgebrachten Kräfte in Vortrieb umgesetzt werden und nicht in zusätzliche Bootsbewegungen (gieren, rollen) bzw. in Kompensationsbewegungen um diese zu verhindern. Das Rollen des Bootes kann sowohl durch unterschiedliche seitliche Gewichtsverlagerungen der Ruderer entstehen, sowie durch nicht zusammenpassende Zughöhen und Anlagewinkel der Blätter. Ein Trainer kann dies m.o.w. gut erkennen, aber durch die direktere Wahrnehmung ist es von Vorteil wenn die Ruderer diese Fehlerquellen bewusst erkennen können um sie durch technische Maßnahmen (Bootseinstellung) zu beseitigen. Dies setzt allerdings eine entsprechend geschulte Bewegungswahrnehmung voraus. Individuelle Unterschiede in der Ruderbewegung (vor allem im Riemenboot), die zu Unterschieden in der seitlichen Gewichtsverlagerung führen erfordern dagegen eine Angleichung in der Gewichtsverlagerung.

Ein weiterer Fall in dem bewusst der Bewegungsablauf variiert werden kann ist der Geradeauslauf im Riemenzweier. Bei identischen Kraft-Zeit-Verläufen giert das Boot, der Schlagmann kann die Seitwärtsbewegung des Hecks als visuelles Feedback nutzen um seinen Kraftverlauf zu modifizieren (schnellerer Kraftanstieg und früheres Maximum als der Bugrunderer). Im Unterschied zum Spezialfall Riemenzweier erfordern die Skullboote und (italienisch geriggerten) Vierer und Achter weitgehend identische Kraft-Zeit-Verläufe, um zu verhindern, dass negative muskelphysiologische und hydrodynamische Effekte entstehen. Angleichungen in den Kraft-Zeit-Verläufen in (aus Spitzenrunderern) neu kombinierten Mannschaften zeigen sich bereits in der ersten Trainingsfahrt, wobei dieser Prozess durch hohe Krafteinsätze eindeutig begünstigt wird bzw. bei niedrigen Krafteinsätzen nicht stattfindet (Hill 1995, 2002). Ob man in diesem Fall bei einer einzigen Trainingsfahrt

schon von einem motorischen Lernprozess sprechen kann oder ob es sich um einen Anpassungsprozess handelt ist fraglich, über einen längeren Zeitraum betrachtet ist jedoch ein Lerneffekt zu erwarten. Unklar ist auch, ob es sich bei einer Anpassung in den Kraft-Zeit-Verläufen um einen bewussten (kognitiv kontrollierten) Vorgang handelt oder um einen unbewussten (impliziten). Dies hängt sicherlich auch vom Ausmaß der Differenz ab und wann die bewusste Wahrnehmungsschwelle überschritten wird. Jedoch sind beim motorischen Lernen implizite Lernprozesse von wesentlicher Bedeutung. Gelenkbewegungen können zwar bewusst gesteuert werden, aber die Feinheiten, z.B. welche Muskelfasern bzw. motorischen Einheiten von welchen der beteiligten Muskel dazu wie stark aktiviert werden müssen, sind der bewussten Kontrolle nicht zugänglich und würden durch die Vielzahl der parallel zu verarbeitenden Informationen die bewusste Verarbeitungskapazität des Gehirns auch überfordern.

„ Der Unterschied zwischen Platz 1 und 6 im Achterfinale in London 2012 wäre biomechanisch nicht messbar gewesen “

Möglichkeiten zur Fehlererkennung und -korrektur

Je nach Bewegungserfahrung der Ruderer und ihrer Fähigkeit Fehler zu erkennen, oder ob sich Fehler von außen (durch den Trainer) überhaupt erkennen lassen, werden fehlerhafte Bewegungsabläufe (individuell und in der mannschaftlichen Koordination) nicht erkannt und korrigiert. Hier können prinzipiell zusätzliche Maßnahmen weiterhelfen. Biomechanische Messungen können eingesetzt werden um Fehler zu erkennen und darauf aufbauend objektive (externe) Feedbackmaßnahmen (visuelles oder auditorisches Feedback, oder auch Feedback durch den Trainer) im Lernprozess eingesetzt werden. Dabei ist zu beachten, dass es sich um reale Fehler handelt (und nicht um "Fehler" die sich aus einer Abweichung von einer als "ideal" definierten Rudertechnik ergeben), deren Beseiti-

gung einen messbaren Zuwachs an Bootsgeschwindigkeit bei konstantem physiologischem Arbeitsaufwand bringt, und wie Feedbackanwendung und die Instruktion in Anwendung umgesetzt werden. Der experimentelle Nachweis einer verbesserten Rudertechnik im Spitzenbereich ist wegen den Messfehlern der verwendeten Geräte nicht trivial. Dehnungsmessstreifen, wie sie zur Kraftmessung eingesetzt werden, haben typischerweise eine Fehlertoleranz von mindestens 1% (www.hbm.com), dazu kommen die Fehlertoleranzen in der Messkette (Elektronik, Digitalisierung, Auswertung, Kalibrierung etc.). Ebenfalls fehlerbehaftet sind die physiologischen Messverfahren wie Spiroergometrie, EKG, Laktatmessung (Gerätefehler, Anwendungsfehler, Variationen im Zusammenhang physiologischer Prozess- zu messende Größe). Ein Messfehler von 1% mag zwar als gering erscheinen, in einem Achterrennen entspricht dies aber ca. 3,5 s, d.h. der Unterschied zwischen Platz 1 und 6 im Achterfinale in London 2012 (3,12 s) wäre biomechanisch nicht messbar gewesen.

Weitere Möglichkeiten zur Fehlererkennung und -korrektur bestehen darin, die Wahrnehmung der Ruderer mit subjektiven Methoden zu explorieren und Fehler bewusst zu machen (z.B. Lippens 1988). Am Beispiel eines Juniorinnen Zweier-ohne zeigten Sève et al. (2013), wie mit einer Kombination von Video- und Tonaufzeichnungen und biomechanischen Messungen mehrere Synchronisationsfehler erkannt wurden, über die beide Ruderinnen vorher unterschiedlicher Ansicht waren. Anhand der Tonaufzeichnungen (Verbalsierungen ihrer Aufmerksamkeitsinhalte) wurde die subjektive Wahrnehmung der Ruderinnen im Interview exploriert. Die Ruderinnen wurden mit den Videoaufzeichnungen ihres Ruderns konfrontiert und zur Kommentierung ihrer Bewegungsausführungen angeleitet (Selbstkonfrontations-Interview). Diese wurden über den Zeitverlauf den biomechanischen Daten zugeordnet. Dabei handelte es sich bei einem der Fehler um eine ungenügende Synchronisation im Einsatz, die besonders im Zweier-ohne deutlich negative Auswirkungen auf die Rennleistung hat (u.a. erhöhter Wasserwiderstand durch das Gieren des Bootes). Bei Spitzenrunderern ist jedoch zu erwarten, dass diese über die entsprechende Bewegungserfahrung verfügen und einen solchen Fehler wahrnehmen und korrigieren.

DR. HOLGER HILL