Eingegangen: 3.5.2016

Klaus Bartonietz

**Die Wahrheit ist immer im Einfachen zu finden,
und nicht in der Vielfältigkeit und Verwirrung der Dinge.**
(Isaac Newton, 1643-1727)

Konzepte der Biomechanik und Bewegungskontrolle

Hintergründe zur Buchbesprechung in *Leistungssport* 4/2016, S. 28-29

Der vorliegende Beitrag stellt eine Ergänzung und Weiterführung zur Buchbesprechung *Bestimmung zentraler Konzepte von Biomechanik und Bewegungskontrolle* der Autoren M. L. Latash und V. M. Zatsiorsky (2015) in der Printausgabe von *Leistungssport* 36/4, S. 28-29, dar. Die Ausführungen der beiden Autoren werden hinsichtlich ihres Anliegens sowie der Konzepte neuromuskulärer Synergien und motorischer Freiheitsgrade, der Gleichgewichtspunkt-Theorie und deren Weiterentwicklung sowie der Theorie und Methode der unkontrollierten Mannigfaltigkeit zur Erforschung von Bewegungskontrollmechanismen vertieft. Auf die Komplexität und Kompliziertheit der bei der Kontrolle von Bewegungen ablaufenden Prozesse wird anhand mehrerer Beispiele hingewiesen. Ausgehend vom Größenprinzip bei der Aktivierung motorischer Einheiten, an dem Latash und Zatsiorsky die Kontrolle motorischer Freiheitsgrade veranschaulichen, werden erweiternd neuere Untersuchungsergebnisse dargelegt und Konsequenzen für das Krafttraining vorgestellt. Die Seitenangaben in Klammern im folgenden Beitrag beziehen sich auf die entsprechenden Stellen in *Biomechanics and Motor Control*.

1. Das Buch

Mark L. Latash und Vladimir M. Zatsiorsky (2015), *Biomechanics and Motor Control – Defining Central Concepts*, Academic Press, 426 Seiten, 161 Abbildungen und eine Tabelle (ISBN Druckausgabe: 9780128003848, ISBN eBook: 9780128005194).

2. Die Autoren

Mark L. Latash, Jahrgang 1953, ist Professor am College of Health and Human Development der Pennsylvania State University und Director des „Motor Control Laboratory“ an dieser Universität. Er studierte von 1970 bis 1976 an der Moskauer Physikalisch-Technischen Hochschule mit Abschlüssen in Physik und in Physik lebender Systeme. Nach verschiedenen Anstellungen an Kliniken und Hochschuleinrichtungen in der UdSSR und den USA (ab 1987) promovierte er 1989 an der Rush-Universität in Illinois zur Dynamik der Regulation willkürlicher Eingelenk-Bewegungen. Seit 1994 ist er an der Pennsylvania State University tätig. Er lehrte zeitweise in zahlreichen Ländern, so in Neuseeland, Schweden, Brasilien, Frankreich, Großbritannien, Polen, Litauen, Ungarn. Neben über 200 Beiträgen in Fachzeitschriften ist er Autor und Mitautor mehrere Lehrbücher (siehe Literaturnachweis). Er gab von 1996 bis 2007 die Zeitschrift „Motor Control“ heraus und ist gegenwärtig in den Redaktionskollegien von „Human Movement Science“, „Journal of Human Kinetics“, „Kinesiology“ und „Motor Control“ vertreten. Das lässt die neurale Seite der Bewegungskontrolle als sein übergreifendes Forschungsthema erkennen mit dem Schwerpunkt motorische Synergien und Bewegungsstörungen.

Vladimir M. Zatsiorsky, Jahrgang 1933, studierte Mathematik und Körpererziehung. Er erlangte die Qualifikation eines Meisters des Sports in Akrobatik, unterrichtete im Geräteturnen am Sportinstitut von Lvov und war 18 Jahre am Lehrstuhl für Trainingsmethodik der Zentralen Sporthochschule in Moskau (GZOLIFK) tätig, u. a. als Leiter des Biomechanik-Labors. Dort erlangte er auch 1968 den sowjetischen Doktorgrad (entspricht der Habilitation). Er war in der Medizinischen Kommission des IOC vertreten (1982 bis 2003) und stand von 1987 bis 1989 dem Allunionsforschungsinstitut für Leistungssport als Direktor vor. 1999 wurde ihm der Doctor honoris causa von der Akademie

für Körpererziehung in Wrocław und 2003 von der Russischen Staatlichen Universität für Körperkultur verliehen. 1991 erhielt er eine Professur an der Pennsylvania State University, die er bis Ende 2015 innehatte. Er unterrichtete auch an den Universitäten von Los Angeles (UCLA) und Calgary. Seit Januar 2016 ist er pensioniert und befindet sich im (Un-)Ruhestand. Deutschen Sportwissenschaftlern und Trainern wurde er durch die Übersetzung seiner 1966 erschienenen Monografie „Die körperlichen Eigenschaften des Sportlers“ (1971 schon in der 2. Aufl. der deutschen Übersetzung) bekannt. „Biomechanische Grundlagen der Ausdauer“ (1987, mit S. J. Aljeshinskiy und N. A. Jakunin), „Biomechanik des menschlichen Bewegungsapparates“ (1984, mit V. M. Aruin und W.N. Selujanow), „Kinematik“ (1998, in Englisch) und „Kinetik der menschlichen Bewegung“ (2002, in Englisch), „Biomechanik der Muskelarbeit“ (2010, mit B. I. Prilutsky, in Englisch) sind neben den über 400 Publikationen in Fachzeitschriften nur einige seiner Bücher, die dem deutschen Leser zugänglich sind. Auf der Grundlage seines breiten sportartspezifischen Forschungshintergrundes hat sich V. M. Zatsiorsky in den vergangenen zwei Jahrzehnten grundlegenden Fragen der Bewegungskontrolle zugewandt.

Die beiden Autoren haben mehr als 20 Jahre Tür an Tür an der Pennsylvania State University am College of Health and Human Development in der Kinesiologie-Abteilung gearbeitet. Mit den Laboren für Biomechanik und Bewegungskontrolle haben sie dort eine renommierte Forschungseinheit geschaffen. Schon 1993 begannen sie, die Ergebnisse ihrer wissenschaftlichen Zusammenarbeit gemeinsam zu publizieren, was sich auch in den Literaturnachweisen des vorliegenden Buches zeigt. Die Autoren unterstreichen, dass sich die dargelegten persönlichen Auffassungen im Laufe mehrerer Jahrzehnte herausgebildet haben – nicht zuletzt auch unter dem Einfluss zahlreicher ungenannt bleibender Kolleginnen und Kollegen sowie in der Arbeit mit ebenso zahlreichen Studenten und Doktoranden. Auf viele der hervorragenden wissenschaftlichen Einzelleistungen wird im Buch verwiesen und sie sind Bestandteil des Literaturverzeichnis zu diesem Beitrag.

3. Das Anliegen

Mit dem Titelzitat zur Buchbesprechung (*Leistungssport*-Heft 36/4, S. 28-29) und zu diesem Beitrag wird exakt die Intention der Autoren beschrieben: Die für Theorie und Praxis des Leistungssports relevanten Wissenschaftsdisziplinen Biomechanik und Motorik/Bewegungskontrolle haben sich in den letzten zwei Jahrzehnten enorm entwickelt, sowohl im Ausmaß der interdisziplinären Forschung, in der Quantität der Veröffentlichungen wie auch in der Tiefe des Erkenntnisgewinnes. Die Forschungsergebnisse mit Querverbindungen zur Biologie, Psychologie, Physik, Medizin, Physiotherapie, zu den Ingenieurwissenschaften gründen sich auf den Fortschritten der Informatik. Dabei konnte es nicht ausbleiben, dass Teile der althergebrachten Terminologie aus den Mutterwissenschaften auf andere Bereiche übertragen wurden, Bedeutungen wurden Wandlungen unterworfen. Wie die Autoren im Vorwort betonen, bildete sich auf diese Art ein Fachjargon heraus, der die Verständigung unter Kollegen erschwert. Das unterstreichen sie anschaulich durch den Titel einer fiktiven Veröffentlichung „Der Reflexanteil an Muskeltonus, Gelenkstabilität und Gelenkmoment bei der Haltungsregulierung“ (S. XI). Jeder der im Titel enthaltenen Begriffe kann in unterschiedlicher Weise benutzt und verstanden werden. Die Autoren führen an, dass schon vor 20 Jahren von elf Begriffsbestimmungen zur „Muskelviskosität“ zehn nicht den SI-Empfehlungen (SI = système international d'unités) entsprachen mit Unterschieden in den Maßeinheiten von mehreren Größenordnungen (S. XII). Daher ist es das Hauptanliegen der Autoren, die wichtigsten in Biomechanik und Bewegungskontrolle verwendeten Begriffe zu bestimmen und auf unzutreffende Bezeichnungen hinzuweisen. Der Ausgangspunkt für dieses Vorhaben kann mindestens bis in das Jahr 1998 zurückverfolgt werden, als sich I. M. Gelfand¹ und M. L. Latash bereits für die Notwendigkeit einer adäquaten Sprache in der Bewegungskontrolle eingesetzt haben (Gelfand & Latash, 1998). Israel M. Gelfand (1913-2009) wird als einer der herausragenden Mathematiker des 20. Jahrhunderts angesehen. Er befasste sich auch mit Problemen der

Mathematikanwendung in Biologie, Neurologie (z. ¹B. Gelfand & Tsetlin, 1966; Samoilov, 2008) und Bewegungswissenschaft (Gelfand, Gurfinkel, Tsetlin & Shik, 1971; Berkinblit, Gelfand & Feldman, 1986).

Um das Anliegen der Autoren zu bekräftigen: Es zeigt sich auch in anderen für den Leistungssport relevanten Bereichen, dass mit der Übertragung von Fachbegriffen auch Definitions- und Erklärungsbedarf entsteht. Als Beispiele sollen gelten (weitere zu klärende Begriffe ließen sich anführen):

- In der sportlichen und klinischen Leistungsdiagnostik wird der Begriff „**Kraftdefizit**“ in vielfacher Weise strapaziert, bei Bewegungen in einzelnen Gelenken, von Gliedmaßen und des gesamten Körpers, im Vergleich zwischen exzentrisch, konzentrisch und isometrisch aufgebrachten Muskelkräften bzw. Kraftmomenten (z. B. Bührle & Schmidtbleicher, 1981; Überblick bei Weineck, 2009). Es gibt ein kontralaterales und bilaterales Kraftdefizit (einen historischen Überblick dazu bei Enoka, 1988: bilaterales Kraftdefizit im Bereich von 5-25 %, am geringsten bei Armmuskeln, am größten bei Kniestreckern; Challis, 1998; Sarabon, Rosker, Fruhmann, Burggraf, Loeffler & Kern, 2013, Mauch & Rist, 2013; Simoneau-Buessinger, Leteneur, Toumi, Dessurne, Gabrielli, Barbier & Jakobi, 2015). Die Bezugswerte können auch durch Elektrostimulation erzeugt werden (Buckthorpe, Pain & Folland, 2013) oder als Reflexantwort (Khodiguan, Cornwell, Lares, DiCaprio & Hawkins, 2003). Ein Kraftdefizit kann auch hervorgerufen werden durch übermäßiges Dehnen (Behm, Bradbury, Haynes, Hodder, Leonard & Paddock, 2006). Ein „bilaterales Defizit“ der Reaktionszeit (Anson & Bird, 1993; Taniguchi, Burle, Vidal et al., 2001) hat möglicherweise einen neuronalen Bezug zum Kraftdefizit (Tsao, Overs, Wu, Galea & Hodges, 2008). Beim „Explosivkraftdefizit“ werden Sprungleistungen verglichen (Strecksprung mit Auftaktbewegung im Vergleich zum Absprung aus statischer Ausgangsstellung: XL Athlete, 2011) oder auch Sprungleistungen mit Leistungen an der Scheibenhantel (Weiß, Fry & Relea, 2002, auf Grundlage von Zatsiorsky, 1995). Ein Kraftdefizit von 10,3 % wurde auch in den *untrainierten Ellenbogenbeugern* im Vergleich der Kraftwerte vor und nach einem ermüdenden Maximalkrafttraining *der Kniestreckler* festgestellt (Šambaher, Aboodarda & Behm, 2016: vermuteter Hintergrund: Modulation der corticospinalen Erregbarkeit). Von einem 10- bis 30- prozentigen Kraftdefizit (Differenz zwischen „Absolutkraft“ und „Maximalkraft“) wird bei den sogenannten „autonom geschützten Reserven“ ausgegangen (Weineck, 2009, S. 371). Bei der Erforschung neuromuskulärer Synergien bei Fingerbewegungen steht ein Kraftdefizit für die verringerte Kraft bei Aktionen mehrerer Finger im Vergleich zur maximalen Kraftentwicklung eines einzelnen Fingers (Li, Latash & Zatsiorsky, 1998; Li, Danion, Latash, Li & Zatsiorsky, 2000; Latash, Scholz & Schöner, 2007, S. 283; Latash & Zatsiorsky, a. a. O. 347 f., 359). Eine klare Begriffsbestimmung ist also auch hier in jedem Fall unerlässlich, zumal die Auslöser für derartige „Kraftdefizite“ sehr unterschiedlich sind. Die Ursachen können in den mechanischen Untersuchungsbedingungen liegen (Simoneau-Buessinger et al., 2015). Unterschiedliche Bewegungsgewohnheiten werden bei bilateralen Kraftdefiziten als eine weitere Ursache für deren Auftreten angenommen (siehe Enoka, 1988). Es kann der Einfluss des neuromuskulären Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus maßgeblich sein (z. B. beim „Explosivkraft-Defizit“), außerdem können auch corticospinale neurale Mechanismen, Reflexe eingeschlossen, als Ursache für Kraftdefizite diskutiert werden (z.B. Jakobi & Chilibeck, 2001; Šambaher et al., 2016).
- Prinzipien der **Superposition** (Überlagerung) werden in der Physik (Schwingungslehre, Quantenphysik), der Mathematik (Eigenschaft linearer Gleichungen, Logik), den Ingenieurwissenschaften (Frequenzanalyse, Elektronik, Robotik) und der Biologie (Erhöhung der DNA-Informationsdichte) angewandt. Ebenso wird der Begriff in Geologie, Archäologie, Architektur, Kunst und im Finanzwesen verwendet. Bei Forschungen zur Bewegungskontrolle versteht Feldman (1980a, b) unter Superposition die Überlagerung nervaler Signale. Demgegenüber werden mittels Superposition bei Latash & Zatsiorsky

¹ <http://www.polit.ru/news/2009/10/06/imgelfand/>, <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Gelfand.html>

(2015, S. 359) komplexe Bewegungen in elementare Aktionen aufgelöst, die unabhängig voneinander kontrolliert werden können. Sie haben das Prinzip der Superposition aus der Robotertechnik (Arimoto, 2000; Arimoto, Tahara, Yamaguchi, Nguyen & Han, 2001) auf die Analyse menschlicher Handbewegungen übertragen (Latash & Zatsiorsky, 2006; 2009; Zatsiorsky, Latash, Gao & Shim, 2004; Superposition in der Robotik: Gat-Falik & Flash, 1999; Peters, 2004).

- Vielfältige **Synergien** werden bei der Bewegungskontrolle festgestellt. Ausgangspunkt sollte das Verständnis von Synergien als zusammenwirkenden grundlegenden Einheiten der Bewegungskontrolle sein (Bernstein, 1967). In einer weiterführenden Verallgemeinerung ist nach Turvey (2007, S. 659) unter Synergie eine funktionale Einheit aus mehreren relativ unabhängig voneinander bestehenden Teilsystemen zu verstehen, deren Freiheitsgrade sich bei inneren Veränderungen und Veränderungen im äußeren Kraftfeld so arrangieren, dass ihre funktionale Integrität gewahrt bleibt. Sie stellen „neurale koordinative Strukturen“ dar (Bizzi & Cheung, 2013). Nach dieser Begriffsbestimmung tragen die von Rieck und Bawa (1992) sowie Sokoloff, Siegel und Cope (1999) festgestellten aufgabenbezogenen Gruppierungen bzw. Ensembles motorischer Einheiten bereits wesentliche Merkmale neuromuskulärer Synergien (s. u.). Als neuromuskuläre Synergie wird die koordinierte Rekrutierung von Muskelgruppen mit spezifischer Aktivierung bezeichnet, durch deren Kombination zahlreiche motorische Verhaltensformen kontrolliert werden können.
- Der Synergie-Begriff wird sowohl auf räumliche Organisationsformen (von motorischen Einheiten über Muskeln und Gelenke bis zu Körperteilen) wie auch auf die zeitliche Organisation des Zusammenwirkens (auch d'Avella & Lacquaniti, 2013) sowie auf Bewegungsaspekte (S. 207-228, s. u.) bezogen. Nicht in jedem Fall lässt sich eine Rechtfertigung für die Verwendung dieses Begriffs und der beigefügten Bestimmungswörter für ein *funktionales Konzept* feststellen, insbesondere dann, wenn damit vordergründig nur die äußere mechanische *Erscheinungsform* von Bewegungen beschrieben wird und wenn Tautologien gebraucht werden („funktionale Synergie“).
Festgestellt werden
 - **kinetische Synergien** (Slomka, Juras, Sobota, Furmanek, Rzepko & Latash, 2015);
 - **kinematische Synergien, Kraft-Synergien, Muskel-Synergien** (Safavynia, Torres-Oviedo & Ting, 2011; Roh, Rymer & Beer, 2012; Bizzi & Cheung, 2013; Suzuki, Nishida & Mitsutomi, 2014; Tagliabue, Ciancio, Brochier, Eskizmirililer & Maier, 2015), die als **fixierte und flexible Synergien** auftreten können (Santello, Baud-Bovy & Jörntell, 2013).
 - **posturale Synergien** (Weiß & Flanders, 2004),
 - **funktionale Synergien** (Sugiuchi, Kakei, Izawa & Shinoda, 2004),
 - **Motor-Synergien** (Latash, 2010a), **supplementäre motorische Synergien** (Penfield ca. 1950, angeführt nach Winter, 2012),
 - **neuronale Synergien** (Narayanan, Kimchi & Laubach, 2005) sowie
 - **sensorische Synergien** (Santello, Bianchi, Gabiccini, Ricciardi, Salvietti, Prattichizzo, Ernst, Moscatelli, Jorntell, Kappers, Kyriakopoulos, Schaeffer, Castellini & Bicchi, 2016). Erweiternd wird von **sensorimotorischen Synergien** gesprochen (Alnajjar, Itkonen, Berenz, Tournier, Naga & Shimoda, 2015). Das gründet auf der Annahme, dass Motorik und Sensorik der Bewegung kontrolliert werden. Dieser Ansatz wurde schon von Schöner (1995) vorgedacht. Er wird von der Umweltpsychologie (auch ökologische Psychologie) verfolgt. Diese untersucht die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt.
 - **Pathologische Synergien** (z. B. abnormale Koaktivierung von Arm- und Schultermuskeln sowie der Muskulatur um die Hüft- und Kniegelenke) können als **Flexor- und Extensor-Synergien** auftreten (z. B. Brunnstrom, 1970; Dewald & Beer, 2001; Thelen, Riewald, Asakawa, Sanger, Delp, 2003; Krainak, Ellis, Bury, Churchill, Pavlovics, Pearson, Shah & Dewald, 2011).Augen- und Handbewegungen beim Ergreifen und Platzieren von Objekten werden als
 - **temporäre Synergien** angesehen. Die Beziehung zwischen Kopfhaltung und Augenbewegung wird demgegenüber nur als eine **allgemein-nützliche Synergie** (*commonly useful*) betrachtet und weniger als ein eng miteinander verbundenes

Bewegungsmuster (Pelz, Hayhoe & Loeber, 2001). Das unterstreicht die Forderung der Autoren, stets klar zu definieren, in welchem Sinne der Synergie-Begriff gebraucht wird (S. 205). Sie unterscheiden übergreifend auf Grundlage von Bewegungsaspekten A-Synergien (stereotypische Muskelaktivitätsmuster bei Erkrankungen des ZNS, insbesondere nach einem Schlaganfall, als ein Spezialfall von B-Synergien), B-Synergien (Gruppen von Variablen, die sich in Abhängigkeit von der Zeit oder der Aufgabenstellung verändern) und C-Synergien (Kovariationsmuster innerhalb der Elementarvariablen, die eine leistungsrelevante Variable stabilisieren, d. h. deren Varianz verringern). Ob es sich bei den Synergien letztlich auch um eine physiologische Realität handelt, muss die weitere Forschung zeigen (Overduin, d'Avella, Carmena & Bizzi, 2012).

- (Physikalische) **Arbeit**: Der Begriff der Haltearbeit wird für die Muskelarbeit verwendet, die für die Stabilisierung des Körpers, von Körpergliedern, Gelenken oder eines äußeren Widerstandes aufzubringen ist. Leistungsfortschritte in der Körperstabilität (im Niveau der „Haltearbeit“) durch ein darauf abzielendes Training sollten auch nachgewiesen werden können. In der klassischen Mechanik ist Arbeit ohne Ortveränderung („statische Arbeit“, d. h. Haltearbeit) jedoch nicht definiert. Daher sollten zweckmäßigerweise alternative Begriffe wie „statischer Kraftaufwand, statische Muskelkraft“ oder ähnliches verwendet werden (Zatsiorsky, 2016).

Wie schwierig das Unterfangen der Autoren ist, wird beispielsweise auch bei dem von ihnen vorgeschlagenen Begriff der „scheinbaren (apparent) Steifigkeit“ von biologischen Objekten wie Muskeln, Sehnen, Gelenken deutlich. Die Bedeutung von „apparent“² reicht vom eigentlichen Wortsinn „scheinbar, augenscheinlich“ mittlerweile bis hin bis zu „offensichtlich“. Wie wichtig diese Unterscheidung ist, zeigt sich klar bei „scheinbarer Ähnlichkeit“ und „offensichtlichem Fehler“. Die unterschiedlichen Standpunkte zum Konzept efferenter Kopien (S. 139-156) sind ein Beispiel dafür, dass es den Autoren nicht in jedem Fall möglich ist, bestehende Auffassungen zusammenzuführen. Die dabei aufgezeigten Widersprüche (S. 154) werden letztlich den Erkenntnisprozess voranbringen.

Derartige Unschärfen und Begriffsverwirrungen haben den Fortschritt der Wissenschaft niemals vorangebracht. Slaney und Maraun (2005) weisen auf mögliche unerwünschte Rückwirkungen auf den Forschungsprozess hin, die von unklaren oder falschen Begriffen ausgehen und die bis zu irreführenden Fragestellungen führen können. Das vorliegende Buch will Klarheit in der Bedeutung der am häufigsten verwendeten Begriffe bei der Erforschung der menschlichen Bewegung verschaffen. Es will kein Lehrbuch sein, sondern ist als Ergänzungsliteratur insbesondere für das Studium und die Weiterbildung in den Bereichen Biomechanik, Bewegungswissenschaften, Sportmedizin, Sportpsychologie, Neuropsychologie und Physiotherapie gedacht. Es weist auf den Zugang zur Primärliteratur und regt an, auf diese zurückzugreifen. Damit können die Bemühungen der Autoren vom Anliegen her der problemorientierten Grundlagenforschung zugeordnet werden, bei der der potenzielle Nutzen für die Praxis mitunter auf den ersten Blick nicht gleich zu erkennen ist.

4. Das Bewegungsprogramm – eine Metapher, der die zentralen Begriffe der Bewegungskontrolle verbindet

Die Autoren kommen zu der Schlussfolgerung, dass der übliche Gebrauch der Begriffe „Bewegungsprogramm“ und „internes Modell“ eher irreführend als klärend ist, denn es wird ein Erkenntnisstand angenommen, der bei der gegenwärtig noch weitgehend unbekanntem Physik und Physiologie der dahinter stehenden Prozesse de facto nicht gegeben ist. „Engramm“³ oder „neurale Repräsentation“ entsprechen nach ihrer Auffassung eher dem

² <https://www.vocabulary.com/dictionary/apparent>; <http://www.etymonline.com/index.php?term=apparent>

³ Engramm: altgriechisch ἐν (en), „hinein“ + γράμμα (gramma), "das Hineingeschriebene" mit der indoeuropäischen Wortwurzel von kratzen/scratch (<https://en.wiktionary.org/wiki/grammar>), Gedächtnisspur/memory trace; eine allgemeine Bezeichnung für die angenommene und z. T. experimentell belegte biophysikalische und/oder biochemische Kodierung in neuralem Gewebe als physische Grundlage des Gedächtnisses; "die molekularen und zellulären Veränderungen, die dem Gedächtnis zugrunde liegen" (Mayford, 2013). Der Begriff wurde erstmals vom Evolutionsbiologen und Gedächtnisforscher Richard Semon (1904a, b)

noch dürftigen Wissen zur Neurophysiologie motorischer Fertigkeiten (Erlernen, Speichern, Verfügen und Vervollkommen). Mit Absicht wird die Frage nach dem Wie und Wo der Bewegungsvorbereitung umgangen. Die Autoren verweisen diesbezüglich auf den erfolgsträchtigen Ansatz, der aus der Theorie dynamischer neuraler Felder abgeleitet wird (z. B. Schöner⁴ & Thelen, 2006; Sandamirskaya⁵, 2013; siehe auch den Überblick zu neuralen Feldern bei Coombes, 2014).

Synergien und Theorien: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile“ (Aristoteles⁶)

□

Bei den 148 beweglichen Knochen und 230 Gelenken des menschlichen Körpers, die mehrheitlich eingelenkig sind, ergeben sich um die 240 Freiheitsgrade für Bewegungen (Zatsiorsky, 1998; Li, 2006; Zatsiorsky & Prilutsky, 2012). Allein die Hand weist 22 Freiheitsgrade auf. Je nach Betrachtungsweise wird auch von 500 bis 1400 Freiheitsgraden ausgegangen (Byadarhaly, Perdoor & Minai, 2012), von denen die Mehrheit jedoch nicht als funktional und kontrollierbar angesehen werden kann und damit rein theoretischer Natur ist. Um diese Gelenke agieren 630 Muskeln. Der bei den vielfältigen Bewegungsmustern der Beinarbeit (Laufen, Springen, Werfen) aktive zweiköpfige Wadenmuskel (innerer Kopf) besteht beispielsweise aus über einer Million Muskelfasern, die von ca. 580 Axonen innerviert werden (Feinstein, Lindegard, Nyman & Wohlfart, 1955). Es kann also von um die 2000 motorischen Einheiten ausgegangen werden, wie auch bei der Armmuskulatur von Primaten (Bizeps und Trizeps) mehr als 2000 motorischen Einheiten festgestellt wurden (Jenny & Inukai, 1983; siehe auch den Überblick bei Enoka & Fuglevand, 2001). Jedes der Motoneurone kann in seinem Zellkörper im Rückenmark Aktionspotenziale an bis zu 60.000 Schaltstellen (Synapsen) empfangen. Der experimentell ermittelte „Rauschpegel“ liegt bei Willkürbewegungen immer noch im Bereich von 10 bis 30 % (Überblick bei Sawers, Allen & Ting, 2015). Demgegenüber erscheint es wie eine Vereinfachung in der Bewegungskontrolle (eine Redundanz der Freiheitsgrade), wenn die Innervation des Waden-Muskels (mittlerer Bereich) *nicht* nach bestimmten Muskelregionen und ohne Einfluss der Zielstellung (Gelenkbewegung) erfolgt, wie neuere Untersuchungen gezeigt haben (Héroux, 2015a; Héroux, Brown, Inglis, Siegmund & Blouin, 2016). Einzelne motorische Einheiten können sich über die gesamte Länge (14 bis 18 cm) und Breite des Muskels (8 bis 11 cm) ausdehnen. Die Mehrheit der untersuchten motorischen Einheiten erstreckte sich über mehr als die Hälfte der Länge und Breite des Muskels.

Im groben Überblick kann davon ausgegangen werden, dass verschiedene efferente und afferente neurale Netzwerke (mono- und polysynaptische Nervenbahnen) zur Bewegungskontrolle genutzt werden, die von den Gehirnstrukturen (das vestibulare und visuomotorische System eingeschlossen) über das Rückenmark in die Gliedmaßen und zurück verlaufen (aus den Gelenken, Muskeln, Sehnen, Faszien). Die efferenten Bahnen werden den synergistisch wirkenden pyramidalmotorischen und extrapyramidalmotorischen Systemen zugeordnet (Letzteres steuert vornehmlich die Rumpf- und proximale Extremitätenmuskulatur, beeinflusst den Muskeltonus). Weitere Nervenbahnen haben Funktionen bei der Kontrolle des Gleichgewichts (Ventromedialtrakt), der Körper- und Kopfhaltung, des Blickes (Vestibulospinal- und Tectospinaltrakte) sowie der reflektorischen Schwerkraftkompensation (Reticulospinaltrakt). Unterschiedliche parallel verlaufende

verwendet. Damit drückte er den Gedanken aus, dass Erlebnisse und Erfahrungen physische Spuren im Gehirn hinterlassen. Möglicherweise standen ihm dabei Metaphern Pate, die Gelehrte der Antike zum Gedächtnis benutzt hatten (z. B. Plato: leere Schreibrtafel, auf die geritzt, d. h. geschrieben, wird; Aristoteles: Wachsklumpen mit Eindrücken von einem Siegelring). Die auch in der wissenschaftlichen Arbeit wirkungsvolle Verwendung figurativer Ausdrücke (Metaphern, bildhafte Analogien, Idiome) bewirkt, dass im Vergleich zu einer „normalen“ Ausdrucksweise infolge der zusätzlichen Bildverarbeitung deutlich höhere Anforderungen an die Zusammenarbeit beider Gehirnhemisphären gestellt werden (Bottini, Cocoran, Sterzi, Paulescu & Scarpa, 1994; Hillert, 2016; Grah & Kumar, 2016; Carpenter, 2016).

⁴ Direktor des Institutes für Neuroinformatik, Ruhr-Universität Bochum

⁵ Leiterin der dortigen Arbeitsgruppe für autonomes Lernen (<http://www.ini.rub.de/users>; <http://www.ini.rub.de/groups/11-Autonomous%20Learning>)

⁶ Verkürztes Zitat aus „Metaphysik VII17, 1041b; Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Metaphysik_\(Aristoteles\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Metaphysik_(Aristoteles))

Nervenbahnen führen zu unterschiedlichen Latenzzeiten von Reflexbögen (Überblick bei Rossi & Scarpini, 1992), wie sich auch deren Empfindlichkeit und die Stärke der Reflexantwort durch Anpassung ändern kann („*reflex gating*“, S. 116; Meunier & Pierrot-Deseilligny, 1989). Bemerkenswert ist, dass diese Reflexmodulationen auch durch motorisches Lernen hervorgerufen werden können (Evarts & Tanji, 1974).

Inzwischen wurde verstanden, dass einzelne Stellen im motorischen Cortex nicht einfach Muskeln oder Muskelgruppen zugeordnet werden können. Somatosensorische und motorische Bereiche überlappen und durchdringen sich, z. B. die Fingerbereiche mit dem Armbereich (z. B. Park, Belhaj-Saif, Gordon & Cheney, 2001; siehe die Überblicke und Forschungsergebnisse bei Graziano, Taylor, Moore & Cooke, 2002; Graziano & Afalo, 2007; Guigon, Baraduc & Desmurget, 2007; Bizzi & Cheung, 2013; Overduin, d'Avella, Carmena & Bizzi, 2012; 2014). Die Beziehungen zwischen den Cortexbereichen und den Muskeln stellen sich damit sehr viel komplexer und komplizierter dar als noch vor Jahren gedacht. Grafische Darstellungen in Form eines motorisch-sensorischen „Homunculus“ (siehe z. B., Bartonietz, 2008c, Abbildung 3) sind als starke Vereinfachungen anzusehen, die weiterer Erläuterungen bedürfen. Nahezu jeder der untersuchten Bewegungsparameter ist in Cortexneuronen codiert festgestellt worden (Bewegungsrichtung, Gelenkwinkel, Muskelspannung, Kraftfelder, Geschwindigkeitsprofile, Endpunkte von Bewegungsbahnen), die auch willkürlichen Körperhaltungen oder Bewegungen zugeordnet werden können (Overduin et al., 2012). Die zur Bewegungsinitiierung und -kontrolle bislang angenommenen hierarchischen Strukturen lassen eher unscharfe Grenzen erkennen, sodass einige der historisch gewachsenen Begriffe (wie der „primäre“ und „sekundäre“ motorische Cortex) nicht die aufgedeckten Verhältnisse widerspiegeln, wie Graziano et al. schon 2002 festgestellt haben. Bei der Bewegungskontrolle gelangen ganz offensichtlich zahlreiche parallele Strategien zum Einsatz, die u. a. unterschiedliche Bewegungsgeschwindigkeiten sowie Ausgangs- und Endstellungen von Körpergliedern umfassen (Graziano et al., 2002).

Es wird angenommen, dass die dabei gebildeten neuromuskulären Synergien die erforderlichen Steuerkommandos vereinfachen (D'Avella, 2009; Bizzi & Cheung, 2013). Muskelsynergien haben sich als relativ stabil bei Störeinflüssen herausgestellt. Störungen können schneller ausgeglichen werden, wenn die Korrekturen auf vorhandene Synergien zurückgreifen können. Das Gehen und Rennen mit verschiedenen Geschwindigkeiten gründet sich beispielsweise auf 4 bis 5 derartiger Synergien der Beinmuskulatur (siehe Überblick bei Bizzi und Cheung, 2013). Ob, und wenn ja, wie bei der Kontrolle schwieriger und neuer Bewegungen auf vorhandene neuromuskuläre Synergien zurückgegriffen werden kann, ist eine Fragestellung, die für das Training vom Anfänger bis zum Spitzenathleten von Bedeutung ist.

Je effizienter dabei die Kooperation zwischen den Gehirnbereichen und -hemisphären erfolgt, desto besser kann die sportliche Leistung sein. Das soll an einem einfachen Beispiel aus dem täglichen Training veranschaulicht werden: Bei einer **Bewegung des rechten Arms** ist über die gekreuzten Nervenbahnen **der linke kontralaterale motorische Cortex** involviert (Bewegung von Hand und Unterarm); aber auch der rechte motorische Cortex ist aktiv, denn Rumpf (bis zur Mittellinie), rechte Schulter und rechter Oberarm werden aus den entsprechenden Bereichen der rechten (ipsilateralen) Gehirnhälfte angesteuert, *ohne* dass die Nervenbahnen sich kreuzen (siehe z. B. The Brain from Top to Bottom: <http://thebrain.mcgill.ca/>). Die Kontrollmechanismen sind nicht auf das Gehirn beschränkt, sondern involvieren corticale, supraspinale und spinale Strukturen (Carroll, Herbert, Munn, Lee & Gandevia, 2006). Ein Grund mehr, die Herausbildung einer hohen Geschwindigkeit des Informationsflusses im Kontrollsystem (cortical, supraspinal und spinal) schon im Kinder- und Jugendtraining als hintergründiges Trainingsziel im Auge zu haben – im Hinblick auf die zukünftigen Anforderungen des Hochleistungstrainings. Dazu die drei folgenden Beispiele:

1. Die erfolgreiche chinesische Tennisspielerin Li Na (sie gewann u. a. zwei Grand-Slam-Titel) begann im Alter von 6 Jahren mit dem Badmintontraining, „um die Reflexe auszubilden“ (Johnson, 2011). Ihre frühen Badmintonerfahrungen haben auch den Spielstil im Tennis beeinflusst.
2. Lionel Messi, weltbesten Fußballspieler seit 2009, spielte als Kleinkind mit seinen älteren

Brüdern und Cousins (spätere Profi-Spieler), mit 4 Jahren kam er zum Vereinstraining (Carlin, 2010). Nach seinen und Ronaldino Gauchos Worten hat das in Südamerika entstandene und auf Improvisation, Kreativität und Technik (Ballkontrolle auf kleinem Raum) ausgerichtete Kleinfeld-Fußballspiel Futsal großen Einfluss auf ihre spielerische Entwicklung gehabt (Long Island Futsal, 2016).

3. Christin Hussong, erfolgreiche deutsche Speerwerferin (U18-Weltmeisterin 2011, Sechste der Weltrangliste 2015 und eine der Olympiakandidatinnen 2016), begann im Kindesalter mit einem vielseitigen und altersgerechten, auf die Leichtathletik ausgerichteten Training (Erfassung der Leistungsentwicklung ab dem siebten Lebensjahr durch den Trainer/Vater). Mit 13 Jahren erreichte sie mit dem 200-g-Wurfball bereits eine Wurfweite von 67 m (Hussong, 2012). Der Weltrekord liegt gegenwärtig bei 72,28 m.

Das Einbinden von Übungen mit einem Seitenwechsel bei Wurfarm, Sprungbein, Spielhand oder Spielbein in den frühen Übungsbetrieb und ins Training ist daher als nutzbringend anzusehen. Untersuchungen von Nobelpreisträger Roger Sperry haben gezeigt, dass die Entwicklung einer Gehirnhälfte auch der Entwicklung der anderen zu Gute kommt (siehe Überblick bei Bartonietz, 2008a, b, c). Experimentelle Befunde mit Bezug zur Motorik unterstreichen das:

- Bei Musikern, die mit dem Musizieren in früher Kindheit begonnen haben (jünger als sieben Jahre) wurden in bestimmten Bereichen des Corpus callosums dickere Nervenstränge festgestellt als bei Musikern, die später mit dem Musizieren begannen (Schlaug, Jäncke, Huang, Staiger & Steinmetz, 1995; Bailey, Zatorre & Penhune, 2014 – vermutete Ursache: eine ausgeprägtere Myelinisierung; die Dicke der Isolationsschicht um die Nervenfasern beeinflusst die Geschwindigkeit der Impulsübertragung). Auch wurden (unabhängig vom Alter) im Vergleich zu Nicht-Musikern dickere Nervenstränge einiger der Verbindungen zwischen den Hemisphären ermittelt (Öztürk, Tasçioglu, Aktekin, Kurtoglu & Erden, 2002; Lee, Chen & Schlaug, 2003). Die „strukturelle Plastizität“, die sich bei Musikern ausgebildet hat, und Aspekte der Bewegungsgenauigkeit hängen ebenfalls vom Alter des Beginns der musikalischen Ausbildung ab (Vaquero, Hartmann, Ripollés, Rojo, Sierpowska, François, Càmara, van Vugt, Mohammadi, Samii, Münte, Rodríguez-Fornells & Altenmüller, 2016).
- Die „interhemisphärische Inhibition“ ist bei Musikern geringer ausgeprägt als bei Kontrollpersonen (Ridding, Brouwer & Nordstrom, 2000; Hemmung der Aktivität einer Hemisphäre durch die andere, um ein effektives Zusammenwirken beider Gliedmaßen zu gewährleisten und um ein „Übersprechen“ motorischer Signale zu unterbinden: Duque, Mazzocchio, Dambrosia, Murase, Olivier & Cohen, 2005). Eine Erhöhung der Erregbarkeit (Kidgell, Stokes & Pearce, 2011) bzw. eine Minderung der neuronalen Hemmung wurde auch auf corticospinaler Ebene bei der Übertragung von Krafttrainingseffekten auf die untrainierte Gliedmaße der Gegenseite festgestellt (Kidgell, Frazer, Daly, Rantalaine, Ruotsalainen, Ahtiainen, Avela & Howatson, 2015; s. u.).
- Beim fovealen (direkten) Sehen ist, im Gegensatz zu traditionellen Auffassungen, interhemisphärische Kommunikation erforderlich (Van der Haegen, Cai, Stevens & Brysbaert, 2013). Das kann die festgestellte Zunahme an weißer Substanz (Bündel myelinierter Nervenzellen) in Teilen des Corpus callosums während des Lesen-Lernens erklären (Frye, Hasan, Xue, Strickland, Malmberg, Liederman & Papanicolaou, 2008). Entsprechende Untersuchungen bei Sportlern stehen noch aus. Für das Verständnis des Wirkens der Blickfixierung ist die neuere Erkenntnis von Bedeutung, dass beim Tiefensehen unterschiedliche Nervenbahnen genutzt werden für schnelle und langsame Drehbewegungen der Augäpfel zu- bzw. voneinander (d. h. für die Vergenz: Cullen & Van Horn, 2011).
- Die in vielen Sportarten leistungsrelevante Augen-Hand-Koordination bei zielgerichteten langsamen wie auch schnellen Bewegungen (Abrams, Richard A., Meyer & Kornblum, 1990) basiert ebenfalls auf dem Informationsfluss zwischen den Hemisphären und auf kreuzenden Nervenbahnen. Es wurde eine erhöhte Gehirnaktivität (mittels fMRI) nachgewiesen, wenn bei Bewegungen der rechten Hand auch der Blick in der rechten

Richtung fixiert wurde (Bédnard, Wu & Sanes, 2011). Die Autoren gehen auch unter Zugrundelegung weiterer experimenteller Befunde davon aus, dass sich mit Hilfe der Blickfixierung motorische Funktionen verbessern lassen. Den Nachweis über die Wirksamkeit der Blickfixierung hat die „quite eye“-Trainingstechnologie von J. Vickers (Universität of Calgary) im Golf und Basketball erbracht (Clothier, 2005; Vickers, 2007; Britten, 2010; mustang6560, 2012).

- Beim motorischen Lernen ist ein sogenanntes audiovisuelles Spiegelneuronen-System aktiv, wenn eine Bewegung ausgeführt, gesehen oder gehört wird (siehe dazu die Überblicke bei Buccini & Riggio, 2006; Acharya & Shukla, 2012; Turella, Wurm, Tucciarelli & Lingnau, 2013). Daher ist im Training das *korrekte* Demonstrieren von großer Bedeutung. Neben der Verarbeitung visueller Reize beim Erlernen und Vervollkommen von Bewegungsausführungen unterstützen auch akustische Reize über das Spiegelneuronensystem das motorische Lernen (Kohler, Keyzers, Umiltà, Fogassi, Gallese & Rizzolatti, 2002; Keyzers, Kohler, Umiltà, Nanetti, Fogassi & Gallese, 2003). Sommer (2014) hat bei Fußballspielerinnen (n = 25, schwedische Oberliga und 1. Division, 25-m-Pass auf ein Ziel mit einem Durchmesser von 5 m) und Golfern (n = 26, Handicap 4,4-19,8, Abschlüge auf einem Golf Simulator) die Wirkung eines Sportart-*unspezifischen* Rhythmus-Timing-Trainings von Hand- und Fußbewegungen mittels Metronom auf die Genauigkeit *sportartspezifischer* Bewegungsabläufe untersucht (12 Trainingseinheiten, jeweils 45 Minuten über vier Wochen). Die Ergebnisse zeigten bei den Golfabschlägen und den Fußball-Pässen Genauigkeitsverbesserungen bei Verringerung der Variabilität. Der Autor vermutet als Ursache für diesen Transfer die Kopplungsmechanismen von Aktion und Wahrnehmung, die zu einer verbesserten Wirksamkeit der Signalverarbeitung im ZNS geführt haben.
- Querverbindungen zwischen den Nervenbahnen führen auch zu einer Verringerung der corticospinalen Erregbarkeit von Muskeln der oberen Extremitäten in Auswirkung der Ermüdung von Muskeln der unteren Extremitäten (das Phänomen der „nicht-lokalen Ermüdung von nicht-trainierten Muskeln“: Šambaher, Aboodarda & Behm, 2016).

Diese Beispiele verdeutlichen die enorme Vielschichtigkeit und den komplexen Charakter der Mechanismen, die bei der Ausbildung und Aktivierung neuromuskulärer Synergien bei der Bewegungskontrolle auf den verschiedenen Ebenen parallel wie auch seriell durchlaufen werden, wenn aus chemisch-physikalischen Vorgängen in Nervenzellen des Gehirns und Rückenmarks mechanisch erfassbare Bewegungen entstehen. Diese sind zahllos in der sich niemals wiederholenden Mannigfaltigkeit. Zum Vergleich: Ein stationärer Highspeed-Roboter (Kuka KR Agilus, Augsburg: Reichweite 3,9 m, Bewegungsgenauigkeit $\pm 0,06$ mm) kommt mit 6 Freiheitsgraden aus, um es bei entsprechender Programmierung mit einem Spieler der Weltklasse (Timo Boll, Silbermedaille London 2012) aufnehmen zu können (The Guardian, 2014; Hintergrundinformation: Rapp, 2011; Prigg, 2014; Ackerman, 2014). Die mittlere Geschwindigkeit eines Tischtennisballs kann 22 bis 27 ms^{-1} erreichen, der Ball-Geschwindigkeitsrekord liegt bei 31 ms^{-1} (Tuberville, 2004). Damit wird die Tischtennisplatte in 0,10 bis 0,12 s überflogen. Das stellt extrem hohe Anforderungen an die Bewegungsantizipation und -kontrolle bei Mensch wie Maschine. Roboter haben ebenso in die Freizeitindustrie Einzug gehalten (KUKA Passagier-Roboter/Coaster, 6 Freiheitsgrade). Auch im Leistungssport sowie in der bewegungswissenschaftlichen Forschung ist der Einsatz von speziellen Robotern vorstellbar (<http://www.kuka-entertainment.com/de/products/institute/>).

Die oben beispielhaft aufgezeigten ineinander verwobenen komplizierten neuralen Längs- und Querverbindungen sind Anhaltspunkte dafür, die vermeintlich hierarchische Anordnung zahlreicher Bereiche der Bewegungskontrolle fraglich erscheinen zu lassen (Turvey & Fonseca, 2009).

Das „Bernstein-Problem“

Die dem Menschen gegebene enorme Vielfalt der Koordinationsmöglichkeiten auf ein

sinnvolles Maß zu reduzieren (Bewegungsökonomie als Kriterium: Gelfand und Tsetlin, 1966; S. 185; zu weiteren Optimierungskriterien: S. 186-193), d. h., die Anzahl der Freiheitsgrade auf das erforderliche Maß entsprechend der jeweiligen Bewegungsaufgabe einzugrenzen, ist eine zentrale Aufgabe der Bewegungskontrolle, wenn nicht *die* zentrale Aufgabe. Sie wird auch als „Bernstein-Problem“ bezeichnet, da N. A. Bernstein zuerst auf das Redundanz-Problem hingewiesen hat und sich seine Forschungstätigkeit auf dieses Gebiet erstreckte (S. 179). In der Praxis ist der Begriff der *funktionalen Freiheitsgrade* angebracht, denn nur ein bestimmter geringerer Anteil von den vorhandenen Freiheitsgraden ist tatsächlich relevant (Li, 2006). Ausgehend vom ursprünglichen Konzept der mechanischen Freiheitsgrade zur Beschreibung der Bewegungsmöglichkeiten in den Gelenken (wie oben gebraucht, siehe ausführlich Hochmuth, 1982, S. 70-76) wird der Begriff inzwischen auch auf die Charakterisierung weiterer motorischer Gegebenheiten angewandt, wie Muskelkräfte bzw. Momente von Muskelkräften, Muskelaktivitätsparameter (EMG), neuromuskuläre Synergien, motorische Einheiten bis hin zu Neuronengruppen (siehe Li, 2006). Damit können Beobachtungen auf höheren Ebenen (z. B. Veränderungen bei den energetischen Verhältnissen der Körper- und Gerätebeschleunigung, Bewegungsvarianzen des Endgliedes einer kinematischen Kette oder in Gelenken) auf Strukturen niedrigerer Ebenen (z. B. Muskelsynergien) zurückgeführt werden (Li, 2006, auch zur Freiheitsgrad-Analyse als Bedingungserfüllungsproblem, zur Hauptachsentransformation als angewandtem mathematischen Apparat).

Eine alternative Lösung des Problems der redundanten Freiheitsgrade besteht darin, diese gar nicht oder wenigstens nur teilweise als redundant anzusehen und sie sogar als nutzbringend zu erachten. Das ist dann gegeben, wenn jedes der Bewegungselemente seine Aktivitäten auf das erforderliche Minimum beschränkt. Dieser Ansatz geht auf Gelfand und Tsetlin (1966) zurück und wurde von Gelfand und Latash (1998) zum Prinzip der Abundanz entwickelt. Demnach werden bei der Bewegung mehr Elemente als erforderlich eingesetzt, wodurch das System nicht auf eine Lösungsvariante festgelegt wird. Variierende Bewegungsmuster sind möglich (und ggf. erforderlich), um die Bewegungsaufgabe zu lösen (S. 185). E. Todorov⁷ und M. I. Jordan⁸ haben ebenso festgestellt, dass eine Variabilität von redundantem Ausmaß („eine unkontrollierte Mannigfaltigkeit“) bei gewissen unsicheren Randbedingungen der Bewegungsausführung (Todorov & Jordan, 2003) die optimale Kontrollstrategie darstellt. Dieser Ansatz ist in die Bewegungssimulation eingearbeitet, beispielsweise beim Bergauf- und Bergab-Gehen mit der Multi-Joint Dynamics Contact-Software (MuJoCo – <http://www.mujoco.org>). Die Kontrollstrategie besteht dabei nicht (nur) in der Verringerung der Anzahl der Freiheitsgrade, sondern auch deren Organisation, die Varianz eingeschlossen (Latash, Scholz & Schöner, 2007; Latash, 2010c). Hsu (2014) hat gezeigt, dass eine derartige Abundanz ebenso von Vorteil ist, wenn gleichzeitig mehrere Bewegungsaufgaben zu lösen sind.

Bei Verringerung der Redundanz wie auch bei Nutzung der Abundanz kommt es zu Veränderungen bei den gebildeten neuromuskulären Synergien. Im Zusammenarbeiten (das ist die Wortbedeutung von Synergie) verschiedener Elemente wird ein grundlegendes biologisches Prinzip gesehen, das dem Gesamtsystem Vorteile bei der Anpassung an äußere Bedingungen bringt. Im Ausspruch des Aristoteles kommt die Wirkung von Synergien zum Ausdruck.

Latash, Scholz und Schöner (2007) verbinden in ihrem Synergie-Verständnis aufgabenbezogene Stabilität und Variabilität für das Erreichen der außerordentlichen Anpassungsfähigkeit und Flexibilität willkürlicher Bewegungen. Während des Lernprozesses werden die Freiheitsgrade nicht zu universellen stabilen motorischen Grundelementen (*motor primitives*) verbunden, sondern bleiben flexibel, um so Verbindungen von Freiheitsgrad-Kombinationen entsprechend der Anforderungen der Bewegungsaufgabe eingehen zu können. Dadurch können Bewegungsaufgaben unter variierenden äußeren

⁷ Universität of Washington/Labor für Bewegungskontrolle, Forschungsschwerpunkte: Bewegungskontrolle biologischer und technischer Systeme, Mathematikanwendung in der Biologie

⁸ Department of Electrical Engineering and Computer Science, Department of Statistics, University of California/Berkeley, Forschungsschwerpunkte: u. a. künstliche Intelligenz, Bewegungskontrolle

Umständen (z. B. Ausgangs- und Endstellungen) gelöst werden. Mit den Freiheitsgrad- und Synergie-Begriffen können damit auch die Eigenschaften neuromuskulärer Systeme beschrieben werden.

Theorien zur Bewegungskontrolle: Kontrolliertes Gleichgewicht und unkontrollierte Mannigfaltigkeit

„Gleichgewichtspunkt“-Hypothese

Hier geht es um die Hypothese der „Schwellenkontrolle“ (гипотеза равновесной точки, equilibrium point hypothesis, EP-Hypothese, threshold control hypothesis: Asatryan & Feldman, 1965; Feldman, 1966; Feldman & Levin, 2009; Feldman, 2015; auch Bizzi, Accornero, Chapple & Hogan, 1984, allerdings abgeleitet von Versuchen mit deafferentierten Tieren, bei denen kein Reflexeintrag in die untersuchten Bewegungen mehr erfolgen konnte), die im besprochenen Buch auf S. 63-82 abgehandelt wird.

Der Grundgedanke des Neurowissenschaftlers Anatol Feldman ist, dass im Unterschied zu den mathematischen Abstraktionen, mit denen sich Ortsveränderungen beschreiben lassen (Bezugssysteme, d. h. Koordinatensysteme), das Nervensystem physiologische (neuronale) Strukturen als Bezugssysteme definiert und benutzt. Geometrie, Bezugspunkte und Metrik dieser physiologischen Bezugssysteme können durch entsprechende Attribute (Parameter) beschrieben werden.

Feldmans Hypothese zur Bewegungskontrolle geht davon aus, dass sich Bewegungen aus aufeinanderfolgenden Gleichgewichtszuständen in den Gelenken zusammensetzen. Zu einem bestimmten *Zeitpunkt* kann jede Gelenkposition als quasi-statischer Zustand angesehen werden, bei dem sich die Momente der inneren und äußeren Kräfte im *Gleichgewicht* befinden. Solche aufeinanderfolgende Gleichgewichtszustände lassen die Bewegung entstehen. In diesem Kontrollschema sind auch die biomechanischen Eigenschaften der Antriebselemente (Muskel-Sehnen-Einheiten) berücksichtigt, die sich mit den Gelenkstellungen verändern und die auch zwischen den Muskelgruppen Unterschiede aufweisen. Die zeitliche Abfolge der Muskelkraftentwicklung muss nicht in einem „Bewegungsprogramm“ geplant werden, sondern entsteht mit den sich verändernden Gleichgewichtspunkten. Dabei wird von der zentralen Modulation von Reflexparametern als Hauptmechanismus der willkürlichen Änderungen der Gelenkpositionen durch Muskelaktivität ausgegangen (S. 115). Der als „ λ “ bezeichnete Schwellwert des tonischen Stretchreflexes, der auch der Muskellänge zuzuordnen ist (s. u.), hat der Hypothese ihren zweiten Namen gegeben; Lambda-Modell.

Lambda als abstrakte Variable beinhaltet Aspekte des zentralen und peripheren Nervensystems, mehrerer dessen motorischer und sensorischer Bestandteile sowie von Muskeleigenschaften. Grundsätzlich kann diese abstrakte Variable von Muskeln und Gelenken über den Gesamtkörper bis auf die Körper-Umgebung-Wechselbeziehung bezogen werden. Diese Abstraktheit und der ganz offensichtliche Bezug zu einer Vielzahl von Komponenten auf verschiedenen Niveaus rechtfertigt es nicht, Lambda einem „zentralen Kommando“ zuzuordnen“ (Turvey, 2007, S. 663).

Zatsiorsky und Latash (a. a. O.) stellen die naturwissenschaftlich fundierten Wurzeln dieser Hypothese heraus (S. 247-251): einerseits Reflexe (Forschungen von Sherrington und Pavlov, Rückkopplungsmechanismen), andererseits die Längen- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der Muskelkraft. Damit liegen dieser Hypothese zur Bewegungskontrolle physiologische Parameter zugrunde (was bei anderen Kontrolltheorien nicht der Fall ist). Sie geht davon aus, dass die Muskelkontraktionen (Bewegungen) nicht direkt vom ZNS kontrolliert werden, sondern dass das ZNS in der „Planungsphase“ aufeinanderfolgende statische Gliederpositionen (die Gleichgewichtspositionen, aufeinanderfolgende Gleichgewichtszustände) und den Endpunkt der Gelenkbewegungen in der Länge der Beuge- und Streckmuskulatur vorgibt. Die Bewegungsausführung kann dann durch das periphere Nervensystem und die Muskeln geregelt und realisiert werden, ohne weiteren internen Informationsfluss vom und zum ZNS zu erfordern (detailliert siehe Feldman & Latash, 2005).

Am Modell kann die Funktionsweise dieses hypothetischen Kontrollmechanismus

veranschaulicht werden. Nach den Vorstellungen von Feldman, Goussev, Sangole & Levin (2007) wird das Auslösen von motorischen Aktionen vom zentralen Zurücksetzen (*resetting*) der Schwellenposition der entsprechenden Körperglieder (der virtuellen Ruheposition) initiiert. Abweichungen davon rufen Aktivität und Widerstandskräfte hervor (Schwellwert-Kontrolle). Die Differenz zwischen der zentral gesetzten Schwellwert-Referenzposition und der über die Sensorik vermittelten aktuellen Position bewirkt die Aktivierung neuromuskulärer Antriebe, die untereinander und mit der Umgebung in Wechselwirkung treten. Diese Antriebe tendieren dazu, die hervorgerufenen Aktivitäten und Wechselwirkungen durch Minimierung der Differenz zwischen der aktuellen Position und der Schwellwertposition gering zu halten (Prinzip der minimalen Wechselwirkung, Todorov & Jordan, 2003, S. 28: „Abweichungen von einer mittleren Bewegungsbahn werden nur korrigiert, wenn sie das Erreichen des Bewegungszieles behindern“; s. u.).

Die weiter entwickelte Version der EP-Theorie (die Hypothese referenter Konfigurationen, S. 262-264) bezieht Muskelgruppen und mehrere Gelenke bis hin zu Ganzkörperbewegungen ein. Sie geht davon aus, dass das Nervensystem eine Bezugsconfiguration des Körper in Form eines inneren geometrischen Abbildes mit der aktuellen Körperkonfiguration abgleicht (Lestiennea, Thulliera, Archambault, Levin & Feldman, 2000; Latash, Friedman, Kim, Feldman & Zatsiorsky, 2010; Feldman 2015).

Eine kritische Auseinandersetzung mit diesem Bewegungskontrollkonzept wird im vorliegenden Buch auf den Seiten 264-266 geführt (detaillierter dazu Gomi & Kawato, 1996; Gottlieb, 1998, 2000; Latash, Ostry & Feldman, 2003; Kistemaker, van Soest & Bobbert, 2007; Latash, 2008; Latash, 2010b; Sainburg, 2015).

Die experimentelle Überprüfung der Hypothese erfolgte bei ein- wie auch mehrgelenkigen Bewegungen (Tabelle 1, Teil B) und kann auch auf die Kontrolle von Bewegungen bezogen werden:

- Flanagan, Ostry & Feldman (1993): Lineargeschwindigkeit der Hand (Endeffektor) bis 4 ms^{-1} , Winkelgeschwindigkeiten bis $+12 \text{ rads}^{-1}$,
- Latash (1994): Ellenbogenflexionen mit maximaler Geschwindigkeit,
- Martin (2006): Lineargeschwindigkeit des Endeffektors bis $2,7 \text{ ms}^{-1}$, Winkelgeschwindigkeiten bis 4 rads^{-1} ,
- Kistemaker, Soest & Bobbert (2007): Armmodell, Ellenbogengelenk Flexion und Extension mit maximaler Geschwindigkeit, bis $8,3 \text{ rads}^{-1}$, am Bewegungsende bis 2 rads^{-1} ,
- Martin et al. (2009): Lineargeschwindigkeit der Hand 2 ms^{-1} , beim Modell bis $2,5 \text{ ms}^{-1}$, Winkelgeschwindigkeiten am Modell bis 5 rads^{-1} .
- Pinter et al. (2012) (Abbildung 2): Ellenbogenflexion und -extension am Modell, mittlere Winkelgeschwindigkeit $6,6 \text{ rads}^{-1}$ (150° in $0,4 \text{ s}$), Geschwindigkeit der Störeinwirkung $+2,5 \text{ rads}^{-1}$.

Ihre Verifizierung und Ausweitung auf schnelle mehrgelenkigen Bewegungen ist jedoch relativ kompliziert, da eine Reihe untersuchungstechnischer Probleme gelöst werden müssen, z. B. im Zusammenhang mit den weitgehend unbekanntem Dämpfungseigenschaften des Muskel-Sehnen-Apparates bei hohen Bewegungsgeschwindigkeiten (Latash, 2016) einschließlich Änderungen im Aktivitätsverhalten der Antagonisten zur Vermeidung von Gelenkansschlägen bei den finalen Gelenkstabilisationen. Bei den sogenannten ballistischen Bewegungen (wie bei Sprints, Sprüngen, Würfungen) müssen die Bewegungskontrollmechanismen zudem die Zwischenspeicherung von Bewegungsenergie (als elastische Deformation von Muskelgewebe, Sehnen und Faszien) und deren Rückgewinnung (Rekuperation) als einen leistungsbestimmenden Faktor berücksichtigen, wobei die Beziehung zwischen Dehnung und Spannung linear oder nichtlinear sein kann (z. B. nichtlinear bei Gummibändern, bei Sehnen linear im mittleren, nicht-linear im unteren und oberen Dehnungsbereich). Die bisherige Forschung erfolgte bislang jedoch schwerpunktmäßig zur Steifheit von Muskeln und Gelenken der Arme und Beine (S. 26). Die Auswirkungen von Steifigkeitsveränderungen (d. h. der Widerstand gegen die elastische Verformung) der Antriebsglieder haben Braun, Howard und Vijayakumar (2011) mathematisch formuliert und an Wurfbewegungen eines

zweigenkigen Roboterarmes untersucht. Eine gleichzeitige Optimierung der Antriebsmomente und der Steifigkeit (und damit auch die Elastizität beeinflussend) der Antriebsglieder zeigte sich im Hinblick auf die Wurfweite als ein wirksamer Bewegungskontrollmechanismus. Eine derartige Optimierung tritt auch mit der Leistungsentwicklung bei erfolgreichen leichtathletischen Werfern ein: steigende „Maximalkrafftfähigkeiten“ widerspiegeln u. a. auch eine größere Körpersteifigkeit; durch schnellere vorbereitende Bewegungen bei höherer Körpermasse kann mehr kinetische Energie aufgebracht, gespeichert und zum Teil zurückgewonnen werden, was sich in einer Vergrößerung der Abfluggeschwindigkeit niederschlägt. Die mechanische Entsprechung ist das Bogenschießen: Mit steiferen Bögen kann weiter geschossen werden, dafür müssen sie aber auch stärker gespannt werden. Zunehmend schwerere Wurf- und Stoßgeräte (z. B. vom 80-g-Schlagball der Schüler bis zum 800-g-Männerspeer eine Verzehnfachung, vom 2-kg-Hammer der unter 14-jährigen Mädchen bis zum 4-kg-Hammer eine Verdopplung) erfordern größere und steifere „Bögen“ in disziplinspezifischer Ausprägung. Die Untersuchungen von Braun et al. (2011) vertiefen das Verständnis für einen „Energiepumpmechanismus“ zur effizienten Gerätebeschleunigung bei Wurfbewegungen. Auch gibt es Anhaltspunkte dafür, dass für die Energieübertragung in der menschlichen Gliederkette Teile der faszialen Strukturen von Bedeutung sind (z. B. Yucesoy, Koopman, Baan, Grootenboer & Huijing, 2003; Meijer, Baan & Huijing, 2006; Turrina, Martínez-González & Stecco, 2012). Am Modell ist der Rechenaufwand bei einer zugrunde gelegten EP-Kontrolle deutlich geringer im Vergleich zu einer Bewegungskontrolle eines vergleichbaren Systems, das auf der inversen Dynamik beruht (Gu & Ballard, 2006).

Die experimentellen Befunde zeigen, dass das motorische System auch kognitive Funktionen ausübt (Buccini & Riggio, 2006). Feldman et al. (2007) erwarten, dass zukünftige Untersuchungen die von ihnen vermutete Existenz von verschiedenen Typen von Neuronen, die die Bewegungskontrollparameter beeinflussen, bestätigen werden. Die von ihnen gegebene Empfehlung, zukünftig das Schwellenwert-Kontrollkonzept auf Wahrnehmung und Kognition zu erweitern, wurde inzwischen umgesetzt (Feldman, 2015). Auf die bisherige Entwicklung und die zu erwartende Weiterentwicklung der Schwellenwert-Theorie kann die Bemerkung Albert Einsteins bezogen werden, dass Probleme niemals mit derselben Denkweise zu lösen sind, durch die sie entstanden sind (Feldman & Levin, 2009; ein Gesamtüberblick von der EP-Theorie zur Theorie der referenten Konfiguration bei Feldman, 2015).

**„Wir nehmen wahr, um uns zu bewegen,
und wir bewegen uns auch, um wahrzunehmen.“**
James Jerome Gibson (1904-1979)

Die „Unkontrollierte-Mannigfaltigkeit“-Theorie

Die *uncontrolled manifold (UCM) theory* (Schöner, 1995; Scholz & Schöner, 1999; 2007; 2014; Latash, Scholz & Schöner, 2002) geht in der mathematischen Abstraktion davon aus, dass das ZNS (Gehirn) innerhalb seines mehrdimensionalen Arbeitsraumes (*state space*) in einem Teilraum von „unkontrollierter Mannigfaltigkeit“ der unabhängigen Grundvariablen agiert (z. B. Rotationen in den Hand-, Ellenbogen- und Schultergelenken), darin die Kovarianten dieser Grundvariablen organisiert und deren Variabilität einschränkt (das führt z. B. zu einer Gelenkstabilisierung). Mit der „unkontrollierten Mannigfaltigkeit“ liegen ein Theoriegebäude und ein Analysekonzept vor, um die Hypothesen zur Bewegungskontrolle (Verringerung der Redundanz, Nutzung der Abundanz, Bildung von Synergien) zu überprüfen (Latash, 2010a, s. u., Tabelle 1). Die Hypothese nimmt an, dass eine gewisse Bewegungsvariabilität immer gegeben ist. Dabei wird in erwünschte („gute“) und unerwünschte („schlechte“) Variabilität unterschieden (unerwünscht: verursacht Fehler im Endergebnis einer Bewegungshandlung, erwünscht: sichert Stabilität und gewährleistet das angestrebte Endergebnis). Mit einer Analyse der „unkontrollierten Mannigfaltigkeit“ kann die „Kontrollstruktur“ der Gelenkbewegung festgestellt werden. Es ist möglich, neuromuskuläre Synergien zu quantifizieren, wie sich beispielsweise variierende Gelenkstellungen auf eine

Zielgröße auswirken, welche Freiheitsgrade der Bewegung durch die Kontrollmechanismen eingeschränkt werden (konkrete Beispiele siehe Tabelle 1). Die zentralen Elemente dieser Methode sind ein mathematisch-physikalisch formuliertes Modell der zu analysierenden Bewegung (Grundlage: Gelenkwinkel), empirisch ermittelte Datensätze oder auch entsprechende von der Empirie abgeleitete Modellparameter sowie das darauf basierende Berechnen der Determinanten der sogenannten Jakobi-Matrix (S. 217). Die verschiedenen Möglichkeiten, diese Datensätze zu erlangen, haben auch Auswirkungen auf das Ergebnis (de Freitas & Scholz, 2009). Die Anwendung der Theorie der unkontrollierten Mannigfaltigkeit auf das Studium schnellkräftiger Ganzkörperbewegungen wie Sprünge und Würfe erfordert eine Weiterentwicklung der Analysemethoden. Dabei sollte nach Zatsiorsky (2016) zunächst von der Identifikation der „kompensierbaren“ und „nicht-kompensierbaren“ Variabilität ausgegangen werden. Darunter sind Variationen der elementaren Variablen zu verstehen, die entweder das Endergebnis nicht beeinflussen (die „kompensiert“ werden) oder es beeinflussen (die „nicht-kompensierbar“ sind). Als Beispiel für eine kompensierte Variabilität kann die Griffkraft gelten (z. B. verschiedene Griffarten beim Speerwerfen, Golf, Tischtennis). Die verringerte Kraft in einem Finger kann durch die Vergrößerung der Kraft in anderen Fingern „kompensiert“ werden, sodass sich summarisch keine Auswirkungen auf die Kraftübertragung auf das Gerät und dessen Kontrolle ergeben.

Das erfordert die Entwicklung einer speziellen mathematischen Methode, um die Größe der „kompensierten“ und „nicht-kompensierten“ Variabilität abschätzen zu können. Bislang müssen dazu die Wirkungen der elementaren Variablen addierbar sein. Bei einem Wurf oder Sprung sind Abfluggeschwindigkeit (Größe und Richtung) von Gerät oder Körper aber in ihrem Einfluss auf die Wurf- oder Sprungweite nicht additiv und auch nicht abhängig voneinander infolge der Funktion des menschlichen Bewegungsapparates. Beim leichtathletischen Wurf und Stoß wie auch beim Einwerfen eines Fußballes kann die größte Wurfweite bei einem Abwurfwinkel erreicht werden, der *unterhalb* des physikalischen Optimums liegt, da eine höhere Abfluggeschwindigkeit den Verlust durch den suboptimalen Abwurfwinkel ausgleichen und sogar überkompensieren kann (Bartoniets, 1987; Linthorne & Everett, 2008). In diesen Fällen kann der gegenwärtig genutzte mathematische Apparat nicht angewandt werden. Das sollte motivierend auf dessen Vervollkommnung in Anpassung an die sportartspezifischen Gegebenheiten wirken.

„Wundern der Bewegungskontrolle“, von denen in Einzelfällen berichtet wird, die manche Sportler aus eigener Erfahrung kennen und die (noch) nicht bewegungswissenschaftlich erforscht sind, kann so auf den Grund gegangen werden. Es wird immer wieder von Fällen des „absoluten Gefühls“ berichtet, durch das Athleten mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit voraussagen können, wie genau und wie weit der nächste Versuch sein wird. Andererseits kann auch das Gegenteil festgestellt werden: Janis Lusic, Olympia-Zweiter im Speerwerfen 1972, berichtete, dass er im Training den damaligen Weltrekord übertroffen habe, ohne jedoch nachempfinden zu können, wie diese Leistung möglich wurde (Zatsiorsky, 2016).

5. Relevanz für Theorie und Praxis des Leistungssports: Vertiefung der Erkenntnisse zur Struktur von Wettkampf- und Trainingsübungen sowie zu Trainingswirkungen

**„Das Gehirn allein denkt gar nicht.
Es ist immer die ganze Person, die etwas wahrnimmt.“**
(Thomas Fuchs, Psychiater, Heidelberg;
zitiert nach Schnabel, 2014)

Die in den „Zentralen Konzepten der Biomechanik und Bewegungskontrolle“ dargelegten Theoriepositionen und Forschungsergebnisse haben sowohl den Charakter von interdisziplinärer Grundlagenforschung als auch von anwendungsbereiter Forschung. Es soll mit Blick auf den Leistungssport auf Anwendungsbeispiele des Prinzips neuromuskulärer Synergien und der beiden in den Mittelpunkt gestellten Theorien zur Bewegungskontrolle von

Teil- und Ganzkörperbewegungen verwiesen werden. Aus deren Studium lassen sich sportartspezifische Forschungsansätze ableiten (s. o.). Einen entsprechenden Ansatz verfolgen Lippi, Ruffaldi, Zeli, Lagarde, Tripicchio & Avizzano (2011), mit Hilfe der Methode der unkontrollierten Mannigfaltigkeit die Wirksamkeit des Trainings im Rudern zu erhöhen (Ruffaldi, Filippeschi, Frisoli, Avizzano, Bardy & Gopher, 2009).

In dem bislang wohl am umfassendsten angelegten Forschungsansatz zur Kontrolle mehrgelenkiger Armbewegungen mit sieben Freiheitsgraden haben Martin, Scholz & Schöner (2009) eine Verbindung von Schwellenwert- bzw. Gleichgewichtspunkt-Theorie mit der Theorie der unkontrollierten Mannigfaltigkeit hergestellt. Die zentrale Stellung hat dabei ein neuronales Netzwerk, das den zeitlichen Verlauf des referenten Gleichgewichtspunktes vorgibt, der für das Zustandekommen der Gelenkbahnen verantwortlich ist. Das Zusammenführen der beiden Konzepte erforderte eine Umorientierung von Leistungs- zu Kontrollparametern (biometrische Werte, Parameter des Muskel-Gelenk-Modells, der zeitlichen Bewegungsstruktur und der neuronalen Dynamik zur Formierung der virtuellen Gelenkbewegungsbahnen). Diese Dynamik erhält Eingangsimpulse von einem neuronalen Zeitgeber, womit die Bewegungsbahn des Endeffektors bestimmt wird. Rückinformationen von den realen Gelenkbewegungen gehen in das neuronale Netzwerk ein. Die Grundlage für die Bewegungskontrolle bildet das *Prinzip der minimalen Wechselwirkung*⁹: Abweichungen von der mittleren Bewegungsbahn werden danach nur korrigiert, wenn sie das Erreichen der vorgegeben Zielstellung behindern („*minimal intervention principle: deviations from the average trajectory are corrected only when they interfere with task performance*“, Todorov & Jordan, 2002, S. 28; Todorov, 2004).

Eine Erkenntnis aus diesen Bewegungssimulationen war, dass die Gelenkgeschwindigkeiten einen beachtlichen Anteil an Eigenbewegungen aufweisen, die nicht in die Bewegung des Endeffektors eingehen. Diese haben einerseits mechanische Ursachen (geringer innerer Widerstand des Muskel-Gelenk-Systems), andererseits sind sie durch mehrgelenkig wirkende Muskeln bedingt. Auch zeigte sich, dass die Eigenbewegung beim Modell eine Folge der Rückkopplungen von der realen Dynamik in die Dynamik der virtuellen Gelenkbewegungsbahn war, wobei allerdings eine beträchtliche Komponente der Eigenbewegung durch die relativ schwerfällige neuromuskuläre Kontrolle hervorgerufen wurde. Das Ausmaß der Eigenbewegung liegt immerhin im Bereich von 30-50 % des überstrichenen Gelenkraumes. Das Feststellen derartiger Eigenbewegungen kann als Nachweis gelten, dass tatsächlich redundante Freiheitsgrade in die Bewegung des Endeffektors einbezogen sind (Martin et al., 2009). Das verdeutlicht die Potenzen eines derartigen interdisziplinären Ansatzes für den Erkenntnisgewinn zur Struktur und Bewegungskontrolle von Trainings- und Wettkampfübungen.

Bewegungskontrolle und motorische Einheiten

Die Autoren veranschaulichen das Phänomen der Vielzahl der motorischen Freiheitsgrade auch am Hennemannschen Größenprinzip für die Rekrutierung motorischer Einheiten (S. 179; Henneman, 1957; Henneman et al., 1965) gemäß dem Synergie-Verständnis von Bernstein und Turvey (s. o.). Wenig bekannt ist, dass Grundlagen für die Formulierung des Größenprinzips schon 1938 von dem Sherrington-Schüler Denny Brown zusammen mit J. B.

⁹ Als Grundlage dafür kann das aus der theoretischen Physik bekannte Prinzip der kleinsten Wirkung (Prinzip der stationären Wirkung, Hamiltonsches Prinzip, *principle of stationare action*, *principle of least action*) angesehen werden. Dabei handelt es sich um ein allgemein gültiges Naturgesetz, nach dem alle Prozesse extremal oder optimal ablaufen. Daraus folgen sowohl die Gesetze der klassischen Mechanik (Newtons Axiome) wie auch die der allgemeinen Relativitätstheorie. Entdeckt wurde das Prinzip der kleinsten Wirkung durch den vielseitigen französischen Wissenschaftler Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759). In seinem Einstands-Beitrag als Präsident der Königlich Preußischen Sozietät der Wissenschaften formulierte er in einer Abhandlung über Bewegungsgesetze das „*principe general*“: „Lors qu'il arrive quelque changement dans la Nature, la Quantité d'Action, nécessaire pour ce changement, est la plus petite qu'il soit possible“ (de Maupertuis, 1746, p. 290) – bei Änderungen in der Natur ist die dafür erforderliche Aktionsquantität so gering wie möglich. Die Wirkungsquantität (la quantité d'action) besteht bei de Maupertuis aus dem Produkt von Masse, Geschwindigkeit und Ortsveränderung des Körpers. L. Euler hat dieses Prinzip erklärt und es findet seinen Niederschlag in den Arbeiten von W. Hamilton, J. Lagrange, C. G. Jacobi und H. von Helmholtz (siehe auch Kneser, 1929).

Pennybacker gelegt wurden (Vilensky & Gilman, 1998; Fuglevand, 1998; Binder, 1998). Latash und Zatsiorsky (a. a. O.) unterstreichen, dass die Größe der motorischen Einheiten von drei Charakteristika bestimmt wird: vom Axondurchmesser (der die Übertragungsgeschwindigkeit maßgeblich beeinflusst; Hursh, 1939), von der Größe des Zellkörpers des α -Motoneurons und von der Anzahl der innervierten Muskelzellen. Darüber hinaus kann die Leitgeschwindigkeit *innerhalb der Muskelfasern* der motorischen Einheiten (*motor unit conduction time*) als ein vierter Parameter angesehen werden, der auch dem Größen-Prinzip unterliegt (Andreassen & Arendt-Nielsen, 1987). Das ist für das Training bedeutungsvoll, denn es ist nicht die „Größe“ der Motoneuronen schlechthin, die die Innervationsreihenfolge bestimmt: Binder, Bawa, Ruenzel und Henneman (1984) ermittelten, dass bei 97 % der untersuchten motorischen Einheiten des Soleus-Muskels vergleichbarer histochemischer Charakteristika die Innervation zuerst bei den motorischen Einheiten mit langsamerer axonaler Übertragungsgeschwindigkeit erfolgte. Von der Natur her langsame Muskelzellen können auch schnell kontrahieren, wenn sie von schnellen Axonen angesteuert werden (im Tierexperiment, z. B. Close & Hoh, 1968).

Wie schließlich Dideriksen und Farina (2013) an neuromuskulären Modellen mit Hilfe evolutionärer (genetischer) Algorithmen festgestellt haben, scheint das Größenprinzip *nicht* aus funktionellen¹⁰ Anforderungen der Kraftabstufung heraus zu wirken, wie bislang angenommen wurde. Es könnte eher einen indirekten Einfluss auf die Abstufung der neuromuskulären Krafterzeugung haben. Als wichtiges Ergebnis ihrer Modellberechnungen nennen sie das universelle Prinzip einer möglichst breit angelegten Innervation, verschoben zu niedrigen Schwellenwerten. Innervationsmuster, die nicht dem Größenprinzip folgen, können ebenso effektiv sein. Aus funktionaler Sicht kann das Größenprinzip als „Nebenprodukt“ eines Optimierungsprozesses bei der Krafterzeugung durch viele, hauptsächlich kleine Einheiten angesehen werden (Dideriksen & Farina, 2013). Das sind Gründe, um das Größenprinzip auch weiterhin als „provokatives Konzept“ anzusehen, wie Enoka und Douglas schon 1994 festgestellt haben. Es unterstreicht, im Training die Bewegungskontrolle (Bewegungsqualität mit sportart- bzw. disziplinspezifischen inneren sowie äußeren Bedingungen, Ansteuerung, Innervationscharakteristika im speziellen Krafttraining und im wettkampfnahen Training) und nicht die „Kraft“ schlechthin (den äußeren Widerstand) als entscheidende Belastungsgröße bei ungenügender Beachtung der bewegungsstrukturellen Anforderungen der Wettkampfübung vordergründig zu sehen. Für das Erzielen der beabsichtigten Trainingswirkungen sind auch für motorische Einheiten die **Erholungsintervalle** von Bedeutung. Héroux, Butler, Gandevia, Taylor und Butler (2015) haben gezeigt, dass beim dreiköpfigen Oberarmmuskel mehr als vier Minuten für eine **vollständige Wiederherstellung der Erregbarkeit** nach mehrminütiger andauernder Belastung (200-230 s) von relativ geringer Intensität erforderlich sind. Werden bei zunehmender Belastung gemäß dem Größenprinzip motorische Einheiten mit höherer Ansprechschwelle aktiv, so ist zu erwarten, dass sich der Erholungszeitraum verlängert. Dafür bieten Ergebnisse von Tierexperimenten Anhaltspunkte (Héroux, 2016).

Das Größenprinzip wirkt auch übergreifend auf Motoneurone mehrerer Muskeln, deren Innervation in einem Ensemble funktional organisiert ist und die in eine bestimmte motorische Aktivität eingebunden sind (Sokoloff, Siegel & Cope, 1999). Mit dem Motoneuronen-Ensemble umschreiben die Autoren wesentlich Aspekte dessen, was gegenwärtig als neuromuskuläre Synergie bezeichnet wird (s. o.).

Gandevia, Allen, Butler und Taylor (1996) sowie McNeil, Giesebrecht, Gandevia & Taylor (2011) ordnen in der Auswertung ihrer Untersuchungen mit submaximalen ermüdenden Kraftanforderungen dem **Willenseinsatz** („voluntary drive“) eine hohe Bedeutung bei der Aufrechterhaltung der Motoneuronen-Aktivität zu. Die Mechanismen, die bei maximalen Willkürkontraktionen zu einer zentralen Muskelermüdung führen, sind allerdings noch nicht vollständig geklärt (siehe den Überblick bei Sharples, Gould, Vandenberk & Kalmar, 2016).

¹⁰ Die Adjektive funktionell und funktional wurden bewusst in ihren etwas unterschiedlichen Bedeutungen gewählt. Es sind keine Synonyme.

Spinale (vom Motorcortex zum spinalen Motoneuronenpool) und supraspinale Bereiche (Aktivitätseinschränkungen aufwärts gerichtet zu den corticospinalen Motoneuronen) spielen dabei eine Rolle. Es gibt Hinweise darauf, dass die willkürliche Aktivierung nicht durch die zentrale Erregbarkeit limitiert wird (Kalmar & Cafarelli, 2006: Doppelblind-Studie am M. rectus femoris; Nachweis u. a. über den Einfluss von Coffein auf die Kraftentwicklung geführt). Die Bedeutung der Willensstärke für die maximale Kraftentwicklung lässt sich beispielhaft unterstreichen durch das Zustandekommen einer Maximalkraft-Testleistung (Einer-Wiederholungsmaximum) der damaligen Weltrekordlerin im Speerwerfen, Petra Felke (heute Trainerin). Sie erreichte im Reißen eine aktuelle Bestleistung von 100 kg (Körpergewicht um 74 kg, 1,72 m groß) *im sechsten (!) Versuch*. Normalerweise bricht ein Athlet nach zwei, allerhöchstens drei ungültigen Versuchen einen Maximalkrafttest ab. Der Autor war Augenzeuge dieser beeindruckenden Willensleistung einer Athletin (nach Ach, 1910: *Wirkungsgrad* des Willens). Neben solchen Einzelfällen gibt es zahlreiche experimentelle Belege zum Einfluss des Willens und der Motivation auf Kraft-, Schnellkraft- und Ausdauerleistungen (s. o.). Neuere Untersuchungen lassen die neuronalen Mechanismen derartiger leistungsfördernder, anspornender Anweisungen durch Trainer und/oder Trainingspartner besser verstehen.

Für die Dauer von 33 ms sichtbar gemachte Priming-Wortverbindungen (z. B. „strenge dich an, arbeite hart, bemühe dich“) als „bahnender Reiz“ in Verbindung mit dem deutlich sichtbaren motivierenden Ansporn („wunderbar, großartig, fantastisch, ausreichend, genieß es“) haben bei diesen Experimenten offenbar den „Hintergrund-Zustand“ des motorischen Systems verändert, indem das zur Zielstellung hinzugefügte Belohnungssignal mehr oder weniger unbewusst bis in den motorischen Cortex als Finalinstanz der Bewegungskontrolle gelangte. Ikai und Steinhaus gingen schon 1960 auf Grundlage ihrer Experimente davon aus, dass die Ausprägung maximaler Willkürkontraktionen durch psychologische Faktoren sowohl gehemmt wie auch erhöht werden kann.

Carpinelli (2008) hat auf Missverständnisse bei der Anwendung des Größenprinzips hingewiesen: Es kommt nicht auf die Last, sondern auf die Höhe der *Belastung* an (die körperliche Kraftanstrengung, den Krafteinsatz), wenn das Training auf die Rekrutierung der motorischer Einheiten abzielt. *Belastung* bedeutet (die erforderliche Bewegungsqualität vorausgesetzt) Widerstand (z. B. Hantelgewicht) *multipliziert mit der erreichten Geschwindigkeit*. Das Produkt stellt die äußere physikalische Leistung zum Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Geschwindigkeit der Last dar (Gleichung 1) und wird im Training der Gewichtheber als „Schnellkraftleistung“ (P_{SK}) bezeichnet (Richter, 1979; s. a. Zawieja, 2008). Die letzten Versuche einer Serie sind entscheidend, bei denen der körperliche Krafteinsatz maximal oder nahe am Maximum erfolgen kann (Carpinelli, 2008).

$$m \cdot g \cdot v_{\max} = P_{v_{\max}} \text{ (Einheit: W, Dimension: kg m s}^{-2} \text{ m s}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

m = Hantelmasse [kg]

g = Erdbeschleunigung [$9,81 \text{ ms}^{-2}$]

$v_{\max}$ = Maximum der Hantelgeschwindigkeit [ms^{-1}]

$P_{v_{\max}}$ = Leistung zum Zeitpunkt $t = v_{\max}$

Dem entsprechen bei leichtathletischen Werfern die Trainingskonzepte eines „GBT – Gewichtsbeschleunigungstrainings“ von Jürgen Schult (Weltrekordinhaber im Diskuswerfen und Leitender DLV-Bundestrainer Wurf/Stoß, zitiert nach Katzenbeißer, 2005, S. 3) und eines „geschwindigkeitsorientierten Krafttrainings“ im Hochleistungsbereich von Bondarchuk (1994) sowie im Nachwuchsbereich von Hofmann und Kullmann (1982). Damit kann eine Leistungssteigerung im Krafttraining der leichtathletischen Schnellkraftdisziplinen möglichst lange unter Vermeidung höchster Lasten (90-100 % der Bestleistung) erreicht werden. Lasten im Maximalbereich als entscheidende Belastungsgröße bleiben dann gemäß dieses Konzeptes entwicklungs wirksam dem Hochleistungsbereich vorbehalten, der möglichst lange anhalten soll. Entsprechend der Empfehlungen des Jugend-Rahmentrainingsplanes für die Wurfdisciplinen sollen bei 14- bis 15-jährigen Sportlern im Krafttraining noch keine Lasten

von mehr als 95 % der Bestleistung eingesetzt werden. Erst für 17- bis 19-jährige Werfer wird empfohlen, dass derart hohen Lasten etwa 10 % der Gesamtwiederholungen ausmachen (Killing, Ritschel, Salzer, Schult, Deyhle, Isele, Lehmann, Badura, Heinecke & Müller, 2011). Die Beschleunigungsleistungen vom Einsatz der Trainingsübung Reißen aus der aktuellen Vorbereitungsperiode (Februar 2016) einer leistungsstarken jungen Speerwerferin veranschaulichen Wirkungsaspekte des geschwindigkeitsorientierten Trainingskonzeptes: Beim Bewältigen der 30- und 35-kg-Hantel wurde eine höhere Belastung erzielt als bei 38 und 40 kg (Bestleistungen im Trainingsabschnitt beim Reißen 42,5 kg, im Speerwerfen [500 g] 43,80 m). Zu Beginn der Wettkampfperiode 2016 (acht Wochen nach den angeführten Testleistungen bei Realisierung des Konzeptes des geschwindigkeitsorientierten Krafttrainings unter Einbeziehung von beidarmigen Würfeln von Geräten mit 3 bis 10 kg Masse) erreichte diese Sportlerin sehr gute Leistungen um 47 m in zwei Wettkämpfen.

Obwohl Cronin, McNair und Marshall (2001) in der Auswertung ihres Trainingsexperimentes die Wirkung eines geschwindigkeitsorientierten Krafttrainings auf die Verbesserung sportartspezifischer Leistungen als „höchst fragwürdig“ bezeichnen (a. a. O., S. 168), bestätigen ihre Untersuchungsergebnisse klar die Hypothese, dass mit geringeren äußeren Widerständen bei höheren Bewegungsgeschwindigkeiten vergleichbare Trainingswirkungen erreicht werden können als beim Einsatz höherer, aber langsamer bewegter Widerstände. Zielgröße war in diesem Trainingsexperiment die Geschwindigkeit des Ballpasses bei Netzbball-Spielerinnen. Im Vergleich zur Krafttrainingsgruppe wurde bei der geschwindigkeitsorientiert trainierenden Gruppe die Last um 25 % verringert, die Bewegungsgeschwindigkeit dabei um 25 % erhöht (Belastungen bei 80 und 60% des Einer-Wiederholungsmaximums). In den beiden Trainingsgruppen konnte die Abwurfgeschwindigkeit um durchschnittlich 11 % gesteigert werden (12,4 % bei der einen, 8,8 % bei der anderen Gruppe – kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen diesen Werten).

Um die Hantel im Lastbereich von 20 bis 30 kg zur Hochstrecke zu bringen (d. h. im Bereich von 75 % der maximal zu bewältigenden Last), sind bereits Hantelgeschwindigkeiten von 2,2 ms⁻¹ ausreichend¹¹. Damit würde aber nur eine relativ geringe summarische äußere Belastung um 430 W (bei 20 kg) bis 650 W (bei 30 kg) abverlangt im Verhältnis zu der auch bei diesen Lasten möglichen Belastung von um 1000 W (wenn 25 kg auf 4,3 ms⁻¹ beschleunigt werden). Dabei kann davon ausgegangen werden, dass auf Grundlage des Größenprinzips für die Innervation motorischer Einheiten auch die Trainingswirkung (Kraftentwicklung) bei niedrigeren Bewegungsgeschwindigkeiten geringer ausfällt. Die Bewegungskontrolle sollte also darauf gerichtet sein, den relativ geringen Lasten eine möglichst große Geschwindigkeit zu erteilen, um so eine hohe neuromuskuläre Belastung auf Grundlage des Hennemanschen Größenprinzips zu sichern.

Bewegungskontrolle bei Würfeln

Bei Speerwerfern werden nach eigenen Untersuchungen (Weltmeisterschaften 2015) bei der finalen „Unterarmschleuder“ (Streckung im Ellenbogengelenk in 0,0125 s unmittelbar vor dem Abwurf) Winkelgeschwindigkeiten zwischen 35 und 42 rads⁻¹ (Th. Röhler/GER, 87,41 m; J. Yego/KEN, 92,92 m – 800-g-Speer) bzw. 42 und 56 rads⁻¹ (K. Molitor/GER, 67,69 m; Lv H.H./CHN; Ch. Hussong/GER, 65,92 m – 600-g-Speer) erreicht. Analysen von Baseball-Pitchern (Berkson, Aylward, Zachazewsky, Paradiso & Gill, 2006) haben Spitzengeschwindigkeiten bei der Ellenbogengelenkstreckung bis zu 79 rads⁻¹ ergeben (Masse des Baseballs 142-149 g bzw. 5,00-5,25 Unzen). Die Schulterinnenrotation kann mit bis zu extremen 175 rads⁻¹ erfolgen (Dillman, Fleisig & Andrews, 1993; Werner, Murray,

¹¹ Bei Gewichthebern mit einem hohen sporttechnischen Niveau reichen in Abhängigkeit von der Gewichtsklasse (Körpergröße) maximale Hantelgeschwindigkeiten im Bereich um 1,8 ms⁻¹, um das Gerät zur Hochstrecke zu bringen (in der tiefen Hocke). Speerwerfer brauchen dagegen eine höhere Geschwindigkeit, da die Hantel infolge gewisser sporttechnischer Unvollkommenheiten und Besonderheiten (betreffend Hüftstreckung, Schulterzug, Dauer des Umgruppierens, Beenden der Hebung in einem relativ hohen Ausfallschritt und nicht in der für Gewichtheber effizienten tiefen Hocke) höher gezogen werden muss.

Hawkins & Gill, 2002). Diese hohen Bewegungsgeschwindigkeiten in den Gelenken werden möglich durch die Rekuperation zwischengespeicherter Energie der elastischen Verformung von Teilen der Muskulatur, der Sehnen und Faszien („Katapult- oder Bogen-Effekt“). Die Ausprägung der sogenannten „Bogenspannung“ des Körpers kann beim Speerwerfen als „Momentaufnahme“ dieses Prozesses angesehen werden.

Für eine wirksame Bewegungskontrolle ist es nutzbringend für Trainer wie Athleten, einen Zugang zum virtuellen „inneren Abbild“ der Bewegungen zu finden. Eine Möglichkeit bietet die persönlich geprägte Zeichensprache. Gezeichnete „Schlüsselpositionen“ von Wettkampfbewegungen können Anhaltspunkte bieten zu verstehen, wie der Sportler sich selbst in der Bewegung sieht. Abbildung 6 zeigt dazu drei Beispiele. Mögliche Diskrepanzen zwischen eigenem Anspruch und den vorhandenen Zeichenfertigkeiten können bei den Darstellungen Bedeutung haben, sind aber hier nicht beurteilbar. Zeichnung A wurde von der Sportlerin ohne Aufforderung angefertigt. Die Linienführung lässt erkennen, dass sie klare Vorstellungen hat zur Ausprägung der leistungsrelevanten Körperposition. Ihre Abwurfgestaltung hinsichtlich der eingenommenen Körperhaltungen ist relativ stabil in Training und Wettkampf. Die Wettkampfanalysen auf Grundlage von High-speed-Videoaufzeichnungen zeigen eine hohe Annäherung der gezeichneten Position mit der realen Bewegung. Das beim realen Wurf gebeugte Stemmbein hat die Sportlerin zieltechnikgerecht gestreckt dargestellt. Wie die Abbildung erkennen lässt, gelingt ihr im Training bereits eine hohe Zieltechnik-Annäherung bei diesem Bewegungselement. Auch sind die Körperproportionen stimmig dargestellt. Ihr Abwurf mit hoher Geschwindigkeit erfolgt allerdings suboptimal flach (wie in der Zeichnung mit einem mittlerem Speerwinkel zur Horizontalen von 30° treffend dargestellt). Die Mehrfachüberzeichnung der Speerposition kann Ausdruck der Suche nach dem optimalen Abwurfwinkel sein. Bei den Zeichnungen B und C wurde den Sportlerinnen die Aufgabe gestellt, die aus ihrer Sicht wichtigste Körperposition bei ihrer Wettkampfübung zu veranschaulichen. Bild B spiegelt in der mehrfachen Überzeichnung des Wettkampfgerätes die vorhandenen Probleme bei der Speerkontrolle wider. Der Speer ist relativ groß und dominant dargestellt. Das kann auf das Bemühen um eine bessere Kontrolle hinweisen. Die verzerrten Körperproportionen mit der Betonung der Körpermitte sind als Fokussierung auf den „Spannungsaufbau“ denkbar. Unsicherheiten sind in noch größerem Maße in Zeichnung C ausgedrückt. Die Probleme, die die Sportlerin hat, die Wurfbewegung entsprechend der Vorgaben zu kontrollieren, spiegeln sich in den mehrfach überzeichneten Positionen beider Beine und des Rumpfes, der keinen „Spannungsaufbau“ erkennen lässt, wider. Das Wettkampfgerät wurde gar nicht gezeichnet. Klare Vorstellungen bestehen demgegenüber zur Wurfarmhaltung in der Abwurfvorbereitung (der nach hinten gestreckte Arm), auch wenn die Sportlerin diese Vorstellung nicht realisieren kann und den Arm im Ellenbogengelenk übermäßig anbeugt (möglicherweise auf reflektorischer Grundlage). Die Zeichnung zeigt im Gegensatz zu den verbalen Äußerungen, dass die Bewegungsvorstellungen noch nicht ausreichend entwickelt sind. Ursachen können in unzureichend ausgebildeten allgemeinen und sportartspezifischen Bewegungserfahrungen gesehen werden, die bis in die Kindheit und frühe Jugend zurückreichen. Diese zeigen in der Gesamtkoordination von Beinen, Rumpf und Armen (z. B. beim Sprint, Turnen, bei Sportspielen) Defizite. Auch ist die Fähigkeit, vorgeführte Bewegungsabläufe auszuführen (bei angenommener Nutzung des Spiegelneuronensystems), nur gering ausgeprägt. Bei der Ergründung der Ursachen für derartige Unterschiede in den individuellen Bewegungsmustern könnten Synergieanalysen erhellen, ob entsprechende elementare „neuromuskuläre motorische Bausteine“ (Synergien) vorhanden sind und wie sie, wenn ausgebildet, durch erlernte Muskelsynergien ergänzt und in komplexe Bewegungsabläufe eingebunden werden könnten.

6. Ausblick

Biomechanics und Motor Control – Defining Central Concepts lässt erkennen, dass sich die Vorstellungen, Hypothesen und Erkenntnisse zur Bewegungskontrolle im andauernden Prozess der Überprüfung und Weiterentwicklung befinden. Es zeigt sich bereits bei solchen einfach anmutenden Finger-, Hand- und Armbewegungen, wie kompliziert und komplex die

Bewegungskontrollmechanismen sind. Auf Grundlage von Konzepten zur Bewegungskontrolle bei Mensch und Tier ist es gelungen, in der Robotik technische Lösungen zu entwickeln, deren Leistungsfähigkeit mit der menschlichen hinsichtlich Geschwindigkeit und Bewegungspräzision vergleichbar ist (siehe auch Santello et al., 2016; Wu & Asada, 2016). Das lässt erwarten, dass sich zukünftig die Kontrollprinzipien verstärkt in Forschungsansätzen wiederfinden werden und dass sich daraus verstärkt sportrelevante Forschungsansätze und trainingspraktische Ableitungen treffen lassen, wie beispielsweise im Geräteturnen durch Frère und Hug (2012). Allerdings bilden neuromuskuläre Synergien und die damit im Zusammenhang stehende Bewegungsredundanz und -abundanz (Kontrolle der Freiheitsgrade) nicht die alleinigen Bewegungskontrollstrategien. Bizzi und Heung (2013) unterstreichen, dass sowohl monosynaptische Dehnungsreflexe wie auch Rückkopplungsmechanismen die Gliederbewegungen beeinflussen. Mit entsprechendem Training ist es sogar möglich, einzelne (!) motorische Einheiten willkürlich anzusprechen (Experimente von Basmajian, 1966). Das unterstreicht die enorme Flexibilität des motorischen Systems.

Die „zentralen Konzepte“ reflektieren einen breiten Ausschnitt aus dem Wissenstand zur Bewegungskontrolle. Wie die Autoren zeigen und wie die weiterführende Fachliteratur erkennen lässt, sind Analysen der Haltungskontrolle und solch einfach erscheinender Bewegungen von Armen, Händen, Fingern und Füßen schon kompliziert genug und führen an die Grenzen der gegenwärtigen Forschungsmethoden. Der Trainer wünscht sich sicher, dass er beim Studium der „zentralen Konzepte“ einen Bezug zu seiner Sportart herstellen kann oder zumindest zu grundlegenden Bewegungen wie dem Laufen, Springen, Werfen. Die den Autoren als Beispiel dienenden Ganzkörperbewegungen beschränken sich auf Stehen (Haltungskontrolle), Gehen und Arm-Hand-Bewegungen im Stand. Ein engerer Bezug zum Sport ist bei weiterführenden Arbeiten mit dem Erlernen eines Frisbee-Wurfes und dem Schießen mit einer Laserpistole im Sitz aus drei Positionen gegeben. Mit dem Vorstellen der „Konzepte von Biomechanik und Bewegungskontrolle“ wurde beabsichtigt, Trainer und Bewegungswissenschaftler für aktuelle Probleme der Biomechanik und Bewegungskontrolle zu sensibilisieren, denn auch für die Arbeit des Trainers mit den Athleten gilt:

**Auf dem Feld der Beobachtungen hat nur
der vorbereitete Geist eine Chance.**

(Louis Pasteur, 1854;

zit. in Vallery-Radot, 1919, S. 76)

Der Autor dankt M. L. Latash (College State/PA), J. Kuchler (Leipzig) und V. M. Zatsiorsky (Sunny Vale/CA) für hilfreiche Diskussionen bei der Erarbeitung dieses Beitrages.

Literatur

Ach, N.. (1910). *Über den Willensakt und das Temperament: Eine Experimentelle Untersuchung*. Leipzig: Quelle & Meyer.

Acharya, S. & Shukla, S. (2012). Mirror neurons: Enigma of the metaphysical modular brain. *Journal of the National Science, Biology and Medicine*, 3 (2), 118-124. [Elektronische Version] Zugriff am 24. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3510904/>.

Adolph, K.E., Cole, W.G., Komati, M., Garciguire, J.S., Badaly, D., Lingeman, J.M., Chan, G. & Sotsky, R.B. (2012). How Do You Learn to Walk? Thousands of Steps and Dozens of Falls Per Day, *Psychological Science*, 23 (11), 1387-94. [Elektronische Version] Zugriff am 21. Januar 2016 unter

<http://psych.nyu.edu/adolph/publications/Adolph%20EtAl%20HowDoYouLearnToWalk.pdf>.

Aflalo, T. N. & Graziano, M. S. A. (2006). Partial tuning of motor cortex neurons to final posture in a free-moving paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103 (8), 2909-2914. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1413833/>.

Afzali, H.H.A., Perrier, P. & Payan, Y. (2013). The Distributed Lambda (l) Model (DLM): A 3-

D, Finite-Element Muscle Model Based on Feldman's I Model; Assessment of Orofacial Gestures. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 56, 1909-1923. [Elektronische Version] Zugriff am 15. März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/286479314_Should_the_Lambda_I_Remain_Silent; http://membrestimc.imag.fr/Yohan.Payan/papers/Nazari_2013_journal_of_speech_language_and_hearing_research.pdf

Alnajjar, F., Itkonen, M., Berenz, V., Tournier, M., Nagai, C. & Shimoda, S. (2015). Sensory synergy as environmental input integration. *Frontiers in Neuroscience*, 8, 43689. [Elektronische Version] Zugriff am 20. März 2016 unter <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnins.2014.00436/full>

Alessandro, C., Delis, I., Nori, F., Panzeri, S. & Berret, B. (2013). Muscle synergies in neuroscience and robotics: from input-space to task-space perspectives. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 19. April 2013. Zugriff am 13. Februar 2016 unter <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2013.00043/full>.

Ambike, S., Paclet, F., Zarsiorsky, V.M. & Latash, M.L. (2014) Factors affecting grip force: Anatomy, mechanics, and referent configurations, *Experimental Brain Research*, 232 (4), 1-13. [Elektronische Version] https://www.researchgate.net/publication/259985636_Factors_affecting_grip_force_Anatomy_mechanics_and_referent_configurations.

Andreassen, S. & Arendt-Nielsen, L. (1987). Muscle fibre conduction velocity in motor units of the human anterior tibial muscle: a new size principle parameter. *Journal of Physiology*, 391, 561-571. [Elektronische Version] <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1113/jphysiol.1987.sp016756/epdf>; <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1192232/>.

Anson, J.G. & Bird, Y.N. (1993). Neuromotor programming: Bilateral and unilateral effects on simple reaction time, *Human Movement Science*, 12, 1-2, 37-50.

Ambike, S., Mattos, D., Zatsiorsky, V.M. & Latash, M.L. (2016). Synergies in the space of control variables within the equilibrium-point hypothesis. *Neuroscience*, (315), 150-61.

Arimoto, S. (2000). *Principle of superposition in design of feedback control signals for dexterous multi-fingered robot hands*. Conference Proceedings, February 2000, Conference: Science and Technology, Volume 3. https://www.researchgate.net/publication/3861854_Principle_of_superposition_in_design_of_feedback_control_signals_for_dexterous_multi-fingered_robot_hands.

Arimoto, S., Tahara, K., Yamaguchi, M., Nguyen, P. & Han, H. (2001) Principles of superposition for controlling pinch motions by means of robot fingers with soft tips. *Robotica* 19 (1), 21-28.

Asaka, A., Wang, Y., Fukushima, J. & Latash, M.L. (2008). Learning Effects on Muscle Modes and Multi-Mode Postural Synergies, *Experimental Brain Research*, 184 (3), 323-338. Zugriff am 21. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2556403/>.

Asatryan, D.G. & Feldman, A.G. (1965). Функциональная настройка нервной системы при управлении движениями и поддержании позы: i. механографический анализ работы сустава при выполнении позных задач (Functional tuning of the nervous system with control of movements or maintenance of a steady posture: I. Mechanographic analysis of the work of the joint on execution of a postural tasks.) *Biophysika*, 10, 925-935.

Balasubramaniam, R. & Michael T. Turvey, M.T. (2004). Coordination Modes in the Multisegmental Dynamics of Hula Hooping, *Biological Cybernetics*, 90 (3), 176-190.) [Elektronische Version] Zugriff am 10. April 2016 unter https://www.tau.ac.il/~kantor/QUIZ/03/hulahoop_paper.pdf.

Balasubramaniam, S., Klein, J. & Burdet E. (2010). Robot-assisted rehabilitation of hand function. *Current Opinion in Neurology*, 23 (6), 661-670.

Bartonietz, K. (1987). *Zur sportlichen Technik der Wettkampfübungen und zur Wirkungsrichtung ausgewählter Trainingsübungen in den Wurf- und Stoßdisziplinen*. Leipzig, FKS, Diss. B.

Bartonietz, K. (1992). Effektivität im Krafttraining. *Leistungssport*, 22 (5), 5-14.

Bartonietz, K. (2008a) „Gehirn, das [Subst.]: ein Organ, mit dem wir denken, daß wir

denken.“ Teil 1. *Leistungssport*, 28 (2), 35-44.

Bartonietz, K. (2008b) „Gehirn, das [Subst.]: ein Organ, mit dem wir denken, daß wir denken.“ Teil 2. *Leistungssport*, 28 (3), 55-62.

Bartonietz, K. (2008c) „Gehirn, das [Subst.]: ein Organ, mit dem wir denken, daß wir denken.“ Teil 3. *Leistungssport*, 28 (4), 55-62.

Bartonietz, K. & Schwuchow, H. (2015). Werbung für den Speerwurf. *Leichtathletiktraining*, 26 (11), 4-13.

Bartonietz, K. (2016). Den Speer zum Fliegen bringen – Was Trainer und Athleten über den Speerflug wissen sollten. *Leichtathletiktraining*, 27 (4), 26-33.

Bailey, J.A., Zatorre, R.J. & Penhune, V.B. (2014). Early Musical Training Is Linked to Gray Matter Structure in the Ventral Premotor Cortex and Auditory-Motor Rhythm Synchronization Performance. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26 (4), 755-767. [Elektronische Version] Zugriff am 29. März 2016 unter http://www.mitpressjournals.org/doi/full/10.1162/jocn_a_00527#.Vvl_yKuBSAI.

Basmajian, J.V. (1963). Control and Training of Individual Motor Units. *Science*, 141, (3579), 440-441.

Beckmann, J., Gröpel, P. & Ehrlenspiel, F. (2013). Preventing Motor Skill Failure Through Hemisphere-Specific Priming: Cases From Choking Under Pressure. *Journal of Experimental Psychology*, 142 (3), 679-691. Zugriff am 17. Januar 2016 unter <https://www.apa.org/pubs/journals/releases/xge-142-3-679.pdf>.

Behm, D.G., Bradbury, E.E., Haynes, A.T., Hodder, J.N., Leonard, A.M. & Paddock, N.P. (2006). Flexibility is not related to stretch-induced deficits in force or power. *Journal of Sports Science and Medicine*, 5, 33-42, [Elektronische Version] Zugriff am 4. März 2016 unter <http://jsportscimed.org/vol5/n1/4/v5n1-4pdf.pdf>.

Bennett, S.J. (2003). Comment on Dynamical Systems Theory: a Framework for Performance-Oriented Sports Biomechanics Research. *sportsmedicine*, 7. Zugriff am 11. Februar 2016 unter <http://www.sportsmedicine.com/2003/index.html>.

Berkinblit, M.B., Gelfand, I.M. & Feldman, A.G. (1986). A model for the control of multijoint movements. *Biofizika*, 31, 128-138 (in Russisch).

Berkson, E., Aylward, R., Zachazewsky, J., Paradiso, J. & Gill, T.J. (2006). IMU ArrayS: The Biomechanics of Baseball Pitching. *Orthopaedic Journal at Harvard Medical School*, 8, 90-94. [Elektronische Version] Zugriff am 15. April 2016 unter <http://resenv.media.mit.edu/pubs/papers/2006-06-IMU-Baseball.pdf>.

Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation of Movement*. London: Pergamon Press.

Binder, M.D., Bawa, P., Ruenzel, P. & Henneman, E. (1984). Does orderly recruitment of motoneurons depend on the existence of different types of motor units? *Neuroscience Letters*, Volume 36 (1), 55-58. [Elektronische Version] Zugriff auf die Zusammenfassung am 13. Januar 2016 unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304394083904858>.

Binder, M.D. (1998). Henneman's Size Principle: the right name. *Science Magazine*, 281, 919. [Elektronische Version] Zugriff am 2. Februar 2016 unter http://www.ganino.com/games/Science/science%20magazine%201997-1998/root/data/Science%201997-1998/pdf/1998_v281_n5379/p5379_0919a.pdf

Bizzi, E. & Cheung, C.K. (2013). The neural origin of muscle synergies. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7 (Article 51), 1-6. Zugriff am 21. Januar 2016 unter <http://web.mit.edu/bcs/bizzilab/publications/bizzi2013.pdf>; <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2013.00051/full>

Black, D.P1., Smith, B.A., Wu, J. & Ulrich, B.D. (2007). Uncontrolled manifold analysis of segmental angle variability during walking: preadolescents with and without Down syndrome. *Experimental Brain Research*, 183 (4), 511-521.

Blagouchine, I.V. & Moreau, E. (2010). Neural-Network-Based Internal Model with Constraints, *IEEE Transactions on Robotics*, 26 (1), 142-149. https://www.researchgate.net/publication/224080014_Control_of_a_Speech_Robot_via_an_Optimum_Neural-Network-Based_Internal_Model_With_Constraints.

Bondarchuck, A. P. (1994). Experiments with strength development models. *Modern Athlete*

& Coach, 32(4), 15-18.

Bondarchuck, A. P. (1994). Experiments with strength development models. *Modern Athlete & Coach*, 32 (4), 15-18.

Bourke, T.C., Coderre, A.M., Bagg, S.D., Dukelow, S.P., Norman, K.E., Scott, S.H. (2015). Impaired corrective responses to postural perturbations of the arm in individuals with subacute stroke. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 1, 7. Zugriff am 3. März unter <http://jneuroengrehab.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-0003-12-7>.

Bottini, G., Cocoran, R., Sterzi, R., Paulescu, E. & Scarpa. P. (1994). The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A positron emission tomography activation study. *Brain*, 117, 1241–1253. [Elektronische Version] Zugriff am 9. Januar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/15377772_Bottini_G_et_al_The_role_of_the_right_hemisphere_in_the_interpretation_of_figurative_aspects_of_language_A_positron_emission_tomography_activation_study_Brain_117_1241-1253.

Broccard, F.D., Mullen, T., Chi, Y.M., Peterson, D., Iversen, J.R., Arnold, M., Kreutz-Delgado, K., Jung, T.-P., Makeig, S., Poizner, H., Sejnowski, T. & Cauwenberghs, G. (2014). Closed-Loop Brain-Machine – Body Interfaces for Noninvasive Rehabilitation of Movement Disorders. *Annals of Biomedical Engineering*, 42, (8), 1573-1593. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4099421/>.

Brown, D. & Pennybacker, J.B. (1938). Fibrillation and fasciculation in voluntary muscle, *Brain*, 61, 311-312. first page of this study: <http://brain.oxfordjournals.org/content/61/3/311>.

Braun, D.J. Howard, M. & Vijayakumar, S. (2011). Exploiting Variable Stiffness in Explosive Movement Tasks. Conference: Robotics: Science and Systems VII, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, June 27-30, 2011. [Elektronische Version] Zugriff am 15. April 2016 unter <http://www.inf.kcl.ac.uk/staff/mhoward/pdf/Braun2011.pdf>; https://www.researchgate.net/publication/221344610_Exploiting_Variable_Stiffness_in_Explosive_Movement_Tasks.

Brunnstrom, S. (1970). *Movement Therapy in Hemiplegia: A Neurophysiological Approach*. New York, NY: Harper & Row.

Buccioni, G. & Riggio, L. (2006). The role of the mirror neuron system in motor learning. *Kinesiology*, 38 (1), 1-13. [Elektronische Version] Zugriff am 24 März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/27189852_The_role_of_the_mirror_neuron_system_in_motor_learning.

Buckthorpe, M.W., Pain, M. T.G. & Folland, J.P. (2013). Bilateral Deficit in Explosive Force Production Is Not Caused by Changes in Agonist Neural Drive, *PLoS One*, 8 (3), e57549. [Elektronische Version] Zugriff am 12. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3589403/>.

Burke, R.E. (2002). Some unresolved issues in motor unit research. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 508, 171-178.

Bührlé, M. & Schmidbleicher, D. (1981). Komponenten der Maximal -und Schnellkraft – Versuch einer Neustrukturierung auf Basis empirischer Ergebnisse. *Sportwissenschaft*, 11, 11-27.

Butz, M. & van Ooyen, A. (2013). A simple rule for dendritic spine and axonal bouton formation can account for cortical reorganization after focal retinal lesions. *PLoS Computational Biology*, 9(10): e1003259. Zugriff a, 14. April 2016 unter <http://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1003259>.

Byadarhaly, K.V., Perdoor, M.C. & Minai, A.A. (2012). A modular neural model of motor synergies. *Neural Networks*, 32, 96-108. [Elektronische Version] Zugriff am 14. April unter http://www.ece.uc.edu/~aminai/papers/byadarhaly_synergies_NN12.pdf.

Capaday, C., Ethier, C. Van Vreeswijk, C. & Darling, W.G. (2013). On the functional organization and operational principles of the motor cortex. *Frontiers in Neural Circuits*, 7, 66. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3629310/>

Carlin, J. (27. März 2010). Lionel Messi: Magic in his feet. *Independent*. [Elektronische Version] Zugriff am 18. März 2016 unter

<http://www.independent.co.uk/news/people/profiles/lionel-messi-magic-in-his-feet-1928768.html>

Carpinelli, R.N. (2008). The size principle and a critical analysis of the unsubstantiated heavier-is-better recommendation for resistance training. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 6 (2), 67-86.

Carroll, T.J., Herbert, R.D., Munn, J., Lee, M. & Gandevia, S.C. (2006). Contralateral effects of unilateral strength training: evidence and possible mechanisms. *Journal of Applied Physiology*, 101 (5), 1514-1522. [Elektronische Version] Zugriff am 7. März 2016 unter <http://jap.physiology.org/content/101/5/1514.full.pdf+html>.

Carson, R.G. & Riek, S. (2001). Changes in muscle recruitment patterns during skill acquisition. *Experimental Brain Research*, 138, 71-87.

Casellato, C. Tagliabue, M., Pedrocchi, A., Papaxanthis, C., Ferrigno, G. & Pozzo, T. (2012). Reaching while standing in microgravity: a new postural solution to oversimplify movement control. *Experimental Brain Research*, 216 (2), 203-15. [Elektronische Version] Zugriff am 21. Januar 2016 unter

Celichowski, J., P Krutki, P. & Bichler, E. (1996). Axonal conduction velocity of motor units of rat's medial gastrocnemius muscle. *Journal of Physiology*, 90 (2), 75-78. [Elektronische Version] Zugriff am 3. März 2016 unter

https://www.researchgate.net/publication/14341879_Axonal_conduction_velocity_of_motor_units_of_rat%27s_medial_gastrocnemius_muscle.

Challis, J.H. (1998). An investigation of the influence of bi-lateral deficit on human jumping. *Human Movement Science*, 17, 307-325.

Cheron, G. (2015). From biomechanics to sport psychology: The current oscillatory approach. *Frontiers in Psychology*, 6, 169. [Elektronische Version] Zugriff am 15. Januar 2015 unter

https://www.researchgate.net/publication/283975571_From_biomechanics_to_sport_psychology_The_current_oscillatory_approach.

Chu, D.A. & Myer, G. (2013). Plyometrics. Champaign/Illinois: Human Kinetics.

Chvatal, S.A. & Ting, L.H. (2013). Common muscle synergies for balance and walking. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7, 48. [Elektronische Version] Zugriff am 14. April 2016 unter <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2013.00048/full>; <http://dx.doi.org/10.3389/fncom.2013.00048>.

Close, R. & Hoh, J. F. (1968). Effects of nerve cross-union on fast-twitch and slow-graded muscle fibres in the toad. *The Journal of Physiology*, 198 (1), 103-125. [Elektronische Version] Zugriff am 14. Januar 2016 unter <http://onlinelibrary.wiley.com/store/10.1113/jphysiol.1968.sp008596/asset/tjp19681981103.pdf;jsessionid=3054FFA76B29211034CCB0DEADFAABDB.f02t03?v=1&t=ijdg2fhp&s=66bf8448202bcbae4a9e2f50f2fc71fe04903acc>.

Coombes, S. [2014], [14], [Januar] *Neural fields. Scholarpedia* 1 (6) 1373. Zugriff am 19. Januar 2016 unter http://www.scholarpedia.org/article/Neural_fields.

Cronin, J., McNair, P.J. & Marshall, R.N. (2001). Velocity specificity, combination training and sport specific tasks. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 4 (2), 168-178.

Cruz Ruiz, A.L., Pontonnier, C., Levy, J. & Dumont, G. (2015). Motion Control via Muscle Synergies: Application to Throwing. Conference Motion on Games *MIG15, Conference Proceedings Paris*, 8.-16. November 2015. Zugriff am 18. April 2016 unter <https://mig2015.inria.fr/>; <https://hal.inria.fr/hal-01205162/document>.

Cullen, K.E. & Van Horn, M.R. (2011). The neural control of fast vs. slow vergence eye movements. *European Journal of Neuroscience*, 33, 147-154. [Elektronische Version] Zugriff am 30. März 2016 unter http://www.mcgill.ca/vestibular-gazecontrol-lab/files/vestibular-gazecontrol-lab/7_cullen_van_horn_2011.pdf.

D'Avella, A. (2009) Muscle synergies. In M.D. Binder, N. Hirokawa & U. Windhorst (Hrsg.) *Encyclopedia of Neuroscience*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 205-212.

D'Avella, A. & Lacquaniti, F. (2013). Control of reaching movements by muscle synergy combinations. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 19 April 2013. [Elektronische Version] Zugriff am 14. April unter

<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2013.00042/full>.

D'Avella, A., Saltiel, P. & Bizzi, E. (2003). Combinations of muscle synergies in the construction of natural motor behavior. *Nature Neuroscience* 6 (3), 300-308. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/10921359_Combinations_of_muscle_synergies_in_the_construction_of_natural_motor_behavior_Nat_Neurosci?_iepl%5BviewId%5D=fBfeqCa5j3rLqfk7bPo2QIFQc8RMBgGHHsVQ&_iepl%5Bcontexts%5D%5B0%5D=pdppi&_iepl%5Bdata%5D%5Bmilestone%5D=experimentMilestoneClickedToPublicationFromCitationWithFulltext&_iepl%5BinteractionType%5D=publicationView.

de Freitas, S.M.SF. & Scholz, J.P. (2009). A comparison of methods for identifying the Jacobian for uncontrolled manifold variance analysis. *Journal of Biomechanics*, 43 (4), 775-777.

De Luca, C.J. & Hostage, E.C. (2010). Relationship Between Firing Rate and Recruitment Threshold of Motoneurons in Voluntary Isometric Contractions. [Elektronische Version] *The Journal of Neurophysiology*, 104 (2), 1034-1046. Zugriff am 30. März unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2934917/>.

De Luca, C.J. & Contessa, P. (2015). Biomechanical benefits of the Onion-Skin motor unit control scheme. *Journal of Biomechanics* (2), 195-203. [Elektronische Version] Zugriff am 31. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4295621/>

de Maupertuis, P.L.M. (1746). Les Loix du mouvement et du repos déduites d'un principe métaphysique, *Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres de Berlin, Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles Lettres (1746)* Berlin: A. Haude, Libraire de la Cour & de l'Académie Royale. 1748, (267-294). [Elektronische Version] Zugriff am 5. März 2016 unter [https://fr.wikisource.org/wiki/Histoire_de_l%27Académie_Royale_des_Sciences_et_des_Belles_Lettres_\(1746\)](https://fr.wikisource.org/wiki/Histoire_de_l%27Académie_Royale_des_Sciences_et_des_Belles_Lettres_(1746)).

Demos, A.P., Chaffin, R. & Kant, V. (2014). Toward a dynamical theory of body movement in musical performance. *Frontiers in Psychology*, veröffentlicht am 21. Mai 2015. [Elektronische Version] Zugriff am 15. Januar 2016 unter http://digitalcommons.uconn.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1030&context=libr_oa

Derry, D. (13. Juni 2010). High Performance Sport - all in the mind? *University World News - Global Edition*, 00409, Zugriff am 24. April 2016 unter www.universityworldnews.com/article.php?story=20100611213245491.

Dewald, J. P., and Beer, R. F. (2001). Abnormal joint torque patterns in the paretic upper limb of subjects with hemiparesis. *Muscle & Nerve* 24, 273-283.

Dideriksen, J.L., Negro, F., Enoka, R.M. & Farina, D. (2012). Motor unit recruitment strategies and muscle properties determine the influence of synaptic noise on force steadiness. *Journal of Neurophysiology*, 107 (12), 3357-3369. <http://jn.physiology.org/content/107/12/3357>.

Dideriksen, J. L. & Farina, D. (2013). Motor unit recruitment by size does not provide functional advantages for motor performance. *Journal of Physiology*, 5, (59, Pt 24), 6139-6156. Zugriff am 12. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3892468/>; https://www.researchgate.net/publication/258063860_Motor_unit_recruitment_by_size_does_not_provide_functional_advantages_for_motor_performance.

Dillman, C.J., Fleisig, G.S., Andrews, J.R. (1993). Biomechanics of pitching with emphasis upon shoulder kinematics. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 18, (2), 402-408.

Di Leo, J. (1992). Die Deutung von Kinderzeichnungen, Karlsruhe: Gerardi-Verlag.

Dominici, N., Ivanenko, Y. P., Cappellini, G., d'Avella, A., Mondì, V., Cicchese, M., Fabiano, A., Silei, T., Di Paolo, A., Carlo, A., Giannini, C., Poppele, R.E. & Lacquaniti, F. (2011). Locomotor primitives in newborn babies and their development. *Science* 334, 997-999. Zugriff am 21. Januar 2016 unter <http://science.sciencemag.org/content/334/6058/997.full>.

DocCheck Flexikon (2016). Absolutkraft und Kraftdefizit. DocCheck Flexikon, Köln: DocCheck Medical Services GmbH. Zugriff am 19. Januar 2016 unter

<http://flexikon.doccheck.com/de/Maximalkraft>

Emken, J.L., Benitez, R. & Reinkensmeyer, D.J. (2007). Human-robot cooperative movement training: Learning a novel sensory motor transformation during walking with robotic assistance-as-needed. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 4, 8. Zugriff am 29. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1847825/>.

Enoka, R.M. (1988). Muscle Strength and Its Development. *Sports Medicine*, 6, 146-168. [Elektronische Version] Zugriff am 4. März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/20101429_Muscle_Strength_and_Its_Development.

Enoka, R.M. & Douglas G. Stuart, D.G. (1994). Henneman's „size principle“: current issues, *Trends in Neurosciences*, 7 (7), 226-228. [Elektronische Version] Zugriff auf die Zusammenfassung am 12. Januar 2016 unter

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166223684802106>

Enoka, R.M. & Fuglevand, A.J. (2001). Motor unit physiology: some unresolved issues.

Muscle & Nerve, 24, 4-17. Zugriff am 15. Februar 2016 unter

[https://www.researchgate.net/publication/12178437_Motor_unit_physiology_Some_unresolved_issues?_sg=P2jZWyl769WvMsYmwcYotVm-](https://www.researchgate.net/publication/12178437_Motor_unit_physiology_Some_unresolved_issues?_sg=P2jZWyl769WvMsYmwcYotVm-egWpZctOcjOqmzvLviSlbpzeYO_VogKLmnNINi3AUmG7pTqlgpxfZRpiNSnOlg)

[egWpZctOcjOqmzvLviSlbpzeYO_VogKLmnNINi3AUmG7pTqlgpxfZRpiNSnOlg](https://www.researchgate.net/publication/12178437_Motor_unit_physiology_Some_unresolved_issues?_sg=P2jZWyl769WvMsYmwcYotVm-egWpZctOcjOqmzvLviSlbpzeYO_VogKLmnNINi3AUmG7pTqlgpxfZRpiNSnOlg)

Evarts, E.V. & Tanji, J. (1974). Gating of motor cortex reflexes by prior instruction. *Brain Research*, 71, (2-3), 479-494.

Feinstein, B., Lindegard, B., Nyman, E. & Wohlfart, G. (1955). Morphologic studies of motor units in normal human muscles. *Acta Anatomica (Basel)*, 23, 127-142.

Feldman, A.G. (1966). Функциональная настройка нервной системы при управлении движениями и поддержании позы: ii. управляемые параметры мышцы. (Functional tuning of the nervous system with control of movement or maintenance of a steady posture-II. Controllable parameters of the muscle), *Biofizika*, 11, 565-578.

Biofizika, 11, 565-578.

Feldman, A.G. (1980a). Superposition of motor programs-I. Rhythmic forearm movements in man. *Neuroscience*, 5 (1), 81-90. [Elektronische Version] Zugriff am 10. Januar 2016 unter

<http://e.guigon.free.fr/rsc/article/FeldmanAG80a.pdf>.

Feldman, A.G. (1980b). Superposition of motor programs-II. Rapid forearm flexion in man.

Neuroscience, 5 (1), 91-95. [Elektronische Version]

<http://e.guigon.free.fr/rsc/article/ForgetLamarre87>.

Feldman, A.G., Ostry, D.J. & Flanagan, J.R. (1990) The origins of electromyograms—explanations based on the Equilibrium Point hypothesis. In J.W. Winters & S. L.Y. Woo (Hrsg), *Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization*, 195-213.

Berlin, New-York: Springer-Verlag.

Feldman, A.G. & Levin, M.F. (1995). The origin and use of positional frames of reference in motor control. *Behavioural and Brain Sciences*, (18), 723-806. [Elektronische Version] Zugriff am 216. März 2016 unter <http://e.guigon.free.fr/rsc/article/FeldmanLevin95.pdf>.

Feldman, A.G., Goussev, V., Sangole, A. & Levin MF. (2007). Threshold position control and the principle of minimal interaction in motor actions. *Progress in Brain Research*, 165, 267-281.

Feldman, A.G. (2009). Origin and advances of the equilibrium-point-hypothesis. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 629, 637-643.

Feldman, A.G. (2011). Space and Time in the context of equilibrium theory. Wiley International Reviews. *Cognitiv Sciences*, 2, 287-304.

Feldman, A.G. & Levin, M.F. (2009). The equilibrium-point hypothesis - past, present and future. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 629, 699-726. Zugriff am 20.

Februar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/24025453_The_Equilibrium-Point_Hypothesis_-_Past_Present_and_Future.

Feldman, A.G., Goussev, V., Sangole, A. & Levin MF. (2007). Threshold position control and the principle of minimal interaction in motor actions. *Progress in Brain Research*, 165, 267-281.

Feldman, A.G. (2011). Space and Time in the context of equilibrium theory. Wiley International Reviews. *Cognitiv Sciences*, 2, 287-304.

Feldman, A.G. (2015). *Referent control of action and perception. Challenging conventional theories in behavioral neuroscience*. New York: Springer Science + Business Media.

Filippeschi, A. & Emanuele Ruffaldi, E. (2011). Expert rowers' motion analysis for synthesis and technique digitalization. *BIO Web of Conferences 1, 00024 (2011), EDP Sciences*. Zugriff am 5. März unter http://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2011/01/bioconf_skills_00024.pdf

Flanagan, J.R., Ostry DJ. & Feldman AG. (1993). Control of trajectory modifications in target-directed reaching. *Ostry Journal of Motor Behaviour 25*, 140-152. [Elektronische Version] Zugriff am 8. März 2016 unter http://psyc.queensu.ca/~flanagan/papers/FlaOstFel_JMB_93.pdf.

Fowler, B., Meehan, S. & Singhal, A. (2008). Perceptual-motor performance and associated kinematics in space. *Human Factors, 50* (6), 879-892. Zugriff am 22. Januar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/24206279_Perceptual-motor_performance_and_associated_kinematics_in_space.

Frère, J. & Hug, F. (2012). Between-subject variability of muscle synergies during a complex motor skill. *Frontiers in Computational Neuroscience, 6*, 99. Zugriff am 14. April 2014 unter <http://dx.doi.org/10.3389/fncom.2012.00099>.

Freitas, S.M.S.F., Scholz, J.P. & Latash, M.L. (2010). Analyses of joint variance related to voluntary whole-body movements performed in standing. *Journal of Neuroscience Methods, 188* (1), 89-96. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2943229/>.

Fröhlich, M., Klein, M., Emrich, E. & Schmidtbleicher, D. (2001). Arbeit als Bruttokriterium der Belastung im Kraftausdauertraining. *Leistungssport, 31*, (2) 24-28.

Fuglevand, (1998). Henneman's Size Principle: the right name. *Science Magazine, 281*, 919. Zugriff am 2. Februar 2016 unter http://www.ganino.com/games/Science/science%20magazine%201997-1998/root/data/Science%201997-1998/pdf/1998_v281_n5379/p5379_0919a.pdf

Gandevia, S.C., Allen, G.M., Butler, J.E. & Taylor, J.L. (1996). Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex. *Journal of Physiology, 15*, 490(Pt 2), 529-536. [Elektronische Version] Zugriff am 5. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1158689/>.

Gat-Falik, T. & Flash, T. (1999). The Superposition Strategy for Arm Trajectory Modification in Robotic Manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—part B: Cybernetics, 29* (1), 83-95. [http://www.smpp.northwestern.edu/savedLiterature/Gat-FalikFlash\(1999\)IEEE-SMC-B29\(1\)83-95.pdf](http://www.smpp.northwestern.edu/savedLiterature/Gat-FalikFlash(1999)IEEE-SMC-B29(1)83-95.pdf)

Gelfand, I.M. & Tsetlin, M.L. (1966). On mathematical modeling of the mechanisms of the central nervous system. In I.M. Gelfand, V.S. Gurfinkel, S.V. Fornin & M.L. Tsetlin (Hrsg.), *Models of the structural-functional organization of certain biological systems*, 9-26. Moskau: Nauka (in Russisch, eine Übersetzung ist publiziert in der Herausgabe von 1971 bei MIT Press, Cambridge/MA)

Gelfand, I., Gurfinkel, V., Tsetlin, M. & Shik, M. (1971). In Models of the structural- functional organization of certain biological systems. Gelfand, I., Gurfinkel, V., Fomin, S. & Tsetlin, M. (eds.) MIT Press, 1971.

Gelfand, I.M., Gurfinkel, V.S., Tsetlin, M.L. & Shik, M.L. (1971). *Some problems in the analysis of movements*. In: Gelfand, I.M., Fomin, S.V., Tsetlin, M.L. (Hrsg.) Models of the Structural-Functional Organization of Certain Biological Systems. Cambridge: MIT Press, 329-345.

Gelfand, I.M. & Latash, M.L. (1998). On the problem of adequate language in motor control. *Motor Control, 2* (4), 306-313.

Gibson, J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston: Houghton Mifflin.

Glass, B. (2008). Maupertuis, Pierre Louis Moreau De. In Complete Dictionary of Scientific Biography. 2008. *Encyclopedia.com*. Zugriff am 5. März unter 2016 unter <http://www.encyclopedia.com>>.

Glazier, P.G., Wheat, J.S., Pease, D.L. & Bartlett, R.M. (2006). The Dynamic Systems Theory and the Functional Role of Movement Variability In K. Davis, S. Bennett & K. Newell (Hrsg.) *Movement System Variability, Chapter 3: Interface of Biomechanics and Motor Control* (49-69). Champaign/Il.: Human Kinetics. [Elektronische Version] Zugriff am 5. März

2016 unter http://www.paulglazier.info/images/pdfs/glazier_wheat_pease_bartlett_06.pdf.
Glaziera, P.S., Davids, K. & Bartlett, R.M. (2003). Dynamical system theory: a Relevant framework for performance-oriented Sports Biomechanics Research. *sportscience*, 7. Zugriff am 11. Februar 2016 unter <http://www.sportsci.org/jour/03/psg.htm>.
Gomi, H. & Kawato, M. (1996). Equilibrium-point control hypothesis examined by measured arm-stiffness during multi-joint movement. *Science*, 272, 117-120.
Gorniak, S., Duarte, M. & Latash, M.L. (2008). Do synergies improve accuracy? A study of speed-accuracy trade-offs during finger force production. *Motor Control* 12, 151-172. [Elektronische Version] Zugriff am 14. Januar 2014 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2579960/>.
Gorniak, S.L., Zatsiorsky, V.M. & Latash, M.L. (2009). Hierarchical control of static prehension: II. Multi-digit synergies. *Experimental Brain Research*, 194 (1), 1-15. Zugriff am 24. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2656415/>.
Gottlieb, G.L. (1998). Point of View Rejecting the Equilibrium-Point Hypothesis. *Motor Control*, 2 (1), 10-12.
Gottlieb, G.L. (2000). A test of torque-control and equilibrium-point models of motor control. *Human Movement Science*, 19 (6), 925-931. Zusammenfassung: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167945701000409>.
Graziano, M., C. Taylor, T. Moore & D. Cooke (2002). The cortical control of movement revisited. *Neuron* 36, 349-362. [Elektronische Version] Zugriff am 18. Januar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/11055599_The_Cortical_Control_of_Movement_Revisited.
Graziano, M. S. A., Patel K. T. & Taylor C. S. R. (2004). Mapping from motor cortex to biceps and triceps altered by elbow angle. *Journal of Neurophysiology* 92, 395-407.
Graziano, M. S.A., Aflalo, T.N.S. & Cooke, D.F. (2005). Arm Movements Evoked by Electrical Stimulation in the Motor Cortex of Monkeys. *The Journal of Neurophysiology*, 94 (6), 4209-4223. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter <http://jn.physiology.org/content/94/6/4209>
Graziano M. S. A. & Aflalo T. N. S. (2007). Mapping behavioral repertoire onto the cortex. *Neuron* 56, 239-251. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter [http://www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273\(07\)00711-8](http://www.cell.com/neuron/fulltext/S0896-6273(07)00711-8).
Gribble, P. & Kistemaker, D. (2012). 6. Computational Motor Control: Muscle. www.gribblelab.org. Zugriff am 25. März 2016 unter http://gribblelab.org/compneuro/6_Computational_Motor_Control_Muscle_Models.html.
Gu, X. & Ballard, D.H. (2006). An Equilibrium Point based Model Unifying Movement Control in Humanoids. *Robotics: Science and System*, 1-7. [Elektronische Version] Zugriff am 17. Januar 2016 unter <http://www.roboticsproceedings.org/rss02/p17.pdf>.
Guigon, E., Baraduc, P. & Desmurget, M. (2007). Coding of movement- and force-related information in primate primary motor cortex: a computational approach. *European Journal of Neuroscience*, 26, (250-260). [Elektronische Version] Zugriff am 24. März 2016 unter <http://www.hal.inserm.fr/file/index/docid/212329/filename/GuigonEtAl07cori.pdf>.
Gundersen, K. (1998). Determination of muscle contractile properties: the importance of the nerve. *Acta Physiologica Scandinavia*, 162 (3), 333-341.
Günther, M. & Ruder, H. (2003). Synthesis of two-dimensional human walking: a test of the λ -model. *Biological Cybernetics*, 89, 86-106.
Haken, H. (1982). Synergetik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
Haywood, K., Robertson, M. & Getchell, N. (2012). *Advanced Analysis of Motor development*. Champaign/IL.: Human Kinetics.
Hegen, P. & Schöllhorn, W. I. (2012). Gleichzeitig in verschiedenen Bereichen besser werden, ohne zu wiederholen? Paralleles differenzielles Training von zwei Techniken im Fußball. *Leistungssport*, 42 (3), 17-23.
Henneman, E. (1957). Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science*, 26, 1345-1347.
Henneman, E. (1985). The size-principle: a deterministic output emerges from a set of probabilistic connections, *Journal of Experimental Biology*, 115, 105-112. [Elektronische

Version] Zugriff am 12. Januar 2016 unter <http://jeb.biologists.org/content/jexbio/115/1/105.full.pdf>.

Héroux, M.E. [15. Oktober 2015a]. Motor units in the human calf muscle: not as complicated as you think. *Motor Impairment Blog, New Finding*. Zugriff am 28. Februar 2016 unter <https://motorimpairment.neura.edu.au/medial-gastroc-motor-unit-localization/>.

Héroux, M.E. [21. Dezember 2015b]. Even motoneurons need a break!. *Motor Impairment Blog, New Finding*. Zugriff am 28. Februar 2016 unter <http://motorimpairment.neura.edu.au/motoneuron-recovery/>.

Héroux, M.E., Butler, A.A., Gandevia, S.C., Taylor, J.L. & Butler J.E. (2015). Time course of human motoneuron recovery after sustained low-level voluntary activity. *Journal of Neurophysiology*, 115 (2), 803-812.

Héroux, M.E., Brown, H.J., Inglis, J.T., Siegmund, G.P. & Blouin J.S. (2016). Motor units in the human medial gastrocnemius muscle are not spatially localized or functionally grouped. *Journal of Physiology*, 593 (16), 3711-3726.

Héroux, M.E. (Zugriffsdatum 29. Februar 2016). Re: Reuse of one of you figures. Nachricht veröffentlicht in throwscoach@rocketmail.com.

Hinder, M.R. & Milner, T.E. (2003). The case for an internal dynamics model versus equilibrium point control in human movement. *Journal of Physiology*, 2, 549(Pt 3), 953-963. [Elektronische Version] Zugriff am 22. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2342993/>.

Holt, K.G., Wagenaar, R.O. & Saltzman, E. (2010). A Dynamic Systems/constraints approach to rehabilitation. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 14 (6). [Elektronische Version] Zugriff am 6. März 2016 unter http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-35552010000600002.

Hussong, U. (2012). Hoffnungsviolles Speerwurftalent. *Leichtathletiktraining*, 22 (5), 10-16.

Hossner, E.-J., Boris Käch, B. & Enz, J. (2016). On the optimal degree of fluctuations in practice for motor learning. *Human Movement Studies*, 47, 231-239. [Elektronische Version] Zugriff am 16. April 2016 unter http://ac.els-cdn.com/S0167945715001025/1-s2.0-S0167945715001025-main.pdf?_tid=1ce1395e-0375-11e6-9a4d-00000aacb35e&acdnat=1460771401_89588411497911a64a2d259edcca9f3.

Hsu, W.-L. (2014) Adaptive Postural Control for Joint Immobilization during Multitask Performance. *PLoS ONE* 9 (10): e108667. Zugriff am 16. April 2016 unter <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0108667>.

Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1979). Brain mechanisms of Vision. *Scientific American*, 241, (3), 150-162.

Ijspeert, A.J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks, 2008 Special Issue*, 21, 642-653. [Elektronische Version] Zugriff am 1. März 2016 unter <https://www.cs.cmu.edu/~hgeyer/Teaching/R16-899B/Papers/Ijspeert08NeuralNetworks.pdf>.

Jakobi, J.M. & Chilibeck, P.D. (2001). Bilateral and unilateral contractions: possible differences in maximal voluntary force. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 26, 12-33.

Johnson, C. (26 January 2011). „One-on-one with Chinese tennis ace Li Na“. *CNN*. Zugriff am 20. März 2016 unter <http://travel.cnn.com/shanghai/play/one-one-chinese-tennis-ace-li-na-896676/>.

James, E.C. (2012). Body movement instructions facilitate synergy level motor learning, retention and transfer. *Neuroscience Letters*, 522, (2) 162-166.

Jenny, A.B. & Inukai, J. (1983). Principles of motor organization of the monkey cervical spinal cord. *Journal of Neuroscience*, 3, 567-575.

Kalmar, J.M. & Cafarelli, E. (2006). Central excitability does not limit postfatigue voluntary activation of quadriceps femoris. *Journal of Applied Physiology*, 100 (6), 1757-1764. [Elektronische Version] Zugriff am 6. März 2016 unter <http://jap.physiology.org/content/100/6/1757>.

Kargo, W. J. & Nitz, D. A. (2003). Early skill learning is expressed through selection and tuning of cortically represented muscle synergies. *The Journal of Neuroscience*, 23, 11255-11269.

Katzenbeißer, J. [2. Mai 2005]. *Inteview mit Jürgen Schult*. [Elektronische Version] Zugriff am 20. Januar 2016 unter <http://www.oelv.at/UserFiles/Ausbildung/2005/schult.pdf>.

Kazarnovsky M.I. (2008). The problem of nerve pathways crossing. <http://mkazarnovsky.com/WEB-ContraUniLateral.htm>.

Kelso, J.A.S. (1995). *Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*. Cambridge/ MA: MIT Press.

Keysers, C., Kohler, E., Umiltà, M.A., Nanetti, L., Fogassi, L. & Gallese, V. (2003). Audiovisual mirror neurons and action recognition. *Experimental Brain Research*, 153, 628-636. [Elektronische Version] Zugriff am 24. März 2016 unter <http://www.bcn-nic.nl/txt/people/publications/audiovisualmirrorandactionrec2003.pdf>.

Khodiguian, N., Cornwell, A., Lares, E., DiCaprio, P.A. & Hawkins, S.A. (2003). Expression of the bilateral deficit during reflexively evoked contractions. *Journal of Applied Physiology*, 94, 171-178.

Kidgell, D.J., Frazer, A.K., Daly, R.M., Rantalainen, T., Ruotsalainen I., Ahtiainen, J., Avela, J. & Howatson, G. (2015). Increased cross-education of muscle strength and reduced corticospinal inhibition following eccentric strength training. *Neuroscience*, 300, 566-75.

Kidgell, D.J., Stokes, M.A. & Pearce, A.J. (2011). Strength Training of One Limb Increases Corticomotor Excitability Projecting to the Contralateral Homologous Limb, *Motor Control*, 15, 247-266.

Killing, W., Ritschel, M., Salzer, P., Schult, J., Deyhle, M., Isele, R., Lehmann, F., Badura, M., Heinecke W. & Müller, F. (2011). *Jugendleichtathletik. Offizieller Rahmentrainingsplan des DLV für die Wurfdisziplinen im Aufbaitraining*. Münster: Philippka Sportverlag.

Kim, K., Cha, Y.J. & Fell, D.W. (2011). The effect of contralateral training: Influence of unilateral isokinetic exercise on one-legged standing balance of the contralateral lower extremity in adults. *Gait & Posture*. 2011 May;34 (1), 103-1066.

Kistemaker, D.A., Wong, J.D. & Gribble, P.L. (2010) The Central Nervous System does not minimize energy cost in arm movements. *Journal of Neurophysiology*, 104, 2985-2994

Kistemaker, D.A., van Soest, A.K.J. & Bobbert, M.F. (2007). Equilibrium Point Control Cannot be Refuted by Experimental Reconstruction of Equilibrium Point Trajectories, *Journal of Neurophysiology*. 98, 1075-1082. [Elektronische Version] Zugriff am 20. Januar 2016 unter <http://jn.physiology.org/content/98/3/1075>.

Kneser, A. (1929). Das Prinzip der Kleinsten Wirkung von Leibniz bis zur Gegenwart. *Band 9 der Serie Wissenschaftliche Grundfragen - Philosophische Abhandlungen* (1-70). Leipzig: Teubner Verlag.

Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297, 846-848. [Elektronische Version] Zugriff am 24. März unter <http://old.unipr.it/arpa/mirror/pubs/pdffiles/Kohler-Keysers%202002.pdf>.

Krainak, D.M., Ellis, M.D., Bury, K., Churchill, S., Pavlovics, E., Pearson, L., Shah, M. & Dewald, J.P.A. (2011). The effects of body orientation on maximum voluntary arm torques. *Muscle Nerve*. 44 (5) 805-813. [Elektronische Version] Zugriff am 3. März unter <http://europemc.org/articles/PMC3650842>.

Lackner, J.R. & DiZio, P. (1996). Motor function in microgravity: movement in weightlessness, *Current Opinion in Neurobiology*, 6 (6), 744-750. [Elektronische Version] Zugriff am 21. Januar 2016 unter http://www.brandeis.edu/graybiel/publications/docs/153_motor%20function.pdf.

Latash, M.L. (1994). Control of fast elbow movement: a study of electromyographic patterns during movements against unexpectedly decreased inertial load. *Experimental Brain Research*, 98, 145-152. [Elektronische Version] Zugriff am 25. März 2016 unter http://download.springer.com/static/pdf/254/art%253A10.1007%252FBF00229119.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2FBF00229119&token2=exp=1459315548~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F254%2Fart%25253A10.1007%25252FBF00229119.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252FBF00229119*~hmac=77068d7b23216a43c15622b5975940cae218cdee50f472b25439e486e3780158.

- Latash, M.L. & Zatsiorsky, V.M. (2001). *Classics in Movement science (Hrsg.)*. Human Kinetics Publishers.
- Latash, M.L., Scholz, J.P. & Schöner, G. (2002). Motor Control Strategies Revealed in the Structure of Motor Variability, *Motor Control and Motor Variability*, 30 (1), 26-31. [Elektronische Version] Zugriff am 10. http://www.udel.edu/bioms/seminararchives/05_06/Latash.pdf
- Latash, M.L. & Zatsiorsky, V.M. (2006). Principle of Superposition in Human Prehension. In S. Kawamura & M. Svinin (Hrsg.) *Advances in Robot Control. From Everyday Physics to Human-Like Movements, Part I*, 249-261. Springer.
- Latash, M.L. (2008). *Synergy*. OUP USA.
- Latash, M.L. (2008). Evolution of Motor Control: From Reflexes and Motor Programs to the Equilibrium-Point Hypothesis. *Journal of Human Kinetics*, 19 (19), 3-24. [Elektronische Version] Zugriff am 2. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2759721/>
- Latash, M.L. Gorniak, S. & Zatsiorsky, V.M. (2008). Hierarchies of Synergies in Human Movements, *Kinesiology*, 40 (1), 29-38. [Elektronische Version] Zugriff am 13. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2846665/>.
- Latash, M.L. (2008). Evolution of Motor Control: From Reflexes and Motor Programs to the Equilibrium-Point Hypothesis. *Journal of Human Kinetics*, 19 (19), 3-24. [Elektronische Version] Zugriff am 2. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2759721/>
- Latash, M.L., Scholz, J.P. & Schöner, G. (2007). Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control*. 11 (3), 276-308. [Elektronische Version] Zugriff am 20. Dezember 2015 unter <http://www.humankinetics.com/acucustom/sitename/Documents/DocumentItem/9382.pdf>.
- Latash, M.L. & Zatsiorsky, V.M. (2009). Multi-Finger Prehension: Control of a Redundant Mechanical System. In D. Sternard (Hrsg.) *Progress in Motor Control, Part IV, volume 629 of the series Advances in Experimental Medicine and Biology*, 597-618.
- Latash, M.L., Friedman, J., Kim, S.W., Feldman, A.G. & Zatsiorsky, V.M. (2010). Prehension synergies and control with referent hand configurations, *Experimental Brain Research*, 202 (1), 213-229. [Elektronische Version] Zugriff am 24. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2846225/>; https://www.researchgate.net/publication/40768870_Prehension_synergies_and_control_with_referent_hand_configurations
- Latash, M.L., Mindy F. Levin, M.F., John P. Scholz, J.P. & Schöner, G. (2010). Motor Control Theories and Their Applications. *Medicina (Kaunas)* 46 (6), 382-392. [Elektronische Version] Zugriff am 10. März 2016 unter <http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/uploads/document/attachment/157/LatashEtAl2010.pdf>
- Latash, M.L. (2010a). Motor Synergies and the Equilibrium-Point Hypothesis, *Motor Control*, 14 (3), 294-322. [Elektronische Version] Zugriff am 15. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2921643/>.
- Latash, M.L. (2010b). Two Archetypes of Motor Control Research, *Motor Control*, 14 (3), e41-e53. [Elektronische Version] Zugriff am 15. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3071624/>
- Latash, M.L. (2010c). Stages in Learning Motor Synergies: A View Based on the Equilibrium-Point Hypothesis. *Hum Mov Science*, 29(5): 642-654. [Elektronische Version] Zugriff am 30. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2891849/>.
- Latash, M.L. & Huang, X. (2015). Neural control of movement stability: Lessons from studies of neurological patients. *Neuroscience*, 20 (301), 39-48.
- Latash, M.L. (27. März 2016). email an K. Bartonietz.
- Lehmann, F. (2014a) Die Qualität der Abwurfbewegung, Teil 1. *leichtathletiktraining*, 25 (4), 4-10.
- Lehmann, F. (2014b) Die Qualität der Abwurfbewegung, Teil 2. *leichtathletiktraining*, 25 (6), 32-39.
- Lestienne, F.G., Thulliera, Archambault, F.P., Levin, M.F. & Feldman, A.G. (2000). Multi-muscle control of head movements in monkeys: the referent configuration hypothesis.

Neuroscience Letters, 283 (1), 65-68.

Linthorne, N.P. & Everett, D.J. (2008). Soccer - Release angle for attaining maximum distance in the soccer throw. *Sports Biomechanics*, 5 (2), 243-260. [Elektronische Version] Zugriff am 28. März unter <http://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/536/4/%27Release%20Angle%20Soccer%20Throw-in%27%20Post-print.pdf>.

Lippi, V., Ruffaldi, E., Zeli, G., Lagarde, J., Tripicchio, P. & Avizzano, C.A. (2011). Uncontrolled manifold and Juggling: Retrieving a set of Controlled Variables from Data, *BIO Web of Conferences*.

https://www.researchgate.net/publication/267556920_Uncontrolled_manifold_and_Juggling_Retrieving_a_set_of_Controlled_Variables_from_Data.

Levin, S. (2006). Tensegrity: the new biomechanics. In: *Textbook of Muscularskeletal Medicine*. In: M. Hutson & R. Ellis (eds.), 69-80. Oxford: Oxford University Press.

[Elektronische Version] Zugriff am 15. Januar 2016

https://www.researchgate.net/publication/236146619_Tensegrity-The_New_Biomechanics.

Li, S., Danion, F., Latash, M.L., Li, Z. & Zatsiorsky, V.M. (2000). Finger Coordination and Bilateral Deficit During Two-Hand Force Production Tasks Performed by Right-Handed Subjects. *Journal of Applied Biomechanics*, 16, 379-391. [Elektronische Version] Zugriff am 15. Januar 2016 unter

<http://www.americankinesiology.org/AcuCustom/Sitename/Documents/DocumentItem/2355.pdf>.

Li, Z.M., Latash, M.L. & Zatsiorsky, V.M. (1998). Force sharing among fingers as a model of the redundancy problem. *Experimental Brain Research*, 119, 276-286.

Li, Z.M. (2006). Functional Degrees of Freedom. *Motor Control*, 10, 301-310. [Elektronische Version] Zugriff am 30. Dezember 2015 unter

<http://journals.humankinetics.com/AcuCustom/Sitename/Documents/DocumentItem/6162.pdf>

Long Island Futsal (2016). Zugriff am 18. März 2016 unter

http://www.usyouthfutsal.com/longislandfutsal/aboutfutsal/index_E.html.

Malone, L.A., Gervais, P.L. & Steadward, R.D. (2002). Shooting mechanics related to player classification and free throw success in wheelchair basketball. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 39 (6), 701-710. [Elektronische Version] Zugriff am 25. März 2016 unter <http://www.rehab.research.va.gov/jour/02/39/6/pdf/Malone.pdf>.

Martin, V. (2006). A dynamical systems account of the uncontrolled manifold and motor equivalence in human pointing movements - A theoretical study, Doctoral Thesis, International Graduate School of Neuroscience. Ruhr Universität Bochum, Institut für Neuroinformatik. Zugriff unter <http://e.guigon.free.fr/rsc/phdthesis/MartinV06.pdf>; <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/MartinValere/diss.pdf>.

Martin, V., Scholz, J.P. & Schöner, G. (2009). Redundancy, Self-Motion, and Motor Control. *Neural Computation*, 21 (5), 1371-1414. Zugriff am 24. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3086896/>.

Martin, J.R., Terekhov, A.V., Latash, M.L. & Zatsiorsky, V.M. (2013). Optimization and variability of motor behavior in multi-finger tasks: What variables does the brain use? *Journal of Motor Behaviour*, 45 (4), 289-305. [Elektronische Version] Zugriff am 16. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4064684/>.

Mauch, M. & Rist, H.-J. (2013). Biomechanische Eigenschaften bei Achillessehnen-Tendinopathien und deren Korrelation mit der elastosonografisch bestimmten Sehnenqualität. *Sport-Orthopädie - Sport-Traumatologie*, 29 (4), 314-320.

Mayford, M., (2013). The search for a hippocampal engram. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B Biological Sciences*, 369 (1633), 20130161. Zugriff am 1. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3843892/>.

McNeil, C.J., Giesebrecht, S., Gandevia, S.C. & Taylor, J.L. (2011). Behaviour of the motoneurone pool in a fatiguing submaximal contraction. *Journal of Physiology*, 589 (Pt 14), 3533-3544. Zugriff am 28. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3167116/>.

Mechtcheriakov, S., Berger, M., Molokanova, E., Holzmueller, G., Wirtenberger, W., Lechner-Steinleitner, S., De Col, C., Kozlovskaya, I. & Gerstenbrand, F. (2002). Slowing of human arm movements during weightlessness: the role of vision. *European Journal of Applied Physiology*, 87 (6), 576-583.

Meijer, H.J.M., Baan, G.C. & Huijing, P.A. (2006). Myofascial force transmission is increasingly important at lower forces: firing frequency-related length-force characteristics of rat extensor digitorum longus. *Acta Physiologica*, 186 (3), 185-195.

Meunier, S. & Pierrot-Deseilligny, E. (1989). Gating of the afferent volley of the monosynaptic stretch reflex during movement in man, *Journal of Physiology*, 419, 753-763. [Elektronische Version] Zugriff am 3. März unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1190031/>

Miller, L.E., Theeuwes, M. & Gielen, C.C.A.M. (1992) The control of arm movements in three dimensions. *Experimental Brain Research*, 90, 415-426.

Mogliore, A. S. (2004). Control of robotic joints using principles from the equilibrium point hypothesis of animal motor control. *Master of Science Thesis*, Georgia Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Zugriff am 20. Februar unter https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/5009/migliore_shane_a_200407_ms.pdf?sequence=1.

Narayanan, N.S., Eyal Y. Kimchi, E.Y. & Laubach, M. (2005). Redundancy and synergy of neuronal ensembles in motor cortex. *The Journal of Neuroscience*, 25 (17), 4207- 4216. <http://www.jneurosci.org/content/25/17/4207.full.pdf>

Nasu, D., Matsuo, T. & Kadota, K. (2014). Two Types of Motor Strategy for Accurate Dart Throwing. *PLOS ONE* | www.plosone.org, 9, (2), e88536. Zugriff am 20. Februar 2016 unter <https://www.plos.org/wp-content/uploads/2013/05/pone-9-2-nasu.pdf>.

Nazari, M.A., Perrier, P. & Payan; Y. (2013). The Distributed Lambda Model (DLM): A 3-D, Finite-Element Muscle Model Based on Feldman's Lambda Model; Assessment of Orofacial Gestures. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 56 (6), 1909-1923. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00924545/document>.

Neuroscience (2001). Purves, D., Augustine, G-J., Fitzpatrick, D., Katz, L.C., LaMantia, A.-S., McNamara, J.O. & Williams, S.M. (Hrsg.). 2. Auflage. Sunderland (MA): Sinauer Associates. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK11104/figure/A480/?report=objectonly>.

Nowak, E., Grimme, B., Reimann, H. & Schöner, G. (2012). Motor equivalence reveals coarticulation in arm movement sequences involving obstacle avoidance. *Frontiers in Computational Neuroscience*, Conference Abstract, Bernstein Conference, 12. - 14. September 2012, München. http://www.frontiersin.org/10.3389/conf.fncom.2012.55.00232/event_abstract

Nuzzo, J.L. [1. Oktober 2015]. One session of strength training makes the spinal cord more excitable. *Motor Impairment Blog, New Finding*. Zugriff am 28. Februar 2016 unter <https://motorimpairment.neura.edu.au/one-session-of-strength-training-makes-the-spinal-cord-more-excitable/#comment-96544>.

Nuzzo, J.L., Barry, B.K., Gandevia, S.C. & Taylor, J.L. (2016). Acute Strength Training Increases Responses to Stimulation of Corticospinal Axons. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48 (1), 139-150.

Oza, C.S. & Simon F. Giszter, F. (2015). Trunk Robot Rehabilitation Training with Active Stepping Reorganizes and Enriches Trunk Motor Cortex Representations in Spinal Transected Rats. *The Journal of Neuroscience*, 35 (18), 7174-7189. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4420783/>.

Ostry, D.J. & Feldman, A.G. (2003). A critical evaluation of the force control hypothesis in motor control. *Experimental Brain Research*, 153 (3), 275-288. Zugriff am 18. Januar 2016 unter http://www.psych.mcgill.ca/labs/mcl/pdf/djo_ebr_2003.pdf.

Osu, R., Morishige, K.-I., Nakanishi, J., Miyamoto, H. & Kawato, M. (2015). Practice reduces task relevant variance modulation and forms nominal trajectory. *Scientific Reports*, 5, 17659. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4671027/>

Overduin, S.A., d'Avella, A., Carmena, J.M. & Bizzi, E. (2012). Microstimulation activates a handful of muscle synergies. *Neuron*, 76 (6), 1071-1077. [Elektronische Version] Zugriff am 10. April 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3547640/>.

Overduin, S.A., d'Avella, A., Carmena, J.M. & Bizzi, E. (2014). Muscle synergies evoked by microstimulation are preferentially encoded during behavior. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 8, 20. [Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3942675/>.

Papi, E., Rowe, V.J. & Pomeroy, M. (2015). Analysis of gait within the uncontrolled manifold hypothesis: Stabilisation of the centre of mass during gait, *Journal of Biomechanics*, 48 (2), 324-331.

Panzer, S., Schinowski, D. & Kohle, D. (2011). Cross-Education and contralateral irradiation. *Journal of Human Kinetics*, 27, 66-79. [Elektronische Version] Zugriff am 8. März 2016 unter <http://www.degruyter.com/view/j/hukin.2011.27.issue--1/v10078-011-0006-0/v10078-011-0006-0.xml>.

Park, M.C., Belhaj-Saif, A., Gordon, M., and Cheney, P.D. (2001). Consistent features in the forelimb representation of primary motor cortex in rhesus macaques. *The Journal of Neuroscience*, 21, 2784-2792.

Pelz, J., Hayhoe, M. & Loeber, R. (2001). The coordination of eye, head, and hand movements in a natural task. *Experimental Brain Research* 139, 266-277. <http://www.cis.rit.edu/vpl/publications/ExpBrainRes2001.pdf>

Penhune, V.B. (2013). Motor equivalence reveals coarticulation in arm movement sequences involving obstacle avoidance. *Trends in cognitive sciences* 17, 10. https://www.researchgate.net/publication/256099718_Neural_encoding_of_movement_sequences_in_the_human_brain.

Perrier, P., Ostry, D.J. & Laboissière, R. (1996). The Equilibrium Point Hypothesis and its Application to Speech Motor Control. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 39, 365-378.

Perrier, P., Loevenbruck, H. & Payan, Y. (1996). Control of tongue movements in speech: the Equilibrium Point Hypothesis perspective. *Journal of phonetics*, 24 (1), 53-75. Zugriff am 17. Januar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/253949494_Control_of_tongue_movements_in_speech_the_Equilibrium_Point_Hypothesis_perspective.

Perus, M. (2001). Multi-level Synergetic Computation in Brain, *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 4 (2), 157 - 193. [Elektronische Version] Zugriff am 9. Januar 2016 unter http://www.dejanrakovicfund.org/radovi/2001_perus.pdf

Pestronk, A. (2015). *Peripheral Axons: Characteristics*. Neuromuscular Disease Center, Washington University, St. Louis/Mo. Zugriff am 24. Januar 2016 unter <http://neuromuscular.wustl.edu/nother/axon.htm#axcv>

Peters, R.A. (2004) Superpositioning of Behaviours Learned through Teleoperation - A Final Report for NASA Grant NAG-1515, 1-24. <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040082505.pdf>.

Pinter, I.J., van Soest, A.J., Bobbert; M.F. & Smeets, J.B.J. (2012). Conclusions on motor control depend on the type of model used to represent the periphery. *Biological Cybernetics*, 106, 441-451. Zugriff am 20. Januar 2016 unter http://download.springer.com/static/pdf/599/art%253A10.1007%252Fs00422-012-0505-7.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs00422-012-0505-7&token2=exp=1453213065~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F599%2Fart%25253A10.1007%25252Fs00422-012-0505-7.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Farticle%252F10.1007%252Fs00422-012-0505-7*~hmac=2fb87ccc0a13427b824519388957afce1666aa9f279911e446ce58ffc66ff0e1.

Prigg, M. [12. März 2014]. *Revealed: Man vs Machine table tennis showdown that went viral – is actually a fake for a TV ad*. Mail Online Science & Tech, Zugriff am 23. Januar 2016 unter <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2578633/The-Man-vs-Machine-table-tennis-showdown-went-viral-actual-cleverly-shot-TV-ad.html#ixzz3xxhRylc4>.

Qu, X. (2012). Uncontrolled manifold analysis of gait variability: effects of load carriage and fatigue. *Gait Posture*, 36 (2), 325 -329.

Rapp, H.H. (2011). A Ping-Pong Ball Catching and Juggling Robot: a Real-Time Framework for Vision Guided Acting of an Industrial Robot Arm. [Elektronische Version] Zugriff am 3. März 2016 unter http://www.sirver.net/media/pubs/rapp_pingpong_icara2011.pdf.

Rathelota, J.-A- & Strick, P.L. (2009). Subdivisions of primary motor cortex based on cortico-motoneuronal cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 (3), 918-923. Zugriff am 15. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2621250/>.

Reinkensmeyer, D.J., Wolbrecht, E.T., Chan, V., Chou, C., Cramer, S.C. & Bobrow, J.E. (2012). Comparison of 3D, Assist-as-Needed Robotic Arm/Hand Movement Training Provided with Pneu-WREX to Conventional Table Top Therapy Following Chronic Stroke. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 91 (11 0 3): S232-S241. Zugriff am 3. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3487467/>.

Richter, G. (1979). Der Maximalwertspeicher als ein digitales Messgerät für die komplexe Leistungsdiagnostik und seine Anwendungsmöglichkeit im Gewichtheben. *Theorie und Praxis des Leistungssport*, 17, (Beiheft 7), 55-65.

Rieck, S. & Bawa, P. (1992). Recruitment of Motor Units in Human Forearm Extensors. *The Journal of Neurophysiology*, 68, 100-108. [Elektronische Version] Zugriff am 19. April 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/21637538_Recruitment_of_motor_units_in_human_forearm_extensors.

Rosenbaum, D., Loukopoulos, L., Meulenbroek, R., Vaughan, J. & Engelbrecht, S. (1995). Planning reaches by evaluating stored postures. *Psychological Review*, 102, 28-67.

Ruffaldi, E., Filippeschi, A., Frisoli, A., Avizzano, C.A., Bardy, B. & Gopher, D. (2009). Sprint: a training system for skills transfer in rowing. In T. Gutierrez and E. Sanchez, (Hrsg.) *SKILLS09 International Conference on Multimodal Interfaces for Skills Transfer*. Bilbao, Spain., 2009.

Ryan, T.J., Roy, D.S., Pignatelli, M., Arons, A. & Tonegawa, S. (2015). Engram cells retain memory under retrograde amnesia. *Science*, 348 (6238), 1007-1013.

Roh, J., Rymer, W.Z. & Beer, R.F. (2012). Robustness of muscle synergies underlying three-dimensional force generation at the hand in healthy humans. *The Journal of Neurophysiology*, 107 (8), 2123-2142. [Elektronische Version] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3331600/>.

Rossi, A. & Scarpini, C. (1992). Gating of trigemino-facial reflex from low-threshold trigeminal and extratrigeminal cutaneous fibres in humans. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 55 (9), 774-780. [Elektronische Version] Zugriff am 3. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1015100/>.

Roth, G. (1990). Gehirn & Selbstorganisation. In W. Krohn & G. Küppers (Hrsg.) *Selbstorganisation - Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution, Band 29, Serie Wissenschaftstheorie, Wissenschaft und Philosophie*, (167-180). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Safavynia, S.A., Torres-Oviedo, G. & Lena H. Ting, L.H. (2011). Muscle Synergies: Implications for Clinical Evaluation and Rehabilitation of Movement. *Top Spinal Cord Injury and Rehabilitation*, 17 (1), 16-24.

Sainburg, R.L. (2015). Should the Equilibrium Point Hypothesis (EPH) be Considered a Scientific Theory? *Motor Control*, 19 (2)142-148. [Elektronische Version] Zugriff am 24. März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/268230472_Should_the_Equilibrium_Point_Hypothesis_EPH_be_Considered_a_Scientific_Theory.

Šambaher, N., Aboodarda, S.J. & Behm, D. (2016). Bilateral Knee Extensor Fatigue Modulates Force and Responsiveness of the Corticospinal Pathway in the Non-fatigued, Dominant Elbow Flexors. *Frontiers in Neuroscience*, 10, February, Article 18, 1-10. Zugriff am 29. Februar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/292577366_Bilateral_Knee_Extensor_Fatigue_Modulates_Force_and_Responsiveness_of_the_Corticospinal_Pathway_in_the_Non-fatigued_Dominant_Elbow_Flexors.

Samoilov, V.I. (2008). Report about I.M. Gelfand's Seminar on biology. *Russian Journal of*

Developmental Biology, 39 (6), 65-365.

Sandamirskaya, Y. (2013). Dynamic neural fields as a step toward cognitive neuromorphic architectures. *Frontiers in Neuroscience*, 7, 276.

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3898057/>.

Santello, M., Baud-Bovy, G. & Jörntell, H. (2013). Neural bases of hand synergies. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7 (23). Zugriff am 12. Februar 2016 unter

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3619124/>.

Santello, M., Bianchi, M., Gabiccini, M., Ricciardi, E., Salviati, G., Prattichizzo, D., Ernst, M., Moscatelli, A., Jorntell, H., Kappers, A.M.L., Kyriakopoulos, K., Schaeffer, A.A., Castellini, C. & Bicchi, A. (2016). Hand synergies: Integration of robotics and neuroscience for

understanding the control of biological and artificial hands. *Physics of Life Reviews* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.plrev.2016.02.001> (angenommenes Manuskript, 2. Februar 2016)

[Elektronische Version] Zugriff am 26. März 2016 unter

https://www.researchgate.net/publication/293016609_Hand_synergies_Integration_of_robotics_and_neuroscience_for_understanding_the_control_of_biological_and_artificial_hands?ev=prf_pub

Sarabon, N., Rosker, J., Fruhmann, H., Burggraf, S., Loeffler, S. & Kern, H. (2013).

Reliability of maximally voluntary contraction related parameters measured by a novel portable isometric knee dynamometer. *Physikalische Medizin Rehabilitationsmedizin*

Kurortmedizin, 23, 22-27. Zugriff am 12. Januar 2016 unter

https://www.researchgate.net/publication/236888933_Reliability_of_Maximal_Voluntary_Contraction_Related_Parameters_Measured_by_a_Novel_Portable_Isometric_Knee_Dynamometer.

Sawers, A., Allen, J.L. & Ting, L.H. (2015). Long-term training modifies the modular structure and organization of walking balance control. *Journal of Neurophysiology* Published 1

December 2015 Vol. 114 no. 6, 3359-3373. <http://jn.physiology.org/content/114/6/3359>

Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., Staiger, J.F. & Steinmetz, H. (1995). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 33 (8), 1047-55.

Schnabel, U. [2. März 2014]. Die große Neuro-Show. *Die Zeit Online* [Elektronische Version], Zugriff am 13. Februar 2016 unter <http://www.zeit.de/2014/09/hirnforschung-memorandum-reflexible-neurowissenschaft/>.

Scholz, J.P. & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept: identifying control variables for a functional task. *Experimental Brain Research*, 126, 289-306.

https://www.researchgate.net/publication/12915817_Scholz_JP_Schoner_G_The_uncontrolled_manifold_concept_identifying_control_variables_for_a_functional_task_Exp_Brain_Res_126_289-306.

Scholz, J. P., Schöner, G. & Latash, M.L. (2000). Identifying the control structure of multijoint coordination during pistol shooting. *Experimental Brain Research*, 135, 382-404. Zugriff am

17. Januar 2016 unter

https://www.researchgate.net/publication/12182169_Identifying_the_control_structure_of_multijoint_coordination_during_pistol_shooting.

Scholz, J.P. & Schöner, G. (2014). Use of the Uncontrolled Manifold (UCM) Approach to Understand Motor Variability, Motor Equivalence, and Self-motion. *Progress in Motor Control*, 826 of the series *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 91-100.

Scholz, J.P., Dwight-Higgin, T., Lynch, J.E., Tseng, Y.W., Martin, V. & Schöner, G. (2011). Motor equivalence and self-motion induced by different movement speeds. *Experimental Brain Research*, 209 (3), 319-332. Zugriff am 13. Februar 2016 unter

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3066062/>.

Schöllhorn, W. I., Beckmann, H., Janssen, D. & Michelbrink, M. (2009). Differenzielles Lehren und Lernen im Sport. Ein alternativer Ansatz für einen effektiven Schulsportunterricht. *Sportunterricht*, 58 (2), 36-40.

Schöner, G. (1995). Recent development and problems in human movement science and their conceptual implications. *Ecological Psychology*, 7 (4), 291-314.

<http://e.guigon.free.fr/rsc/article/Schoner95.pdf>.

Schöner, G. & Thelen, E. (2006). Using Dynamic Field Theory to Rethink Infant Habituation.

Psychological Review, 113, (2), 273-299.

https://www.researchgate.net/publication/7142768_Using_dynamic_field_theory_to_rethink_infant_habituation.

Schöner, G. & Scholz, J.P. (2007). Analyzing variance in multi-degree-of-freedom movements: uncovering structure versus extracting correlations. *Motor Control* 11, 259-27.

Scott, S.H. & Dukelow, S.P. (2011). Potential of robots as next-generation technology for clinical assessment of neurological disorders and upper-limb therapy. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 48 (4), 335-353.

Scripture, E.W., Smith, T.L. & Brown, E.M. (1894). On the education of muscular control and power. *Studies from the Yale Psychological Laboratory*, 2, 114-119, 1894.

Semon, R. (1904a). *Die Mneme als erhaltendes Prinzip im Wechsel des organischen Geschehens*. Leipzig: Engelmann.

Semon, R. (1904a). *Der Engrammschatz des Gedächtnisses*, in: Uwe Fleckner (Hg.), *Schatzkammern der Mnemosyne*, Dresden: Verlag der Kunst, 1995, 206-212.

Sharples, S.A., Gould, J.A., Vandenberg, M.S. & Kalmar, J.M. (2016). Cortical Mechanisms of Central Fatigue and Sense of Effort. *PLOS ONE*, 11 (2), e0149026, 1-21. Zugriff am 21. März 2016 unter

https://www.researchgate.net/publication/293797075_Cortical_Mechanisms_of_Central_Fatigue_and_Sense_of_Effort.

Simoneau-Buessinger, E., Leteneur, S., Toumi, A., Dessurne, A., Gabrielli, F., Barbier, F. & Jakobi, J.M. (2015). Bilateral Strength Deficit Is Not Neural in Origin; Rather Due to Dynamometer Mechanical Configuration. *PLoS One*. 2015; 10 (12), e0145077. Zugriff am 4. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4684274/>

Sharples, S.A., Gould, J.A., Vandenberg, M.S. & Kalmar, J.M. (2016). Cortical Mechanisms of Central Fatigue and Sense of Effort. *PLoS One*, 11 (2) e0149026. Zugriff am 6. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4747526/>.

Sokoloff, A.J. Siegel, S.G. & Cope, T.C. (1999). Recruitment Order Among Motoneurons From Different Motor Nuclei. *The Journal of Neurophysiology*, 81, 2485-2492. [Elektronische Version] Zugriff am 19. April 2016 unter <http://jn.physiology.org/content/jn/81/5/2485.full.pdf>

Slaney, K.L. & Maraun, M.D. (2005). Analogy and Metaphor Running Amok: An Examination of the Use of Explanatory Devices in Neuroscience, *Journal of Theoretical and Philosophical Psychology*, 25 (2), 153-172. [Elektronische Version]

https://www.researchgate.net/publication/228348925_Analogy_and_Metaphor_Running_Amok_An_Examination_of_the_Use_of_Explanatory_Devices_in_Neuroscience.

Slomka, K., Juras, G., Sobota, G., Furmanek, M., Rzepko, M. & Latash, M.L. (2015). Intra-Personal and Inter-Personal Kinetic Synergies During Jumping. *Journal of Human Kinetics*, 49, 75-88. [Elektronische Version] Zugriff am 13. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4723184/>.

Sommer, M. (2014). Effect of timing training in golf and soccer players: skill, movement organisation, and brain activity. *Dissertation*, Umeå Universitet, Institutionen för psykologi. [Elektronische Version] Zugriff am 24. März 2016 unter <http://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:700224/FULLTEXT04.pdf>.

Song, A., Forsgren, S., Yu, J., Lorentzon, R. & Stål, P.S. (2012). Effects on Contralateral Muscles after Unilateral Electrical Muscle Stimulation and Exercise. *PLoS One*, 7 (12), e52230. [Elektronische Version] Zugriff am 8. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3527434/>.

Song Y., Forsgren S., Liu, J.X., Yu, J.G. & Stål, P. (2014). Unilateral muscle overuse causes bilateral changes in muscle fiber composition and vascular supply. *PLoS One*. 2014 Dec 29;9(12):e116455. [Elektronische Version] Zugriff am 8. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4278887/>.

Sternad, D., Abe, M.O., Hu, X. & Müller H (2011). Neuromotor noise, error tolerance and velocity-dependent costs in skilled performance. *PLoS Computational Biology*, 7, e1002159. Zugriff am 20. Februar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3178634/>.

Sugiuchi, Y., Kakei, S., Izawa, Y. & Shinoda, Y. (2004). Functional synergies among neck muscles revealed by branching patterns of single long descending motor-tract axons.

Progress in Brain Research, 143, 411-21.

Suzuki, M. & Yamazaki, Y. (2005). Velocity-based planning of rapid elbow movements expands the control scheme of the equilibrium point hypothesis. *Journal of Computational Neuroscience*, 18 (2), 131-149.

Szabados, A. & Perrier, P. (2015). Motor equivalence and uncontrolled manifolds in speech motor control. *Conference Progress in Motor Control X, Conference Paper*, 22. Juli 2015, Budapest.

Tagliabue, M., Ciancio, A.L., Brochier, T., Eskiizmirli, S. & Maier, M.A. (2015). Differences between kinematic synergies and muscle synergies during two-digit grasping *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 165. Zugriff am 21. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4374551/>.

Takarada, Y. & Nozaki, D. (2014). Maximal Voluntary Force Strengthened by the Enhancement of Motor System State through Barely Visible Priming Words with Reward. *PLOS ONE*, 9 (10), e109422. Zugriff am 4. März 2016 unter <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0109422>.

Taniguchi, Y., Burle, B., Vidal, F. & Bonnet, M. (2015). Deficit in motor cortical activity for simultaneous bimanual responses, *Experimental Brain Research*, 137 (3), 259-268.

[Elektronische Version] Zugriff auf die Zusammenfassung am 12. Januar 2016 unter <http://link.springer.com/article/10.1007/s002210000661?no-access=true>

theguardian [11. März 2014]. *Table tennis star „goes head-to-head with high-speed robot“*.

[Elektronische Version] Zugriff am 21. Januar 2016 unter

<http://www.theguardian.com/sport/video/2014/mar/11/table-tennis-high-speed-robot-video>.

Ting, L.H. & McKay, J.L. (2007). Neuromechanics of muscle synergies for posture and movement. *Current Opinion in Neurobiology*, 17, 622-628. [Elektronische Version] Zugriff am 14. April 2016 unter <https://neurolab.gatech.edu/wp/wp-content/uploads/ting/papers/Ting%20and%20McKay%202007.pdf>

Todorov, E. & Jordan, M.I. (2003). A Minimal Intervention Principle for Coordinated Movement. In *Advances in Neural Information Processing Systems 15*, 27-34, S. Becker, S. Thrun, und K. Obermayer (Hgs.), Cambridge/MA.: MIT Press. [Elektronische Version] Zugriff am 14. Februar 2016 unter

<https://homes.cs.washington.edu/~todorov/papers/TodorovNIPS03.pdf>.

Todorov, E. (2004). Optimality principles in sensorimotor control (review). *Nature Neuroscience*, 7 (9), 907-915. [Elektronische Version] Zugriff am 5. März 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1488877/>.

Tsao, H., Overs, M.E., Wu, J.C.-Y, Galea, M.P. & Hodges, P.W. (2008). Bilateral activation of the abdominal muscles induces longer reaction time, *Clinical Neurophysiology*, 119 (5), 1147-1152. [Elektronische Version] Zugriff auf die Zusammenfassung am 12. Januar 2016 unter [http://www.clinph-journal.com/article/S1388-2457\(08\)00023-0/fulltext](http://www.clinph-journal.com/article/S1388-2457(08)00023-0/fulltext).

Turberville, J. (6. Juni 2004). *Table Tennis Ball Speed - How fast does a Table Tennis ball really go?* Zugriff am 3. März 2016 unter <http://www.jayandwanda.com/tt/speed.html>.

Turella, L., Wurm, M.F., Tucciarelli, R. & Lingnau, A., (2013). Expertise in action observation: recent neuroimaging findings and future perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 637. Zugriff am 24. März unter

<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2013.00637/full>.

Turrina, A., Miguel Antonio Martínez-González, M.A. & Carla Stecco, C. (2012). The muscular force transmission system: Role of the intramuscular connective tissue, *Journal of Bodywork & Movement Therapies* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbmt.2012.06.001>.

Zugriff am 19. April unter <https://www.kineduca.cl/wp-content/uploads/2012/10/The-muscular-force-transmission-system.pdf>.

Turvey, M.T. (2007). Action and perception at the level of synergies. *Human Movement Science*, 26, 657-697. [Elektronische Version] Zugriff am 15. März 2016 unter <http://www.haskins.yale.edu/Reprints/HL1474.pdf>.

Turvey, M.T. & Fonseca, S. (2009). Nature of Motor Control: Perspectives and Issues. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, (629), 93-123. Zugriff am 1. April 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3726039/>.

- Vallery-Radot, R. (1919). *The Life of Pasteur*. Devonshire.
- Van Emmerik, R.E.A. & van Wegen, E.E.H. (2002). On the functional aspects of variability in postural control. *Exercise and Sport Science Review*, 30, (4), 177-183. [Elektronische Version] Zugriff am 5. März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/11065570_On_the_Functional_Aspects_of_Variability_in_Postural_Control.
- Vaquero, L., Hartmann, K., Ripollés, P., Rojo, N., Sierpowska, J., François, C., Càmara, E., van Vugt, F.T., Mohammadi, B., Samii, A., Münte, T.F., Rodríguez-Fornells, A. & Altenmüller, E. (2016). Structural neuroplasticity in expert pianists depends on the age of musical training onset. *Neuroimage*. 126,(106-119). Epub 2015 Nov 14.
- Vilensky, J.A. & Gilman, S. (1998). Renaming the „Henneman size principle“. *Science*, 280, 5372, 2031. [Elektronische Version] Zugriff am 12. Januar 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/13614927_Renaming_the_Henneman_Size_Principle.
- Wang, Y., Watanabe, K. & Asaka, T. (2015). Muscle synergies underlying control of taking a step during support surface translation. *Eur J Appl Physiol*. 2015 Oct 19. [Epub ahead of print]
- Weineck, J. (2009). *Optimales Training - Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings*. Balingen: Spitta Verlag GmbH & Co. KG (16. Auflage).
- Weiß, E.J. & Flanders, M. (2004). Muscular and postural synergies of the human hand. *Journal of Neurophysiology*, 92 (1), 523-535. Zugriff am 20. Januar 2016 unter <http://jn.physiology.org/content/92/1/523>.
- Weiß, L.W., Fry, A.C. & Relyea, G.E. (2002). Explosive strength deficit as a predictor of vertical jumping performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 16(1), 83-86.
- Werner, S.L., Murray, T.A., Hawkins, R.J. & Gill, T.J. (2002). Relationship between throwing mechanics and elbow valgus in professional baseball pitchers. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 11, (2) 151-155. Zugriff am 10. April unter <http://biomechanics.stanford.edu/me337/projects/werner02.pdf>.
- Widlöcher, D. (1995). *Was eine Kinderzeichnung verrät. Methode und Beispiele psychoanalytischer Deutung*. Frankfurt/M.: Fischer-Verlag.
- Williams III, D.S., McClay Davis, I., Scholz, J.P., Hamill, J. & Buchanan, T.S. (2004). High-arched runners Gait and Posture exhibit increased leg stiffness compared to low-arched runners. *Gait and Posture* 19, 263-269.
- Winter, A. (2012). *Memory - fragments of a modern history*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Whitehead, L. & Banihani, S. (2014). The evolution of contralateral control of the body by the brain: is it a protective mechanism? *Laterality*, 19 (3), 325-339.
- Wu, F.Y. & Asada, H.H. (2016). Bio-Artificial Synergies for Grasp Posture Control of Supernumerary Robotic Fingers. Zugriff am 10. April 2016 unter <http://www.roboticsproceedings.org/rss10/p27.pdf>
- Wu, Y.-H. & Latash, M L. (2014). The Effects of Practice on Coordination. *Exercise & Sport Sciences*, 42 (1), 37-42. [Elektronische Version] Zugriff am 14. Januar 2016 unter https://www.researchgate.net/requests/r16063608?pli=1&loginT=f5Cy5KQV1_NHK4vHNdM7Nm85Zs_iGf2ncx4B_D2i8U_1WBliqTHUfQ&uid=a1Vct2qok25Epv1AtsDLf6IUFr7ftLmQUSN0&cp=re299_x_p1&ch=reg.
- XL Athlete (2011). Explosive Strength Deficit Test. *XL Athlete.com*, Zugriff am 24. Februar 2016 unter http://www.xlathlete.com/view_formula.jsp?formula_id=27&browse_sport_id=0.
- Xu, Y., Terekhov, A.V., Latash, M.L. & Zatsiorsky, V.M. (2012). Forces and moments generated by the human arm: variability and control, *Experimental Brain Research*, 223 (2), 159-175. [Elektronische Version] Zugriff am 15. März 2016 unter https://www.researchgate.net/publication/232320506_Forces_and_moments_generated_by_the_human_arm_Variability_and_control.
- Yamada, H. (2010). Steering of pedal wave of a snake-like robot by superposition of curvatures. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*,

Taipei, 18.-22. Oktober 2010, Conference Proceedings, 419-424.

Yang, J.F. & Scholz, J.P. (2005). Learning a throwing task is associated with differential changes in the use of motor abundance. *Experimental Brain Research*, 63 (2), 137-158.

Yucesoy, C.A., Koopman, B.H.F.J.M., Baan, G.C., Grootenboer, H.J. & Huijing, P.A. (2003). Effects of inter- and extramuscular myofascial force transmission on adjacent synergistic muscles: assessment by experiments and finite-element modeling. *Journal of Biomechanics*, 36, 1797-1811. [Elektronische Version] Zugriff am 19. April 2016 unter <http://www.ufjf.br/especializacaofisio/files/2013/06/Effects-of-inter-and-extramuscular-myofascial-force-transmission.pdf>.

Zajac, F.E. & Faden, J.S. (1985) Relationship among recruitment order, axonal conduction velocity, and muscle-unit properties of type-identified motor units in cat plantaris muscle, *Journal of Neurophysiology*. 53 (5), 1303-1322. Zugriff am 13. Januar 2016 unter <http://jn.physiology.org/content/jn/53/5/1303.full.pdf>.

Zatsiorsky, V.M. (1971). *Die körperlichen Eigenschaften der Sportler (2. Auflage)*. Berlin: Sportverlag.

Zatsiorsky, V.M. (1995). *Science and Practice of Strength Training*. Champaign, IL: Human Kinetics.

Zatsiorsky, V.M. (1998). *Kinematics of human motion*. Champaign, IL: Human Kinetics.

Zatsiorsky, V. M., Aruin, A. S. & Selujanow, W. N. (1984). *Biomechanik des menschlichen Bewegungsapparates*. Berlin: Sportverlag.

Zatsiorsky, V.M., Latash, M.L., Gao F. & Shim, J.K. (2004). The principle of superposition in human prehension. *Robotica*, 22, 231-234. Zugriff am 15. Januar 2016 unter <http://sph.umd.edu/sites/default/files/files/2004%20Rototica%20The%20principle%20of%20uperposition%20in%20human%20prehension.pdf>

Zatsiorsky, V.M. & Latash, M.L. (2004). Prehension Synergies. *Exercise and Sport Science Review*, 32 (2), 75. Elektronische Version] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2821099/>.

Zatsiorsky, V.M. & Latash, M.L. (2008) Multi-finger Prehension: An overview, *J Mot Behav*. 2008 Sep; 40 (5), 446-476. [Elektronische Version] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2659677/>

Zatsiorsky, V.M. & Prilutsky, B.I. (2012). *Biomechanics of Skeletal Muscles*, Champaign/Illinois: Human Kinetics Publishing House.

Zatsiorsky, V.M. (Zugriffsdatum 24. Januar 2016). Re: Development of UCM. Nachricht veröffentlicht in throwscoach@rocketmail.com.

Zawieja, M. (2008). *Leistungsreserve Hanteltraining*. Münster: Philippka-Sportverlag.

Zhang, W., Scholz, J.P., Zatsiorsky, V.M & Latash, M.L. (2008). What do synergies do? Effects of secondary constraints on multi-digit synergies in accurate force-production tasks. *Journal of Neurophysiology*, 99, 500-513. [Elektronische Version] Zugriff am 14. Januar 2016 unter <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2827038/>.

Vita Mark L. Latash (2012) [Elektronische Version] <http://hhd.psu.edu/directory/documents/Latash-Mark-FID-300-Vitae.pdf>; - <http://hhd.psu.edu/profile/MarkLatash>.

Zatsiorsky, V.M. & Prilutsky, B. (2012). *Biomechanics of Skeletal Muscles.*, Champaign/Ill.: Human Kinetics Publishers.

Zatsiorsky, V.M. (2016) email an K. Bartonietz 12. Januar 2016.

Vita Vladimir M. Zatsiorsky [Elektronische Version]

- <http://hhd.psu.edu/directory/bio.aspx?id=310>

- International Association Sports Kinetics, Zugriff am 9. Januar unter

<http://internationalssportkinetics.org/index.php/iask/honorary-members/18-prof-dr-vladimir-m-zatsiorsky>.

Korrespondenzadresse

Dr. paed. habil. Klaus Bartonietz

E-Mail: bartonietzklaus@yandex.com

Tabelle 1: Neuere Forschungsarbeiten zum Konzept neuromuskulärer Synergien und zur Verifizierung von Bewegungskontroll-Hypothesen (dazu auch ein Überblick von Latash, Scholz & Schöner, 2002)

Untersuchte Bewegung	Autoren
A) neuromuskuläre Synergien	
Beinstoß (Frosch)	d'Avella, Saltiel & Bizzi, 2003
Sprechen	Turvey, 2007
Finger (schnell und genau)	Gorniak, Duarte & Latash, 2008; Gorniak, Zatsiorsky & Latash, 2009
Zielbewegungen mit Hand	Latash, Friedman, Kim, Feldman, & Zatsiorsky, 2010
Bewegungslernen	James, 2012
Riesenfelge rückwärts am Hochreck	Frère & Hug, 2012
Ganzkörper beim Musizieren	Demos, Chaffin & Kant, 2014
Armbewegungen (Primaten)	Overduin, d'Avella, Carmena & Bizzi, 2014
(cortical, spinal und supraspinal gesteuerte neuromuskuläre Synergien)	
beidbeinige Sprünge	Slomka, Juras, Sobota, Furmanek, Rzepko und Latash, 2015
(einzeln und mit Partner)	
Zielwürfe mit Fußball	Cruz Ruiz, Pontonnier, Levy & Dumont, 2015
Hand	Santello et al., 2016
B) Gleichgewichtszustands-Hypothese	
Sprechen	Perrier, Ostry & Laboissière, 1996; Perrier, Loevenbruck & Payan, 1996
Kopfbewegungen (Primaten)	Lestiennea, Thulliera, Archambault, Levin & Feldman, 2000
Gehen	Günther & Ruder, 2003
Gelenkbewegung (Roboter)	Mogliore, 2004
Armbewegungen	Flanagan, Ostry & Feldman, 1993; Suzuki & Yamazaki, 2005
Modell Armbewegung	Kistemaker, van Soest & Bobbert, 2007
Humanoid-Modell	Gu & Ballard, 2006
(33 Freiheitsgrade, Reich-und Greifbewegungen, Gehen)	
Laufband-Gehen (Kinder)	Black, Smith & Ulrich, 2007
Sprachroboter	Blagouchine & Moreau, 2010
Lippenbewegungen	Nazari, Perrier & Payan, 2013
Fingerbewegungen	Mattos, Zatsiorsky, Latash, 2016
C) unkontrollierte Mannigfaltigkeits-Hypothese	
Aufstehen	Scholz & Schöner, 1999
Schießen (Laserpistole)	Scholz, Schöner & Latash, 2000
Frisbee-Wurf, Trainingswirkung	Yang & Scholz, 2005
Balancieren auf instab. Widerlager	Asaka, Fukushima & Latash, 2008
Körperzielbewegungen im Stand	Freitas, Scholz & Latash 2010
Jonglieren im virtuellen Raum	Lippi et al., 2011
Armbewegung	Martin, 2006; Nowak, Grimme, Reimann & Schöner, 2012
Gehen	Qu, 2012 (mit Zusatzlast); Papi, Rowe & Pomeroy, 2015; Wang, Watanabe & Asaka, 2015
Fingerbewegungen	Martin, Terekhov, Latash & Zatsiorsky, 2013
Stand (Haltungskontrolle)	Hsu, 2014
Sprechen	Szabados & Perrier, 2015
Erlernen einer Armbewegung	Osu, Morishige, Nakanishi, Miyamoto & Kawato, 2015