

In: Heinz v. Loesch, Ulrich Mahler & Peter Rummenh oller (Hrsg.),
Musikalische Virtuosität (S. 205-231). Mainz: Schott, 2004.

Virtuosität als Ergebnis psychomotorischer Optimierung

VON REINHARD KOPIEZ

Zusammenfassung

Der folgende Beitrag betrachtet instrumentale Virtuosität aus dem Blickwinkel der psychomotorischen Optimierung und stellt sie in einem neuen theoretischen Ansatz in den Kontext allgemeiner Theorien mentaler Leistungsfähigkeit. Das Speed-Tapping (Hochgeschwindigkeits-Klopfen) dient hierbei als Untersuchungsparadigma. Nach einem Überblick über die physiologischen und neuropsychologischen Voraussetzungen zur Erreichung hoher Bewegungsgeschwindigkeit und Bewegungsgenauigkeit wird eine hohe Tapping-Geschwindigkeit sowohl als Ergebnis intensiven Trainings als auch der individuell unterschiedlichen neuropsychologischen Grundfähigkeit zur erfolgreichen Leistungsoptimierung und Aufgabenadaptierung dargestellt. Eine besondere Bedeutung kommt der zeitkritischen Koordination von muskulären Agonisten und Antagonisten zu. Vor dem Hintergrund von Niels Galleys »Theorie erfolgreicher Inhibition« wird das Optimierungsverhalten beim handmotorischen System in Analogie zum okulomotorischen Sakkaden-System (System der schnellen Augenbewegungen) begriffen. Es wird die Hypothese vertreten, dass Virtuosität nicht allein durch intensives Training, sondern auch durch die Optimierungskapazit at des gesamten kognitiven Systems eines Spielers bestimmt wird.

1. Einleitung

Der Wunsch, ein Musikstück mit einer Geschwindigkeit spielen zu können, die einerseits den strukturellen Anforderungen des Stückes im Sinne einer »einkomponierten« Spielgeschwindigkeit und andererseits den Vorstellungen des Spielers von einer subjektiv als ideal betrachteten Ausführungsgeschwindigkeit entspricht, dürfte bei den meisten Spielern eines Instruments einen wesentlichen Teil der  ubezeit beanspruchen und ein wichtiges  ubeziel sein. Geschwindigkeit ist zwar nicht alles bei einer professionellen Musikperformance, doch bildet sie immerhin eine notwendige Bedingung professioneller Performanz. Studien zum zeitlichen Umfang, der zur Vorbereitung eines Musikstückes für eine professionelle Performanz benötigt wird, zeigen einen erheblichen Zeitaufwand von Instrumentalisten für die Vorbereitung von nur einer Minute Programm: Auf der Leistungsebene des Wettbewerbs »Jugend musiziert« entfallen auf eine gespielte Programm-Minute sechs Stunden  ubezeit (konservative Schätzung)¹, und bei der Fallstudie

¹ Siehe Tabelle 60 in: Peter Linzenkirchner u. Gudrun Eger-Harsch, *Gute Noten mit kritischen Anmerkungen. Wirkungsanalyse der Wettbewerbe »Jugend musiziert« 1984 bis 1993*, Bonn 1995.

einer Pianistin, die über die Dauer von sechs Monaten ein Tagebuch über ihre Vorbereitungen für ein Prüfungsprogramm führte, wurde ein mittleres Verhältnis von 14,4 Stunden Übezeit für eine Programm-Minute ermittelt². Bisher wurde leider in keiner Studie derjenige Anteil der Übezeit untersucht, welcher zur Temposteigerung verwendet wird. Immerhin konnte trotz Unterschieden zwischen den spieltechnischen Anforderungen bei verschiedenen Stücken die Einzelfall-Studie von Lehmann und Ericsson am Beispiel der Komposition *Jardins sous la pluie* von Debussy zeigen, dass die Temposteigerung ein sehr langwieriger Prozess ist: Das Ausgangstempo bei Beginn der Vorbereitung lag bei diesem als am schwierigsten bewerteten Stück des Programms bei M. M. = 50. Die Versuchsperson benötigte ihre gesamte sechsmonatige Vorbereitungszeit zur kontinuierlichen Steigerung auf das Endtempo von M. M. = ca. 88. Allein für dieses Stück betrug die Gesamtübezeit ca. 100 Stunden.

Ein Hinweis auf die Bedeutung eines überdurchschnittlichen Spieltempos für eine internationale Konzertkarriere kann zusätzlich biographischen Berichten über den Karriere-start von Solisten entnommen werden. Das Beispiel des Pianisten Vladimir Horowitz sei genannt: Als er 1928 im Alter von 24 Jahren mit Tschaikowskys b-Moll-Konzert sein amerikanisches Debüt gab, folgte er in den ersten beiden Sätzen zunächst dem Tempo des Dirigenten Sir Thomas Beecham, doch mit Beginn des dritten Satzes entschloss er sich, sein eigenes Tempo zu spielen, das so schnell war, dass er das Orchester bis zum Schluss hinter sich ließ. Dies war der Beginn einer sensationellen Karriere³.

Beim vorliegenden Beitrag handelt es sich nicht um eine experimentelle Studie zur Frage der Trainierbarkeit des Spieltempos, sondern um Überlegungen zu den psychomotorischen Bedingungen schneller instrumentenspezifischer Bewegungsabläufe. Der Begriff der »Psychomotorik« wird deshalb verwendet, weil Virtuosität nicht allein durch die anatomische Struktur des Handbewegungsapparats beeinflusst wird, sondern das Ergebnis eines Wechselspiels zwischen zentralnervösen Prozessen der Bewegungskontrolle und exekutiv-motorischen Funktionen ist. Pointiert gesprochen liegt der Schlüssel für außergewöhnlich schnelle Hand-Finger-Bewegungen nicht in der Hand, sondern in den sensomotorischen Arealen des Gehirns.

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: Nach der kurzen Darstellung der Leistungsdaten des Finger-Hand-Arm-Bewegungssystems folgt eine Analyse der Trainingsprozesse unter dem Aspekt von Schnelligkeitsoptimierung. Am Beispiel des experimentellen Paradigmas »Tapping« wird dieser Prozess erstens aus Sicht der physiologischen Grundlagen des Handbewegungsapparats, zweitens aus Sicht der Expertisetheorie und drittens aus Sicht der allgemeinen Intelligenztheorie dargestellt. Ziel des Beitrags ist es aufzuzeigen, inwiefern es Argumente dafür gibt, ob Bewegungsschnelligkeit durch gezielte Trainingsprozesse gesteigert werden kann oder ob sie möglicherweise durch eine individuell festgelegte Schnelligkeitsgrenze limitiert ist. Im letzteren Fall wird nach Erklärungen für eine Limitierung gesucht.

² Andreas C. Lehmann u. Karl Anders Ericsson, »Preparation of a public piano performance: The relation between practice and performance«, in: *Musicae Scientiae* 2(1), 1998, S. 67–94.

³ Harold C. Schonberg, *The great pianists*, New York 1987, S. 434.

2. Die Leistungs-Kennwerte der Hand-Performanz und ihre Messung

Im folgenden Abschnitt soll diskutiert werden, zu welchen Bewegungsleistungen die Hand fähig ist. Es wird ein Überblick über experimentelle Studien gegeben, die sowohl den Aspekt der Schnelligkeit als auch den der Genauigkeit untersuchen. Zusätzlich wird das Hauptproblem experimenteller psychomotorischer Studien, nämlich das Fehlen eines verbindlichen Paradigmas diskutiert. Um kontrollierte Bewegungsstudien der Handmotorik durchführen zu können, ist die Reduktion der beim Instrumentalspiel komplexen Bewegungsabläufe unbedingt notwendig. Zwar herrscht hierüber forschungsmethodische Übereinstimmung, doch ist es schwierig, Einigung über eine repräsentative Bewegungsaufgabe zu erzielen. Die Schlussfolgerung dieses Abschnitts lautet deshalb, dass es nicht ausreicht, komplexe Bewegungen auf einfache und operationalisierbare Bewegungsaufgaben zu reduzieren, sondern dass erst eine Standardisierung der Untersuchungsparameter in Verbindung mit einem einheitlichen Paradigma vergleichbare psychomotorische Forschungsergebnisse garantieren kann. Als Beispiel für ein psychomotorisches Paradigma wird das so genannte »Speed-Tapping« (schnelles Fingerklopfen) vorgestellt.

2.1. Geschwindigkeit der Bewegungsausführung

Hände und Finger sind zu beeindruckenden Spitzenleistungen fähig: Wie Eckart Altenmüller⁴ im Überblick beschreibt, liegt der Weltrekord im Schreiben auf einer mechanischen Schreibmaschine seit 1959 bei 12,3 Anschlägen pro Sekunde. Dieser Wert wird auch von PC-Schreibern nicht übertroffen. Vom russischen Pianisten Simon Barere (der auf der Bühne während der Aufführung von Edvard Griegs Klavierkonzert verstarb⁵) wird im gleichen Artikel berichtet, dass er Robert Schumanns *Toccata* op. 7 mit 24,1 Tastenaktionen pro Sekunde spielte. Dies ist wegen der Gleichzeitigkeit mehrerer Töne allerdings nicht mit einer Anschlagsfrequenz von 24,1 Hertz gleichzusetzen, doch auch wenn die wahre Anschlagsfrequenz nicht ermittelt werden kann, bleibt es eine phänomenale Virtuosenleistung.

Insofern Tondokumente vorliegen, kann die Bewegungsgeschwindigkeit objektiv ermittelt werden. Als Beispiel für das Spiel im Grenzbereich der motorischen Leistungsfähigkeit sei der Schluss der Live-Aufnahme von Tschaikowskys b-Moll-Konzert genannt, aufgeführt in der Carnegie Hall am 19. April 1941 von Vladimir Horowitz unter der Leitung von Arturo Toscanini. Den Schlussteil des Konzerts (die letzten zwei Minuten) beginnt Horowitz mit einer Anschlagsfrequenz der Oktaven von 9,2 Hertz und steigert das Tempo so, dass er in der letzten Oktavpassage eine Repetitionsfrequenz von ca. 10 Hertz erreicht⁶.

⁴ Eckart Altenmüller, »Vom Spitzgriff zur Liszt-Sonate«, in: *Die Hand. Werkzeug des Geistes*, hrsg. v. Marco Wehr u. Martin Weinmann, Heidelberg 1999, S. 79–111.

⁵ Schonberg, *The great pianists* (wie Anm. 3), S. 404.

⁶ Siehe auch Renate Klöppel, *Die Kunst des Musizierens. Von den physiologischen und psychologischen Grundlagen zur Praxis*, Mainz 1993.

2.1.1. Physiologische Grenzen der Bewegungsgeschwindigkeit

Trotz dieser berichteten spektakulären Spielgeschwindigkeiten muss es einen Grund haben, dass keine exakt dokumentierte Bewegungsstudie Anschlagfrequenzen von mehr als 12 Hertz nachweist⁷. Wie Tabelle 1 zeigt, scheint es möglich zu sein, zumindest über kurze Zeiträume die maximale Anschlaggeschwindigkeit zu erreichen. Aus einer Stichprobe von 752 Probanden zeigt Tabelle 1 die Leistungswerte im Speed-Tapping für die linke und rechte Hand der drei schnellsten Kandidaten. Die Tabellenwerte zeigen jedoch ebenfalls, dass für die Bewertung der maximalen Tapping-Geschwindigkeit einer Person auch ein Zeitfaktor zu berücksichtigen ist, der kurzfristige Spitzenleistungen (etwa zu Beginn einer Tapping-Performance) von der über einen Zeitraum von 30 Sekunden gemittelten Leistung beider Hände unterscheidet. Nur die über einen längeren Zeitraum erreichten Werte kann man als Anschlagfrequenzen werten⁸.

Proband	Tapintervall in ms über 30 s für beide Hände	Tapintervall linke Hand 1.-5. Sek.	Tapintervall rechte Hand 1.-5. Sek.	Tapintervall linke Hand 25.-30. Sek.	Tapintervall rechte Hand 25.-30. Sek.	Gesamtermüdung (Diff. letzte-erste 5 Sek.)
22 J. männl.	104 ms = 9,6 Hz	97 ms = 10,3 Hz	92 ms = 10,9 Hz	142 ms = 7 Hz	130 ms = 7,7 Hz	41 ms
24 J. männl.	110 ms = 9,1 Hz	94 ms = 10,6 Hz	102 ms = 9,8 Hz	178 ms = 5,6 Hz	120 ms = 8,3 Hz	51 ms
37 J. männl.	113 ms = 8,8 Hz	90 ms = 11,1 Hz	78 ms = 12,8 Hz	198 ms = 5,1 Hz	152 ms = 6,6 Hz	91 ms
Gesamtgruppe (n = 752)	173 ms = 5,8 Hz (± 22 ms)	149,4 ms = 6,7 Hz (± 7,4 ms)	143,2 ms = 7 Hz (± 23,9 ms)	224,8 ms = 4,4 Hz (± 42 ms)	192,8 ms = 5,2 Hz (± 32,2 ms)	62,5 ms (± 28,4 ms)

Anmerkung: ± = Dispersionsmaß entsprechend dem halben Interquartilbereich.

Tabelle 1: Mediane der Anschlagfrequenzen beim Speed-Tapping über 30 Sekunden. Die Tabelle zeigt die drei Versuchspersonen mit den schnellsten Tapping-Frequenzen aus einer Gesamtstichprobe von n = 752. Das mittlere Alter dieser Stichprobe betrug 26,5 Jahre (sd = 4,7 Jahre).

⁷ Der Wert von 12 Hertz bezieht sich hierbei nur auf die Häufigkeit der Tonanschläge. Genau genommen ergibt sich durch die für einen Anschlag notwendige Rückstellbewegung die doppelte absolute Bewegungsfrequenz.

⁸ Ich danke Niels Galley (Universität Köln) für die Überlassung der Daten aus seinem Archiv.

Obwohl man die geschwindigkeitslimitierenden neurologischen Mechanismen noch nicht ganz erklären kann, scheint die maximale Bewegungsgeschwindigkeit unter anderem durch den so genannten »physiologischen Tremor« limitiert zu sein. Hierbei handelt es sich um ein bei allen Menschen vorhandenes Ruhezittern der Muskulatur, das eine Eigenfrequenz von ca. 6–12 Hertz besitzt. Hans-Joachim Freund⁹ geht davon aus, dass es sich beim natürlichen Tremor um die permanent ausgesandte unspezifische Muskel-Erregungsfrequenz eines »cerebralen Oscillators« (innerer Schwingkreis) handelt. Eine Analogie zu solch einer Grunderregung findet sich im okulomotorischen System bei den schnellen Bewegungen des Auges (Sakkaden). Dort produziert ebenfalls ein Sakkadengenerator in einer höheren Frequenz Anregungsimpulse für die in Blicken koordinierte Aktion der sechs Augenmuskeln, doch bei zielgerichtetem Verhalten lässt sich eine Hemmung des Überschusses an Impulsen nachweisen. Entfällt beim physiologischen Tremor der Handmuskulatur diese Hemmung irrelevanter Nervenimpulse bei bestimmten Krankheiten, wie etwa bei der Parkinson-Erkrankung, wird ein nicht mehr willentlich steuerbares Zittern besonders der Hände sichtbar. Wie Eckart Altenmüller¹⁰ ergänzend anmerkt, ist der physiologische Tremor nicht der einzige Limitierungsgrund, da es sich beim Instrumentalspiel nicht nur um einfache Pendelbewegungen in einem Gelenk, sondern um komplexe Bewegungen in verschiedenen Segmenten (Rotation, Kippbewegungen etc.) mit zum Teil unterschiedlicher Maximalgeschwindigkeit handelt, die einer zusätzlichen komplizierten und damit möglicherweise geschwindigkeitsreduzierenden Steuerung unterliegen. Die Frage bleibt allerdings offen, ob nicht ein Triller schneller gespielt werden kann als die Repetition desselben Fingers.

Biomechanische Studien aus jüngerer Zeit¹¹ argumentieren, dass die Begrenzung der maximalen Klopfgeschwindigkeit eines Fingers zunächst nicht durch die mechanische Resonanzfrequenz des Fingersystems verursacht wird, die höher, nämlich bei ca. 20–25 Hertz liegt. Vielmehr scheint der physiologische Tremor, der sich z. B. im Ermüdungszittern bei über längere Zeit ausgestreckten Fingern zeigt, durch den neurologischen Mechanismus des Rückenmark-Streckreflexes bestimmt zu werden. Gleichzeitig gibt es aber ein kompliziertes Wechselspiel zwischen verschiedenen Bewegungszuständen: Die Impulse des Rückenmark-Streckreflexes überlagern vermutlich diejenigen eines anderen Bewegungsgenerators, der z. B. die langsamen Fingerbewegungen steuert. Gleichzeitig melden die Muskelspindeln (diese sind in fast jedem Skelettmuskel vorhanden) mit einer Impulsfrequenz von 8–10 Hertz auf afferentem Weg die momentane Länge der Muskeln an die sensomotorischen Zentren. Diese komplexe Überlagerung von

⁹ Hans-Joachim Freund, »Handmotorik und musikalisches Lernen«, in: *Musik – Gehirn – Spiel. Beiträge zum vierten Herbert von Karajan-Symposium, Wien 24.–25. Mai 1988*, hrsg. v. Hellmuth Petsche, Basel 1989, S. 101–110.

¹⁰ Altenmüller, Vom Spitzgriff zur Liszt-Sonate (wie Anm. 4), S. 79–111.

¹¹ Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den Artikel von Ake B. Vallbo u. Johan Wessberg, »Proprioceptive mechanisms and the control of finger movements«, in: *Hand and brain. The neurophysiology and psychology of hand movements*, hrsg. v. Alan M. Wing, Patrick Haggard u. J. Randall Flanagan, San Diego 1996, S. 363–379.

Oszillationen mit verschiedenen Periodizitäten verursacht aus Sicht der Autoren ihrerseits wiederum einen Effekt, der als »8–10 Hertz-Diskontinuität« bezeichnet wird. Dies bezieht sich auf das Phänomen, dass langsame Fingerbewegungen nicht kontinuierliche Trajektorien besitzen, sondern geringfügige ruckartige Störungen in ihrem Bahnverlauf mit einer Frequenz von 8–10 Hertz aufweisen. Der physiologische Tremor ist demnach nur eine Komponente bei der Erklärung der maximalen Repetitions geschwindigkeit eines Fingers.

2.2. Genauigkeit der Bewegungsausführung

Geschwindigkeit ist zwar wichtig, doch ohne ein entsprechend hohes Maß an Genauigkeit in der motorischen Ausführung bleibt sie beim Instrumentalspiel unverwendbar. Bewegungsstudien aus dem Sportbereich vermitteln einen Eindruck von der Größe des Zeitfensters, in dem eine Bewegungsauslösung erfolgen muss: Um einen Tennisball auf ein bis zu 4,5 Meter entferntes, sechs Quadratmeter großes Ziel zu werfen, muss die Handöffnung innerhalb eines Zeitfensters von maximal zwei Millisekunden erfolgen, wenn sie die korrekte Flugbahn erzeugen will¹². Die untersuchte Gruppe von Hobby-Werfern erreichte jedoch nur eine Kontrolle über ein zehn Millisekunden großes Zeitfenster, was eine entsprechend geringe Trefferquote zur Folge hatte.

Ein anderes Beispiel für die Genauigkeit der Bewegungssteuerung aus dem Sport ist das so genannte Dart-Werfen (Pfeilwurf auf Scheiben). Bei Profi-Spielern liegt die Trefferquote des roten Punktes im Zentrum der Scheibe (das so genannte »Bull's eye«) bei 80 bis 90 Prozent aller Würfe¹³. Vor diesem Hintergrund ist es auch zu erklären, dass das *Guinness Buch der Rekorde* von 1321 Bull-Treffern innerhalb eines zehnstündigen Wurfmarathons durch den Spieler Jim Damore berichtet¹⁴.

Die Anforderungen an die Bewegungsgenauigkeit steigt jedoch, wenn sie zeitlichen Zwängen unterliegt, wie etwa einem festgelegten Tempo in der Musik. Am Beispiel des Trillers kann man die Grenzen der Genauigkeit untersuchen: Professionelle Pianisten können einen Triller auf zwei benachbarten weißen Tasten, gespielt mit Zeige- und Mittelfinger, so gleichmäßig spielen, dass die Trillerzyklen eine Abweichung von lediglich ca. 1 ms haben¹⁵. Allerdings ist die Trillergenauigkeit stark abhängig von den beteiligten Fingern und den Tastenkombinationen.

¹² John Hore, Stephen Watts, John Martin u. Brian Miller, *Timing of finger opening and ball release in fast and accurate overarm throws*, in: *Experimental Brain Research* 103(2), 1995, S. 277–286.

¹³ Persönliche Mitteilung des Dart-Profis Hagen Fischer (Hannover) am 7. März 2002.

¹⁴ *The Guinness book of record*, New York 1999. Leider wurde in der Quelle die Gesamtzahl der Würfe nicht angegeben.

¹⁵ George P. Moore, »Piano trills«, in: *Music Perception* 9(3), 1992, S. 351–360.

2.3. Tapping als Paradigma

Das Grundproblem der experimentellen Motorikforschung, die Aussagen über instrumentenspezifische Bewegungsabläufe machen möchte, besteht darin, dass z. B. beim Klavierspielen zum Teil sehr verschiedene Arten von Bewegungs-Schnelligkeiten gefordert sind, die sich durch die Aktivierung verschiedener Teilbewegungssysteme unterscheiden: Beim Spiel einer Skala entsteht die Geschwindigkeit hauptsächlich durch die Fingerbewegungen, während die Oktavrepetitionen in Franz Schuberts *Erlkönig* auch Bewegungen des Unterarms einbeziehen¹⁶. Die Lösung besteht in der Wahl einer spieltechnisch relevanten experimentellen Aufgabe, eines so genannten »Paradigmas«, wodurch die Daten aus verschiedenen Studien zur Finger- oder Handbewegungsschnelligkeit vergleichbar werden. In den letzten 100 Jahren hat sich hierbei das so genannte »Tapping«, d. h. die Verwendung von Klopfbewegungen durch einzelne Finger, als ideales Paradigma erwiesen. Die Zahl von mehr als 300 Studien zum Stichwort »Tapping« bestätigt die Relevanz des Tappings für die Psychomotorikforschung. Aus heutiger Sicht der Psychomotorikforschung kann man sagen, dass dem Tapping eine zentrale Rolle in der Modellbildung der handmotorischen Bewegungssteuerung zukommt.

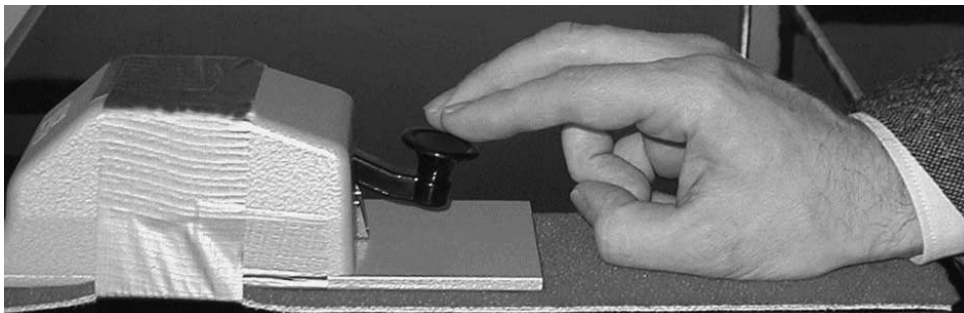


Abbildung 1: Hand- und Fingerhaltung bei Verwendung eines Morsetasters beim Tapping (Foto Reinhard Kopiez).

2.3.1. Tapping-Prozedur

Eine methodische Schwäche aller bisherigen Tapping-Studien ist das Fehlen einer standardisierten Prozedur bei der Tapping-Aufgabe. Deshalb schlage ich zunächst vor, als Messgerät einen Morsetaster zu verwenden. Die festzulegenden Parameter beim Tapping sind (a) auf Seiten des Geräts der eingestellte Kontaktabstand des Morsetasters und das notwendige Gewicht zur Auslösung eines Kontaktes und (b) auf Seiten der Versuchsperson die Dauer der Tapping-Aufgabe und die Handhaltung. Schon die Veränderung nur eines

¹⁶ Renate Klöppel, *Die Kunst des Musizierens. Von den physiologischen und psychologischen Grundlagen zur Praxis*, Mainz 1993.

einzigsten Parameters kann die Ergebnisse in erheblicher Weise beeinflussen. In den letzten zehn Jahren hat der Kölner Neuropsychologe Niels Galley allerdings Standardeinstellungen entwickelt¹⁷, mittels derer eine mehrere hundert Versuchspersonen umfassende Tapping-Datenbank aufgebaut wurde: Das Auslösegewicht des Morsetasters wird für Erwachsene auf 300 Gramm, der Kontaktabstand auf 0,2 Millimeter und die Messdauer auf 30 Sekunden festgelegt. Geklopft wird mit gekoppeltem Zeige- und Mittelfinger, gelöstem Tastenkontakt und aufgelegtem Handgelenk. Die Datenerfassung geschieht durch eine eigens entwickelte Software. Abbildung 1 zeigt die Handhaltung bei einer Tapping-Studie mit diesem Gerät.

2.3.2. Grenzen und Kritik des Tapping-Paradigmas

Das Tapping ist natürlich eine Aufgabe mit begrenzter Komplexität, bei der nicht simultan ausgeführte Tätigkeiten um die Ressourcen einer Versuchsperson konkurrieren müssen. Aus Sicht der Theorie der psychomotorischen Aufgabenklassifikation gehört es zur Klasse so genannter »Einzelaufgaben« (component tasks)¹⁸. Ein weiteres Beispiel für solche Aufgaben wäre die Messung einer Einfach-Reaktionszeit. In Wirklichkeit jedoch gehört das Instrumentalspiel wie auch das Autofahren zur Klasse der »Simultanaufgaben« (concurrent tasks). Simultanaufgaben sind dabei im Sinne einer Linearkombination aus Einzelaufgaben zusammengesetzt. Die Optimierungstheorie geht nun davon aus, dass die Summe der optimierten Einzelaufgaben in ihrer Linearkombination auch zu einer Optimierung der Simultanaufgaben führt. Ob diese Interpolation jedoch zulässig ist, darüber herrscht keine Sicherheit, denn es könnte z. B. sein, dass nicht alle Einzelaufgaben gleichgewichtet optimiert werden. An dieser Stelle herrscht eine gewisse theoretische Unsicherheit.

3. Peakperformance und Optimierungsprozesse

Nachdem wir im vorhergehenden Abschnitt die biometrischen Werte der Motorikperformance des Arm-Hand-Systems und die Bedeutung des experimentellen Paradigmas des Tappings aufgezeigt haben, geht es im folgenden Abschnitt um die Frage, wodurch die Geschwindigkeit einer Bewegung beeinflusst wird. Weiterhin wird nach Möglichkeiten und Grenzen der Leistungs- und Geschwindigkeitssteigerung gefragt. Im Mittelpunkt stehen hierbei der Begriff der »Optimierung« und die dazugehörigen Theorien.

¹⁷ Siehe Holger Ottensmeier, Gereon Hopmann, Tanos Freiha u. Niels Galley, *Duration of elementary psychomotoric behavior over life span: I. Tapping* (in Vorbereitung).

¹⁸ Siehe hierzu und zu den folgenden Ausführungen dieses Abschnitts: George Sperling u. Barbara Anne Doshier, »Strategy and optimization in human information processing«, in: *Handbook of perception and human performance*, hrsg. v. Kenneth R. Boff, Lloyd Kaufman u. James P. Thomas, New York 1986, S. 02,00–02,65.

3.1. Grundzüge von Optimierungsprozessen

Optimierung wird im folgenden verstanden als ein verbessertes Input-Output-Verhältnis. Nach dieser Definition liegt eine Optimierung dann vor, wenn es gelingt, mit weniger Input einen gleichen oder höheren Output zu erzeugen. Am Beispiel des cw-Wertes (Windwiderstandswert) eines Fahrzeugs sei dies veranschaulicht: Wenn man mit weniger Kraftstoff (Input) und unter Konstanzhaltung aller anderen Parameter bei gleicher Geschwindigkeit eine längere Distanz (Output) zurücklegen kann, dann wurde der Windwiderstandswert des Fahrzeugs optimiert.

Optimierungsprozesse sind aber nicht auf den technischen Bereich beschränkt, sondern in der Psychologie ebenfalls für exekutiv-motorische und psychische Funktionen beschrieben. Optimierungsmechanismen sind offensichtlich ein Wesensmerkmal des Menschen. Wie der Neuropsychologe Niels Galley in einem Experiment zur Untersuchung des Einflusses hoher Dosen von Beruhigungsmitteln (Benzodiazepin) beschreibt¹⁹, gelingt es Versuchspersonen auch in stark sediertem Zustand noch, ihre schnellen Augenbewegungen (Sakkaden) an eine schwierige okulomotorische Aufgabe anzupassen und fast die Performanz nicht sedierter Versuchspersonen zu erreichen. Diese unwillkürliche Optimierungstendenz unter der Bedingung einer starken, durch Psychopharmaka bewirkten psychischen Leistungsreduzierung ist umso erstaunlicher, als das okulomotorische System bereits ein hochgradig optimiertes System ist, welches sich im Grenzbereich seiner Leistungsfähigkeit befindet. Die Optimierung endete erst, als die Versuchspersonen vor Müdigkeit ihre Augen schlossen.

Optimierungsprozesse lassen sich auch formalisiert beschreiben: Wie Richard Ivry²⁰ in seinem Übersichtsartikel zum motorischen Lernen darstellt, unterliegen sowohl motorische als auch psychische Lernprozesse dem so genannten »Potenzgesetz der Übung«. Die Psychologen Allen Newell und Paul Rosenbloom²¹ haben dieses universelle Übungsgesetz zuerst formalisiert beschrieben und am Beispiel des Lernfortschritts bei Aufgaben mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad veranschaulicht. In Abbildung 2 ist deutlich sichtbar, dass die Aufgabenschwierigkeit ganz erheblich den Verlauf (die Neigung) der Lernkurve bestimmt: Das Lesen eines auf dem Kopf stehenden Textes ist dabei leichter zu erlernen als spiegelverkehrtes Zeichnen. Allen Lernvorgängen gemeinsam ist aber, dass nicht die Differenz der Übungsdurchgänge, sondern das Verhältnis zwischen den Wiederholungen der einzelnen Durchgänge die Performanz bestimmt. Damit liegt eine logarithmische Skalierung beider Achsen vor, wodurch sich ein scheinbar linearer Leistungsverlauf ergibt. Ein grafischer linearer Zusammenhang auf der Grundlage zweier logarithmischer Achsenskalierungen basiert jedoch auf einer Potenzfunktion, die im ein-

¹⁹ Niels Galley, »An enquiry into the relationship between activation and performance using saccadic eye movement parameters«, in: *Ergonomics* 41(5), 1998, S. 698–720.

²⁰ Richard Ivry, »Repräsentationen beim motorischen Lernen: Phänomene und Theorien«, in: *Enzyklopädie der Psychologie*, hrsg. v. Herbert Heuer u. Steven W. Keele, Göttingen 1994, S. 321–410.

²¹ Allen Newell u. Paul S. Rosenbloom, »Mechanisms of skill acquisition and the law of practice«, in: *Cognitive skills and their acquisition*, hrsg. v. John Robert Anderson, Hillsdale/NJ 1981, S. 1–55.

fachsten Fall durch die Gleichung $p = a + b^x$ dargestellt werden kann (p entspricht der Leistung, a und b sind Konstanten). Übertragen auf das psychomotorische Lernen bedeutet dies, dass der Umfang der benötigten Übezeit zur Erzielung von Leistungszuwächsen mit fortschreitendem Leistungsniveau proportional zunehmen muss. Mit anderen Worten: Es wird vorhergesagt, dass trotz erheblich höherem Übeaufwand im Verlauf des Übeprozesses nur noch geringe und sehr langsam stattfindende Leistungszuwächse erzielt werden können.

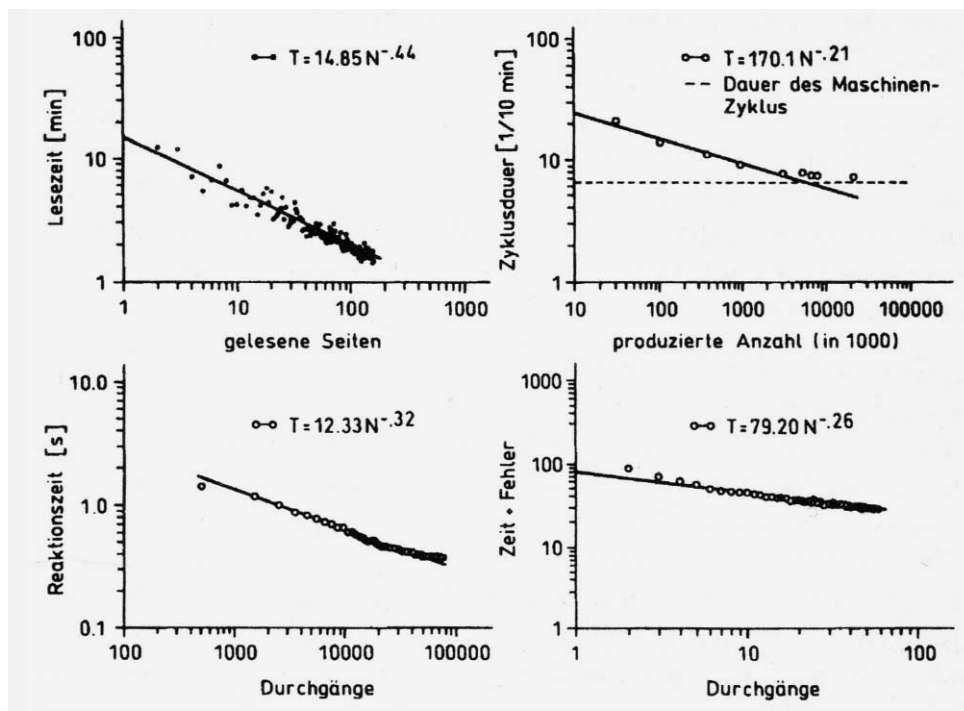


Abbildung 2: Beispiele für das Potenzgesetz der Übung bei vier verschiedenen Aufgaben. Oben links: Lesen von auf dem Kopf stehendem Text, oben rechts: Herstellen von Zigarren, unten links: Wahlreaktionszeiten mit zehn Fingern, unten rechts: spiegelverkehrtes Zeichnen. Die Formel zur Berechnung des »T«-Wertes (Performanz in Abhängigkeit von der Anzahl der Durchgänge) entspricht der Potenzfunktion der Übung²².

3.1.1. Übertragung der Optimierungsannahmen auf die Steigerung des Tempos beim Erlernen von Stücken unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades

Wenn die Performanz grundsätzlich dem Potenzgesetz der Übung entspricht, müsste sich dies auch im Bereich instrumentaltechnischer Fertigkeiten nachweisen lassen. Die Ent-

²² Aus Richard Ivry, »Repräsentationen beim motorischen Lernen: Phänomene und Theorien«, in: *Enzyklopädie der Psychologie*, hrsg. v. Herbert Heuer u. Steven W. Keele, Göttingen 1994, S. 321–410.

wicklung der Temposteigerung wird in diesem Abschnitt durch die Reanalyse von Daten aus einer Langzeitstudie²³ überprüft. In dieser Studie wurde mit der Methode des Übetagebuchs die Vorbereitung des Examenskonzerts einer Pianistin über mehr als 40 Wochen protokolliert. Die Versuchsperson notierte täglich sowohl die Übezeiten als auch die in der jeweiligen Woche erreichten Tempi der Stücke. Das Ergebnis der Reanalyse ist in Abbildung 3 dargestellt.

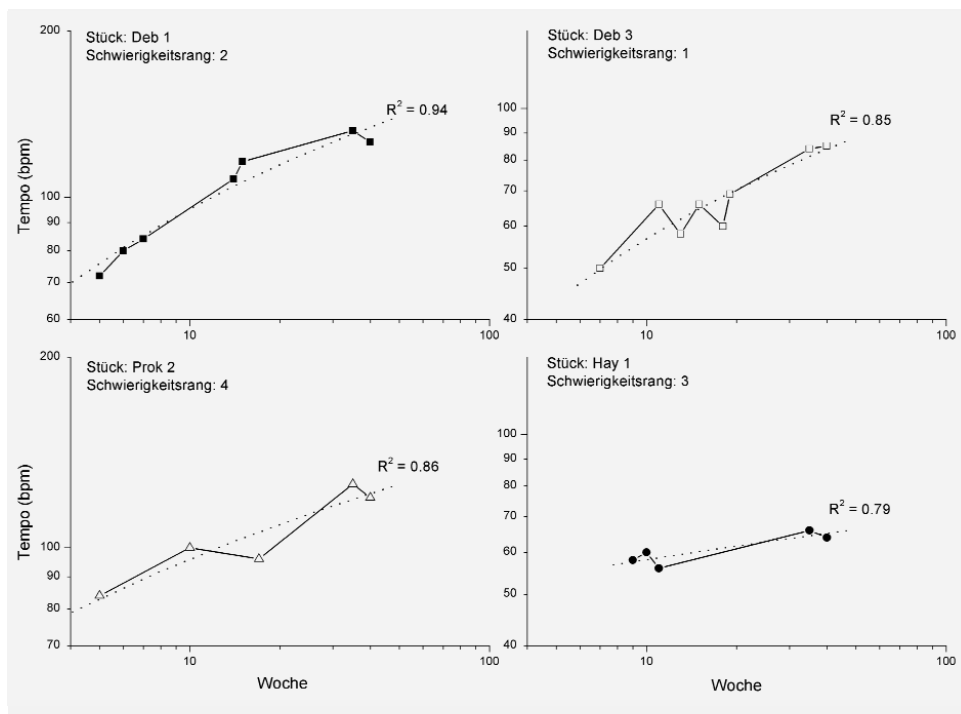


Abbildung 3: Überprüfung des Potenzgesetzes der Übung am Beispiel der Temposteigerung während der langfristigen Vorbereitung eines Konzertprogramms mit Stücken verschiedenen Schwierigkeitsgrades: »Deb 1« = *Pagodes* von Claude Debussy, »Deb 3« = *Jardins sous la pluie* von Claude Debussy, »Prok 2« = »Mercutio« aus dem Ballett *Romeo und Julia* von Sergej Prokofiev, »Hay 1« = 1. Satz der Klaviersonate Nr. 58 C-Dur Hob XVI/48 von Joseph Haydn.

Die angegebenen Schwierigkeitsgrade beruhen auf Expertenratings und Bewertungen durch Handbücher der Klavierliteratur. Der jeweils letzte Datenpunkt entspricht dem gespielten Tempo im Konzert. (Die Grafiken beruhen auf einer Reanalyse der Daten von Abbildung 5 aus der Studie von Lehmann und Ericsson²⁴.)

²³ Andreas C. Lehmann u. Karl Anders Ericsson, »Preparation of a public piano performance: The relation between practice and performance«, in: *Musicae Scientiae* 2(1), 1998, S. 67–94.

²⁴ Andreas C. Lehmann u. Karl Anders Ericsson, »Preparation of a public piano performance: The relation between practice and performance«, in: *Musicae Scientiae* 2(1), 1998, S. 67–94.

Die Kurvenanpassung durch eine Regressionsfunktion (angegeben durch die gestrichelte Linie) bestätigt im wesentlichen das Potenzgesetz der Übung. Da beide Achsen logarithmisch skaliert sind, ergeben sich bei dieser Skalierung Geraden. Aus dem Zusammenhang zwischen geschätzter Schwierigkeit und Zunahme des Tempos über die gesamte Vorbereitungszeit ist jedoch auch ersichtlich, dass die Steigerung des Tempos nur ein Aspekt der spieltechnischen Schwierigkeit darstellt: Obwohl die Klaviersonate von Joseph Haydn (Stück »Hay 1« = 1. Satz der Klaviersonate C-Dur, Nr. 58, Hob XVI/48) nur eine geringfügige Temposteigerung erfährt und bereits zu Beginn der Vorbereitung annähernd im Endtempo beherrscht wird, wird dies Stück nicht auf der untersten Stufe des Schwierigkeitsratings eingestuft. Umgekehrt ist das am schwierigsten eingestufte Stück (»Deb 3« = *Jardins sous la pluie* von Claude Debussy) nicht dasjenige mit der größten Differenz zwischen Anfangs- und Endtempo.

Es ist auch ersichtlich, dass das Spieltempo nicht kontinuierlich während des Übeprozesses zunimmt, sondern in Abhängigkeit vom Stück sprunghafte Zunahmen, wie auch in manchen Fällen Temporücknahmen durchläuft. In welchem Verhältnis jedoch das Tempo als schwierigkeitsbestimmende Variable zu anderen spieltechnischen Anforderungen steht, ist bis heute ungeklärt und geht aus den verwendeten Tagebuchaufzeichnungen nicht hervor. Es ist zumindest vorstellbar, dass beim Stück »Deb 3« nicht nur eine psychomotorische Virtuosität im Sinne der Spielgeschwindigkeit, sondern auch eine klangliche Virtuosität beherrscht werden muss. Deren Bestimmungsmerkmale wurden bisher aber nicht erfasst.

3.1.2. Theoretische Formulierung von Optimierungsprozessen

Obwohl unstrittig sein dürfte, dass psychomotorisches Lernen grundsätzlich einem Optimierungsgesetz folgt, ist die mathematische Formulierung dieser Gesetzmäßigkeit keine triviale Aufgabe²⁵. Nehmen wir als Ausgangspunkt den Griff zu einer Tasse Tee. Der Weg der Hand durch die Luft wird hierbei als Ergebnis der Wahl eines einzigen Weges, einer so genannten »Trajektorie«, betrachtet. Hierbei bleibt jedoch die Frage offen, nach welchen Kriterien man gerade diesen Weg der Hand durch den Raum festlegt. Fest liegt nur, dass solche willkürlichen Bewegungen immer nur einer Bewegungsbahn folgen, obwohl es eine unbegrenzte Zahl möglicher Wege gibt. In der Regel verwenden die meisten Erklärungsansätze in irgendeiner Form eine Kosten-Funktion zur Vorhersage der gewählten Trajektorie. Demzufolge wäre der Mensch ein »Homo oeconomicus« mit einem psychomotorischen Mechanismus, welcher versucht, bei willkürlichen Bewegungen die Anstrengung (*effort*) zu minimieren und die Bequemlichkeit (*comfort*) zu maximieren. Entsprechend einer parabolischen Kurve gibt es demzufolge einen Punkt, der eine optimale Lösung für dieses Problem darstellt. Sowohl weniger als auch mehr Anstrengung würde zu beiden Seiten dieses Punktes das Ergebnis wieder verschlechtern. So elegant diese Kosten-Funktion auch auf den ersten Blick erscheinen mag, sie kann nicht erklären,

²⁵ Zu den folgenden Ausführungen siehe das 8. Kapitel in Mark L. Latash, *Control of human movement*, Champaign/IL 1993.

wodurch es zur Auswahl einer Kosten-Funktionskurve kommt, denn es gibt stets eine gewisse Anzahl brauchbarer Optimierungslösungen, die sich z. B. durch einen verschiedenen großen Anteil von Faktoren wie »Vermeidung ruckartiger Beschleunigungsverläufe«, »innere Anstrengung« oder »Energieverbrauch« unterscheiden. Aus biomechanischer Sicht fehlt also noch eine hinreichende Theorie der Bewegungsoptimierung.

In jüngeren Veröffentlichungen wird die Frage der Bewegungsoptimierung und Kosten-Kontrolle (cost containment) aus Sicht des so genannten »Freiheitsgrad-Problems« untersucht²⁶. Zunächst gehen die Autoren davon aus, dass nicht die Bewegungstrajektorie, sondern die Zielhaltung optimiert wird. Da es aber eine sehr große Zahl von Möglichkeiten gibt, um z. B. ein Objekt im Raum zu greifen, bleibt die Frage nach den Auswahlkriterien für einen bestimmten Bewegungspfad zunächst offen. Es scheint so zu sein, dass es nicht nur eine einzige Kostenfunktion gibt, die es zu minimieren gilt, sondern einerseits räumliche Kosten (spatial error cost; d. h. Abweichungen vom Zielpunkt) und andererseits Bewegungskosten (travel cost; d. h. das Auslenkungsmaß aller Gelenke). Beide Kostenquellen bilden eine gewichtete Summe aller Bewegungskosten. Diese differentielle Kostenfunktion bestimmt aus Sicht der Autoren bereits in der Phase der Bewegungsplanung die Auswahl einer optimalen Zielhaltung.

3.1.3. Grenzen und Kritik der Optimierungstheorie

Bisher wurde Virtuosität als Ergebnis eines rationalen Optimierungsmechanismus dargestellt, doch der »Homo oeconomicus« ist nur eine Seite des virtuos spielenden Musikers. Zwischen dem Tapping oder anderen psychomotorischen Aufgaben und dem Instrumentalspiel gibt es jedoch einen entscheidenden Unterschied: die emotionale Involvierung des Ausführenden. Dieser Aspekt ist deshalb von zentraler Bedeutung, weil er der Optimierungstendenz diametral gegenüber steht. Die expressiven Körpergesten beim Spiel sind in einer Live-Performanz für die Kommunikation der interpretativen Intentionen von zentraler Bedeutung²⁷, und Jane Davidson²⁸ hat ihre Rolle bei der Evaluation des musikalischen Ausdrucks einer Live-Darbietung experimentell nachgewiesen, doch sind expressive Körpergesten aus Sicht der Optimierung extrem ineffektive Bewegungsabläufe. An dieser Stelle erscheint der Grundkonflikt eines Virtuosen, nämlich eine Lösung für die gegensätzlichen Anforderungen optimaler spieltechnischer Abläufe und intendierter, bzw. notwendiger expressiver Gestik zu finden. Es ist das Problem des Spielers, zwischen hochgradiger Kontrolle der psychomotorischen Abläufe und der durch die

²⁶ David A. Rosenbaum, Rudd G. J. Meulenbroek u. Jonathan Vaughan, »Three approaches to the degrees of freedom problem in reaching«, in: *Hand and brain. The neurophysiology and psychology of hand movements*, hrsg. v. Alan M. Wing, Patrick Haggard u. J. Randall Flanagan, San Diego 1996, S. 169–185.

²⁷ Siehe hierzu ausführlich Reinhard Kopiez, »Making music and making sense of music: expressive performance and communication«, in: *New handbook of research on music teaching and learning*, hrsg. v. Richard J. Colwell u. Carol Richardson, New York 2002, S. 522–541.

²⁸ Jane W. Davidson, »Visual perception of performance manner in the movements of solo musicians«, in: *Psychology of Music* 21(2), 1993, S. 103–113.

emotionale Involvierung tendenziell aufgehobenen Kontrolle zu vermitteln. Dies Problem ist jedoch prinzipiell nicht lösbar. Jüngsten Theorien zufolge ist nicht ganz auszuschließen, dass sich dieser Konflikt bei manchen professionellen Musikern körperlich in Form des Krankheitsbildes der »Fokalen Dystonie« (des so genannten Musikerkrampfs) äußert. Hierbei treten z. B. unwillkürliche Fingerkrümmungen auf, für die nur eine geringe therapeutische Heilungschance besteht²⁹. Betroffen sind fast nur professionelle Musiker. Es gibt Hinweise darauf, dass auch Glenn Gould von dieser Bewegungsstörung betroffen war, die ab seinem 45. Lebensjahr erhebliche spieltechnische Einschränkungen verursachte³⁰. Spieltechnische Optimierung aus Sicht eindimensionaler Strategien, die nur durch eine optimierte Kosten-Nutzen-Funktion bestimmt sind, wäre vor diesem Hintergrund eine zu kurz greifende Erklärung. Virtuosität kann nur als Ergebnis multidimensionaler Optimierungprozesse erklärt werden.

3.2. Physiologische und biomechanische Grenzen der Optimierung: Gibt es die »Musikerhand«?

Bevor wir den Einfluss von Training auf die psychomotorische Geschwindigkeit diskutieren, müssen zuerst die physiologischen Grundlagen der Handbewegungsgeschwindigkeit in Erwägung gezogen werden. In diesem Abschnitt suchen wir deshalb nach Hinweisen auf eventuell bereits auf physiologischer Ebene vorhandene individuelle Unterschiede in der motorischen Ausführungsgeschwindigkeit.

Das Zusammenspiel der Sehnen und Muskeln, die die Handbewegungen steuern, ist bis heute nicht vollständig verstanden, aber die anschauliche Beschreibung der Anatomie der Hand, die Peter Reill gibt³¹, vermittelt eine Ahnung von der Komplexität der Steuerungsprozesse. Im Prinzip unterscheidet sich aus Sicht dieses Autors (er ist Handchirurg) ein gezielter Hammerschlag in den Grundfunktionen der Bewegungssteuerung kaum vom Spiel eines Instruments. Aus dieser Sicht stellt das Instrumentalspiel lediglich den beeindruckenden Endpunkt eines intensiven jahrelangen Trainings der Koordination von 39 Hand- und Unterarmmuskeln auf jeder Körperseite dar.

Die Frage, die in diesem Abschnitt im Mittelpunkt steht, ist, ob virtuos spielende Musiker möglicherweise eine andere Zusammensetzung der Hand-Arm-Muskulatur haben als weniger virtuos spielende. Zwar würde dies unserer Anfangsthese einer Limitierung der maximalen Bewegungsfrequenz durch zentralnervöse Steuerungsprozesse widersprechen, doch auszuschließen wäre die Möglichkeit einer besonders vorteilhaften physiologischen »Grundausstattung« nicht. Antworten zu dieser Frage finden sich in der einschlägigen Literatur zur Physiologie, die hier kurz zusammengefasst werden sollen.

²⁹ Vanessa K. Lim, Eckart Altenmüller u. John L. Bradshaw, »Focal dystonia: current theories«, in: *Human Movement Science* 20(6), 2001, S. 875–914.

³⁰ Frank R. Wilson, »Glenn Gould's hand«, in: *Medical problems of the instrumentalist musician*, hrsg. v. Raoul Tubiana u. Peter C. Amadio, London 2000.

³¹ Peter Reill, »Alles im Griff!«, in: *Die Hand. Werkzeug des Geistes*, hrsg. v. Marco Wehr u. Martin Weinmann, Heidelberg 1999, S. 61–77.

3.2.1. Physiologische Grenzen der Optimierung

Grundsätzlich können die Skelettmuskeln in drei Gruppen klassifiziert werden: Typ I ist der so genannte »langsame Typ«, der primär in Muskeln mit Haltefunktion zum Einsatz kommt. Typ IIa ist der so genannte »mittelschnelle Typ« und Typ IIx der so genannte »schnelle Typ«, der sich durch sehr kurze Kontraktionsgeschwindigkeiten auszeichnet, jedoch nicht zu großer Dauerleistung geeignet ist und dabei schnell ermüdet³². Jeder gesunde Mensch hat ungefähr den gleichen Anteil langsamer und schneller Skelettmuskelfasern in seinem Körper. Der Muskelfasertyp wird bestimmt durch den Myoglobingehalt (Typ I: hoch, Typ II: niedrig), allerdings bestehen alle Muskeln immer aus einer Fasertyp-Mischung. Entscheidend sind demnach die Anteile unterschiedlicher Muskelfasertypen³³. Ein besonders hoher Anteil von Typ IIx-Fasern verhilft beispielsweise Ratten zu blitzartiger Flucht. Ein hoher Anteil dieses Fasertyps wäre also auch für die Handmuskulatur beim Klavierspiel von Interesse.

Die erste Frage, ob man eine bestimmte Ausstattung mit Muskelfasern hat oder ob diese erst im Laufe der Entwicklung gebildet werden, ist eindeutig zu beantworten: Die Aufspaltung der Skelettmuskeln in verschiedene Typen erfolgt nicht bei der Geburt, sondern erst im weiteren Entwicklungsverlauf durch den Einfluss der Aktivierung durch die motorischen Nerven³⁴. Diese grundsätzliche Eigenschaft der Plastizität der Muskulatur scheint lebenslanglich vorhanden zu sein. Bereits John Eccles (Nobelpreis für Medizin 1963) konnte nachweisen, dass bei Tieren durch eine vertauschte Verbindung der jeweiligen motorischen Nerven langsame und schnelle Skelettmuskeln ineinander umgewandelt werden können³⁵. Nach dem heutigen Stand der Forschung gelingt die Transformation der Muskeltypen beim Menschen jedoch unterschiedlich gut: Die Veränderung von mittelschnellen in langsame Muskeln ist schwierig und langwierig, die Umwandlung schneller Muskeln in mittelschnelle gelingt in kürzerer Zeit. Die Möglichkeit einer Transformation von Muskelfasertypen ist besonders für die Sportwissenschaft von Bedeutung, denn ein Marathonläufer benötigt einen höheren Anteil des Fasertyps I und ein Sprinter des Typs IIx³⁶.

Einschränkend müssen jedoch zwei Punkte angemerkt werden: Erstens berücksichtigen alle zitierten Untersuchungen nur die menschliche Beinmuskulatur, womit sich die Frage der Übertragbarkeit auf Skelettmuskeln der Hand stellt, die ja gegenüber der Beinmuskulatur eine erheblich dichtere Versorgung der Muskelfasern durch Motoneurone besitzen. Zweitens bleibt bei der Vielzahl der an der Muskelkontraktion beteiligten bio-

³² Warum sich die Geschwindigkeit der verschiedenen Muskelfasertypen unterscheidet, erklärt die elektromechanische »Gleitfilamenttheorie«. Siehe hierzu ausführlich Kapitel 13 in: Niels Birbaumer u. Robert F. Schmidt, *Biologische Psychologie*, Berlin 1999.

³³ Reinhardt Rüdell, »Muskelphysiologie«, in: *Neuro- und Sinnesphysiologie*, hrsg. v. Robert F. Schmidt, Berlin 1998, S. 85–112.

³⁴ Ebenda.

³⁵ Jesper L. Andersen, Peter Schjerling u. Bengt Saltin, »Muskeln, Gene und Leistungssport«, in: *Spektrum der Wissenschaft*, März 2001, S. 70–75.

³⁶ Ebenda.

chemischen Prozesse offen, ob neben dem Muskelfasertyp noch andere Vorgänge wie der ATP-Verbrauch, der Ionentransport oder die Glykolyse entscheidenden Einfluss ausüben können.

3.2.2. Biomechanische Grenzen der Optimierung

Grundsätzlich ist nicht auszuschließen, dass es bereits auf der biomechanischen Ebene der Handmotorik Faktoren gibt, die sich auf die spieltechnische Virtuosität auswirken. Wie Christoph Wagner in seinen umfangreichen Studien zeigen konnte, gibt es Argumente für die Existenz besonders günstiger biomechanischer Voraussetzungen für das Instrumentalspiel. Die biomechanische Leistungsfähigkeit wird durch zwei Faktoren bestimmt: die aktive Bewegungsgrenze (dies ist der mit größter Muskelanspannung erreichbare Gelenkwinkel) und die passive Bewegungsgrenze (dies ist derjenige Gelenkwinkel, welcher durch eine festgelegte äußere Kraft erreicht werden kann). Unterhalb der aktiven Bewegungsgrenze liegt der so genannte »günstige Arbeitsbereich« eines Gelenks. Bewegungsabläufe sollten im Idealfall immer unterhalb der Grenzen des Arbeitsbereichs bleiben, um Überbeanspruchungen des Gelenks zu vermeiden und im optimalen Leistungsbereich zu bleiben³⁷. Der aktive Bewegungsbereich kann zwar durch Muskeltraining vergrößert werden, doch der passive ist durch Training weitgehend unbeeinflussbar. Eine genetische Disposition wird für die passive Bewegungsgrenze der Fingergelenke angenommen. Da die passive Bewegungsgrenze ein Indikator für die Leichtigkeit einer Bewegung, d. h. für den biomechanischen Widerstand eines Gelenks ist, kann dieser Faktor als ein möglicher Prädiktor für einen erfolgreichen Verlauf einer professionellen Musikausbildung dienen³⁸.

Problematisch ist die Verwendung biomechanischer Parameter für den Erfolg eines Musikstudiums jedoch deshalb, weil ungünstige biomechanische Voraussetzungen in einem Gelenk z. B. durch günstige Voraussetzungen in einem anderen kompensiert werden können. Dieser Kompensationsmechanismus trifft sogar auf die Finger einer Hand zu, deren Beweglichkeit (passiver Gelenkwiderstand) individuell sehr unterschiedlich sein kann³⁹. Die biomechanischen Parameter der Hand stehen letztlich in einem komplexen Verhältnis zueinander, und keinesfalls gelten einfache Beziehungen wie beispielsweise die zwischen der Größe einer Hand und ihrer biomechanischen Leistungsfähigkeit. Ganz im Gegenteil: Die Gelenkbeweglichkeit nimmt sogar mit der Größe der Hand ab⁴⁰. Vor diesem Hintergrund muss die These eines besonders vorteil-

³⁷ Christoph Wagner, »Physiologische Voraussetzungen für das Geigenspiel«, in: *Violinspiel und Violinmusik in Geschichte und Gegenwart*, hrsg. v. Viola Schwarz, Graz 1975, S. 196–210.

³⁸ Christoph Wagner, »Determination of finger flexibility«, in: *European Journal of Applied Physiology* 32, 1974, S. 259–278.

³⁹ Christoph Wagner, »Physiologische Gesichtspunkte in der Instrumentalausbildung«, in: *Handbuch des Musikschulunterrichts*, hrsg. v. Diethard Wucher, Hans-Walter Berg u. Willi Träder, Regensburg 1979, S. 153–176.

⁴⁰ Christoph Wagner, »The pianist's hand: anthropometry and biomechanics«, in: *Ergonomics* 31(1), 1988, S. 97–131.

haften Längenverhältnisses zwischen dem Zeige- und Ringfinger für eine Karriere als professioneller Musiker mehr als zweifelhaft erscheinen⁴¹. Die Autoren der Fingerlängen-Studie haben die Längenverhältnisse der Zeige- und Ringfinger von Musikern eines Orchesters untersucht und ziehen den Schluss, dass ein kleiner Quotient der Längenverhältnisse einer besseren beruflichen Position (gemessen am Einkommen) innerhalb des Orchesters entspricht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass über die Bedeutung individueller physiologischer und biomechanischer Unterschiede im Hand-Bewegungsapparat für die sensorische Leistungsfähigkeit beim Instrumentalspiel nur sehr wenig bekannt ist. Die Frage nach der Existenz einer »Musikerhand« kann nach dem Stand der Forschung im Sinne der Bestimmung des Anteils schneller Muskelfasern des Typs IIX nicht beantwortet werden. Aus biomechanischer Sicht gibt es Hinweise auf die Begrenzung der motorischen Leistungsfähigkeit durch vererbte Faktoren wie den Bewegungswiderstand der Fingergelenke oder die passive Dehnungsfähigkeit des Gewebes. Insofern ist ein Einfluss einer biomechanischen Begabung auf die sensorische Leistungsfähigkeit der Hand nicht auszuschließen. Unklar bleibt jedoch, welche Rolle Kompensationsprozesse spielen, welche die z. T. großen Beweglichkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Fingern einer Hand ausgleichen können. Eine große Bedeutung kommt ferner dem Trainingsprozess zu, denn auf physiologischer Ebene bewirkt dieser z. B. eine Optimierung von Stoffwechselprozessen (bessere Kapillarisation, Sauerstoff- und Glucoseversorgung). Wenn die grundlegenden Funktionen der Muskulatur und Handmechanik jedoch optimiert sind, muss die weitere Fertigungsverbesserung auf einer höheren Verarbeitungsebene liegen. Es ist ferner auch nicht auszuschließen, dass auf der Ebene des zentralen Nervensystems schon vor dem Beginn von Lern- und Optimierungsprozessen individuell unterschiedliche Voraussetzungen vorhanden sind. Damit verlagern wir das Hauptgewicht der Erklärung psychomotorischer Leistungsunterschiede innerhalb der bereits hochgradig »trainierten« Gruppe der Instrumentalvirtuosen auf psychologische Prozesse. Diese werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

3.3. Optimierung der Bewegungsgeschwindigkeit durch Training

3.3.1. Empirische Studien zur Grundgeschwindigkeit der Handmotorik

Bevor man die Möglichkeit einer Veränderung der Tapping-Geschwindigkeit durch Training diskutiert, ist es notwendig, die Frage nach der natürlichen, ohne Training erzielbaren Maximalgeschwindigkeit von Finger- und Handbewegungen zu stellen⁴². Oskar

⁴¹ Vanessa A. Sluming u. John T. Manning, »Second to fourth digit ratio in elite musicians: Evidence for musical ability as an honest signal of male fitness«, in: *Evolution and Human Behavior* 21(1), 2000, S. 1–9.

⁴² Es werden in den folgenden Abschnitten nur Studien zum gleichmäßigen Speed-Tapping berücksichtigt. Studien zum rhythmischen Tapping stellen eine Sonderaufgabe mit einem höheren Einfluss musikalischer Expertise dar und sind mit dem isorhythmischen Tapping nicht vergleichbar.

Raif⁴³ hatte 1901 in einer empirischen Studie festgestellt, dass selbst Nicht-Musiker Einzelfinger-Repetitionen mit einer Frequenz von 5–6 Hertz bei Zeige- und Mittelfinger und von 4–5 Hertz bei den übrigen Fingern bewältigen können (siehe Tabelle 1). Dabei zeigten Musiker keine bessere Leistung als Nicht-Musiker. Vor dem Hintergrund jüngerer Studien zur Performanz von Musikern in einer Tapping-Aufgabe erscheinen Raifs Ergebnisse jedoch mehr als zweifelhaft: Der Psychologe Lutz Jäncke⁴⁴ konnte eindeutig nachweisen, dass rechtshändige Musiker auf einer Computertastatur über die Dauer von 20 Sekunden eine mittlere Tapping-Frequenz von 6,3 Hertz erreichen, wogegen rechtshändige Nicht-Musiker nur mit 5,5 Hertz klopfen können. Musiker klopfen nach Ansicht dieser Autoren schneller und haben auch geringere Leistungsunterschiede zwischen den Händen als Nicht-Musiker. Die Autoren interpretieren dieses Ergebnis als einen Expertiseeffekt, der auf dem frühen Beginn des Instrumentalspiels basiert. Ferner fügt sich das Ergebnis in das Gesamtbild ein, dass Musiker bei zeitkritischen Aufgaben immer eine höhere Leistung als Nicht-Musiker aufweisen. Es muss jedoch offen bleiben, ob die Unterschiede zwischen Musikern und Nicht-Musikern nicht auch als Ergebnis eines Selektionsprozesses interpretiert werden können. Die Gruppe der Musiker ist nämlich in ihrer Zusammensetzung deutlich stärker im Hinblick auf Intelligenz und Motivation selektiert als die Kontrollgruppe. Solange beide Gruppen jedoch in ihrer Intelligenz nicht parallelisiert sind, lässt sich der Einfluss dieser beiden Faktoren auf die Leistung im Speed-Tapping nicht hinreichend genau bestimmen.

Der umfangreichste statistische Überblick über handmotorische Grundgeschwindigkeiten – eine ausführliche Literaturrecherche von Steven Keele⁴⁵ – zeigt einerseits Unterschiede der Tapping-Geschwindigkeit bei verschiedenen Extremitätenabschnitten (Männer mit einem Finger der rechten Hand: 6,0 Hertz, mit dem rechten Handgelenk: 6,9 Hertz und mit dem rechten Ellbogen: 7,0 Hertz), bestätigt aber andererseits den oberen Grenzwert der maximalen Repetition einer Bewegung von 6–7 Hertz.

Unklar bleibt jedoch auch hier die Frage, ob die Grundbewegungsgeschwindigkeit die maximale Tapping-Geschwindigkeit limitiert. Auch die von Keele zitierte Studie mit World-Champion-Schreibmaschine-Schreibern bringt keine Klarheit: Obwohl die Champions über eine bis zu 30 Prozent höhere Bewegungsgeschwindigkeit der Hände und Arme verfügten, kann nicht geklärt werden, ob dies das Ergebnis oder die Voraussetzung ihrer Meisterschaft ist. Dies möchte ich als das »Huhn-Ei-Problem« der Tapping-Forschung bezeichnen. Wie die Lösung dieses Problems aussehen könnte, wird im nächsten Abschnitt diskutiert werden.

⁴³ Oskar Raif, »Ueber Fingerfertigkeit beim Clavierspiel«, in: *Beitraege zur Akustik und Musikwissenschaft* 1(3/4), 1901, S. 65–68.

⁴⁴ Lutz Jäncke, Gottfried Schlaug u. Helmut Steinmetz, »Hand skill asymmetry in professional musicians«, in: *Brain & Cognition* 34(3), 1997, S. 424–432.

⁴⁵ Steven W. Keele, »Motor control«, in: *Handbook of perception and human performance*, hrsg. v. Kenneth R. Boff, Lloyd Kaufman u. James P. Thomas, New York 1986, S. 30,30–30,60.

3.3.2. Optimierung aus Sicht der Expertisetheorie

Seit ca. 1990 hat sich ein einflussreiches Paradigma der Erklärung von Spitzenleistungen etabliert, das sich als Alternative zur klassischen Begabungstheorie versteht und dessen Kernaussage stark reduziert wie folgt zusammen gefasst werden kann: Weit überdurchschnittliche Leistungen werden aus Sicht der Expertisetheorie als Ergebnis eines langdauernden Prozesses zielgerichteter Verbesserung einer Fertigkeit erklärt. Die »10 Jahre 10.000 Stunden-Regel« bringt dies verkürzt zum Ausdruck. Sie bezeichnet die zur Erreichung weit überdurchschnittlicher Leistungen notwendige Dauer und den Umfang der Übung⁴⁶. Wie der Psychologe Anders Ericsson darstellt, gilt diese Regel unabhängig vom Fachgebiet⁴⁷. Im folgenden soll nun diskutiert werden, ob die Geschwindigkeit des Tappings im Sinne einer optimierten Bewegungskoordination das Ergebnis eines jahrelangen motorischen Trainings (wie des Klavierspiels) ist, oder ob es alternative Erklärungen der Leistungsunterschiede gibt.

Tapping-Forschung hat eine lange Forschungstradition, die hier aber nur kurz zusammengefasst referiert wird. Wie ein Überblick zeigt, fanden die ersten Untersuchungen bereits im 19. Jahrhundert statt⁴⁸. Die früheste Tapping-Studie jedoch, in der Musiker mit Nicht-Musikern verglichen werden, stammt aus dem Jahre 1935⁴⁹. In dieser Studie gehen die Autoren von einem Transfer des motorischen Trainings vom Klavier auf die Tapping-Geschwindigkeit aus. Es wurden sechs verschiedene Aufgaben unterschiedlicher Komplexität gestellt, von denen jedoch nur die erste eine reine Tapping-Aufgabe war. Die Musikergruppe bestand aus Klavierspielern, die mindestens drei Jahre Unterricht hatten. Die Probanden klopften mit zwei Fingern 5 Sekunden lang auf eine Morsetaste. Eine Reanalyse ergab, dass Musiker eine mittlere Tapping-Frequenz von 6 Hertz ($sd = 0,54$ Hertz) und Nicht-Musiker eine von 5,7 Hertz ($sd = 0,53$ Hertz) erzielten. Diese Unterschiede sind knapp signifikant⁵⁰. Schwachpunkt der Studie bleibt die geringe Versuchsdauer von lediglich fünf Sekunden, während der nur eine geringe Stichprobengröße (in diesem Fall 25–30 Samples) aufgezeichnet werden kann.

⁴⁶ Karl Anders Ericsson, Ralf T. Krampe u. C. Tesch-Römer, »The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance«, in: *Psychological Review* 100(3), 1993, S. 363–406.

⁴⁷ Karl Anders Ericsson (Hrsg.), *The road to excellence: The acquisition of expert performance in the arts and sciences, sports and games*, Mahwah/NJ 1996.

⁴⁸ Frederic L. Wells, »A neglected measure of fatigue«, in: *American Journal of Psychology* 19(3), 1908, S. 345–358.

⁴⁹ Charles. W. Telford u. Harry Spangler, »Training effects in motor skills«, in: *Journal of Experimental Psychology* 18, 1935, S. 141–147.

⁵⁰ Die Reanalyse unter Verwendung der Software STATS ergab bei einem t-Test eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,043$ (einseitig). Siehe auch die Webseite <http://www.decisionanalyst.com>. STATS – Statistical functions for marketing research (1998). Software (Version 1.1). Arlington, TX: Decision Analyst, Inc.

Eine eindeutige Antwort auf die Trainierbarkeit der Tapping-Geschwindigkeit gibt die Studie von Judith Laszlo⁵¹: Fünf Versuchspersonen (Studenten) trainierten in acht wöchentlichen Sitzungen mit einem Morsetaster die Tapping-Geschwindigkeit. Allerdings wurde die taktile Rückmeldung durch eine Nervenblockade unterbunden. Diese Gruppe erreichte 89,5 Prozent der Leistung einer unter Normalbedingung trainierenden Kontrollgruppe. Eine weitere Einzelperson trainierte parallel dazu unter Ausschaltung sämtlicher sensorischer Rückmeldungskanäle, so dass der Proband unsicher war, ob er überhaupt geklopft hatte. Diese Person erreichte jedoch immerhin 79 Prozent der Leistung der Kontrollgruppe. Die Autorin interpretiert ihre Ergebnisse erstens als Beleg für die Steigerbarkeit der motorischen Geschwindigkeit durch Training und zweitens als Argument für die weitgehende Unabhängigkeit dieser Steigerung von externer sensorischer Rückmeldung⁵². Das Ergebnis unterstützt unsere im vorhergehenden Abschnitt geäußerte Hypothese, dass den zentralnervösen Steuerungsprozessen eine Schlüsselrolle bei der Bewegungsoptimierung zukommt.

Zuletzt sei noch auf eine Gruppe von Studien hingewiesen, welche die Gründe für die Asymmetrie in der Handperformance untersucht (so genannte Lateralitätsstudien). Dieses Problem ist insofern für die Virtuosität von Bedeutung, als davon auszugehen ist, dass mit zunehmendem Schwierigkeitsgrad der Werke der Klavierliteratur die Asymmetrie zwischen den Händen abnimmt. Zeichnen sich jedoch beide Hände durch unterschiedliche Performanz aus, würden daraus erhöhte Anforderungen zur psychomotorischen Kompensation entstehen. Offen bleibt noch, inwiefern eine weitgehende Aufhebung der Leistungsasymmetrie durch gezieltes Training möglich ist. In einer Tapping-Studie von Michael Peters⁵³ zeigten sich zwischen Links- und Rechtshändern zunächst keine Unterschiede in der Performanz der jeweils bevorzugten Hand (5,9 Hertz bei Männern bzw. 5,5 Hertz bei Frauen). Wechseln linkshändige Männer beim Tapping jedoch auf die rechte Hand, dann zeigen sie einen geringeren Leistungsabfall (von 5,9 auf 5,4 Hertz), als wenn rechtshändige Männer auf die linke Hand wechseln (von 5,9 auf 5,1 Hertz). Dieses Ergebnis kann interpretiert werden als ein Hinweis auf einen Trainingseffekt, dem linkshändige Personen in einer »rechtshändigen« Welt unterliegen. Eine alternative Interpretation wäre, dass Linkshänder als so genannte »Beidhänder« zur Welt kommen und sich der Umwelteinfluss zugunsten der linken Hand bei ihnen nicht so stark als Linkslateralisierung auswirkt wie bei den Rechtshändern, welche einem genetischen und einem Umwelteinfluss unterliegen⁵⁴.

⁵¹ Judith I. Laszlo, ›Training of fast tapping with reduction of kinaesthetic, tactile, visual, and auditory sensations‹, in: *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 19(4), 1967, S. 344–349.

⁵² Eine Reanalyse der Unterschiede mit der Software STATS ergab eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,19$ (Binomialtest). STATS – Statistical functions for marketing research (1998). Software (Version 1.1). Arlington/TX: Decision Analyst, Inc.

⁵³ Michael Peters u. Bruce M. Durdin, ›Left-handers and right-handers compared on a motor task‹, in: *Journal of Motor Behavior* 11(2), 1979, S. 103–111.

⁵⁴ Marian Annett, ›Predicting combinations of left and right asymmetries‹, in: *Cortex* 36(4), 2000, S. 485–505.

Sollte die Hypothese eines Trainingseffektes der »rechtshändigen« Welt jedoch richtig sein, dann müssten linkshändige Kinder auf Grund einer geringeren Trainingszeit auch eine geringere Leistungsangleichung zwischen den Händen zeigen. Diese Vorhersage konnte in einer umfangreichen Untersuchung nicht bestätigt werden⁵⁵. Der Verlauf von Optimierungsprozessen durch Übung ist damit jedoch noch nicht geklärt. Hierzu führte Michael Peters⁵⁶ wiederum eine Reihe von Tapping-Experimenten durch: In einer Serie aus wiederholtem zehnssekundigem Tapping zeigte sich in jedem der drei letzten von zehn Durchgängen eine Leistungssteigerung, die von 5,2 über 5,7 bis 5,9 Hertz im dritten Durchgang verlief. Ermüdungseffekte traten nicht auf, beide Hände profitieren vom Training und unterschieden sich nicht signifikant in ihrer Leistung. In einem weiteren Experiment wurde die Frage nach der Bedeutung von Bewegungs-Teilleistungen für die Gesamtgeschwindigkeit aufgegriffen. Zunächst zeigte sich, dass bei der bevorzugten Hand die Aufwärtsbewegung schneller ist als die Abwärtsbewegung. Bei der nicht-bevorzugten Hand fällt dieser Unterschied jedoch noch deutlicher aus. Damit kommt dem Übergang zwischen den Teilbewegungen eine zentrale Bedeutung für die Bestimmung der Performanz der zyklischen Gesamtbewegung zu. Die Effizienz der zeitlichen Steuerung bestimmt somit die Performanz⁵⁷. Hiermit kommt den höheren zentralnervösen motorischen Steuerungsprozessen gegenüber einer etwaigen Steuerung durch sensorische Rückmeldung eine größere Bedeutung zu. Schnelle Tapping-Frequenzen basieren auf einer effizienten zeitlichen Steuerung. Dass Musiker Nicht-Musikern in zeitkritischen Aufgaben überlegen sind, gilt mittlerweile als gesichert, was für einen Expertiseeffekt spricht⁵⁸. So klopfen Musiker gegenüber Nicht-Musikern einen Rhythmus mit geringeren zeitlichen Abweichungen nach⁵⁹, und ebenso zeigten Musiker eine geringere Händigkeit-Asymmetrie bei gleichzeitig höherer Geschwindigkeit in einer Tapping-Aufgabe⁶⁰. Insofern besteht kein Anlass, an der grundsätzlichen Bedeutung eines Trainingseffekts zu zweifeln. Wie weiter oben schon erwähnt, muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass ein eindeutiger Trainingseffekt erst dann als sicher angenommen werden kann, wenn

⁵⁵ Michael Peters u. Bruce M. Durning, »Handedness measured by finger tapping: A continuous variable«, in: *Canadian Journal of Psychology* 32(4), 1978, S. 257–261.

⁵⁶ Michael Peters, »Why the preferred hand taps more quickly than the non-preferred hand: Three experiments on handedness«, in: *Canadian Journal of Psychology* 34(1), 1980, S. 62–71.

⁵⁷ Aus neuropsychologischer Sicht ist das Verhältnis zwischen Übung und neurologischen Steuerungsprozessen noch erheblich komplizierter: Jede willkürliche Bewegung impliziert neben der Kontraktion des Agonisten gleichzeitig eine Inhibition des Antagonisten, für die das Kleinhirn verantwortlich ist. Es könnte nun sein, dass die zeitlimitierenden Faktoren aus der Optimierung der Aktivierungs-Inhibitions-Bursts resultieren, die ein neuronales Netz unter Einschluss des Cerebellums bewerkstelligt, welches zusätzlich unter Reifungseinfluss steht und erst in zweiter Linie unter Trainingseinfluss. Siehe hierzu Ottensmeier u. a., *Duration of elementary psychomotoric* (wie Anm. 17).

⁵⁸ Ralf T. Krampe, *Maintaining excellence*, Berlin 1994.

⁵⁹ Marek Franek, Jiri Mates, Tomas Radil, Kurt Beck u. Ernst Pöppel, »Finger tapping in musicians and non-musicians«, in: *International Journal of Psychophysiology* 11(3), 1991, S. 277–279.

⁶⁰ Jäncke u. a., *Hand skill asymmetry* (wie Anm. 44), S. 424–432.

Experimental- und Kontrollgruppen in Hinblick auf Alter und Intelligenz kontrolliert, d. h. parallelisiert werden. Dies war jedoch in keiner bekannten Studie bisher der Fall. Als wahrscheinlich ist ein Einfluss des Trainings auf die Regelmäßigkeit (und nicht auf die Geschwindigkeit) anzunehmen. Ein Training müsste sich dann aber auf die Regelmäßigkeit der nicht-präferierten Hand stärker als auf die der präferierten und im täglichen Leben bereits optimierten Hand auswirken.

Offen bleibt abschließend, ob die Möglichkeit, eine symmetrische Handperformance beim Tapping zu erzielen, auch auf wesentlich komplexere Bewegungsabläufe, wie sie beim Instrumentalspiel auftreten, übertragbar ist. Grundsätzlich spricht nichts gegen diese Annahme, auch wenn der Übungsaufwand für die nicht-präferierte Hand mit zunehmendem Komplexitätsgrad der Aufgabe gemäß dem Potenzgesetz der Übung vermutlich steigen wird.

Offen bleibt auch ein methodisches Problem: In allen zitierten Studien wurden die Tapping-Leistungen von Musikern mit denen von Nicht-Musikern verglichen. Wenn man zusätzlich Aussagen über die Wirksamkeit von Optimierungs- bzw. Trainingsprozessen machen möchte, ist dieser Vergleich jedoch nicht zulässig. Man kann nämlich nicht eine bereits hochselektierte mit einer weniger selektierten Stichprobe vergleichen. Wenn man Aussagen über die Grenzwerte der Handmotorik machen möchte, müssen Stichproben innerhalb der Gruppe professioneller Instrumentalisten mit gleichem Instrument verglichen werden (z. B. einerseits anerkannte Virtuosen und andererseits hervorragende, aber nicht herausragende Spieler). Eine endgültige Klärung des Einflusses von Übung auf die psychomotorische Leistung könnte nur ein Experiment erbringen, bei dem die Leistungen zweier parallelisierter Versuchsgruppen (Kontroll- und Experimentalgruppe) vor und nach einer Trainingsphase miteinander verglichen werden. Die idealen Versuchspersonen für ein solches Experiment wären Musikstudenten, da sie bereits eine Hochleistungsgruppe darstellen, die sich mit ihrer Performanz in einem Grenzbereich der Leistungsfähigkeit befindet und für die jede weitere motorische Geschwindigkeitssteigerung von Interesse ist.

3.4. Ausblick: Optimierung im Kontext von Theorien der mentalen Leistung (Intelligenz)

Der vorhergehende Abschnitt hat die Bedeutung zentralnervöser Prozesse für die Geschwindigkeit bei einer einfachen motorischen Aufgabe herausgearbeitet. Im Gegensatz zur Expertisetheorie, die von einer domänenspezifischen Leistung ausgeht, soll im letzten Abschnitt die Hypothese geprüft werden, dass es sich bei der Erzielung von Spitzenleistungen bei einer psychomotorischen Aufgabe um eine generelle Systemeigenschaft der zentralnervösen Informationsverarbeitung handelt, die auf einer individuell überdurchschnittlichen Fähigkeit des Gehirns zur Optimierung basiert. Im Gegensatz zur Expertisetheorie und auch zu Howard Gardners Theorie der multiplen Intelligenzen⁶¹

⁶¹ Howard Gardner, *Abschied vom IQ. Die Rahmen-Theorie der vielfachen Intelligenzen*, Stuttgart 1998.

würde ein solcher »Generalfaktor«⁶² die Virtuosität in den Kontext der mentalen Gesamtkapazität eines Spielers stellen. Mit dieser Sichtweise, einer Synthese zwischen Intelligenztheorie und Expertisetheorie, betreten wir allerdings Neuland, und erst seit den letzten Jahren liegen experimentelle Ergebnisse vor, die eine solche Hypothese unterstützen. Im folgenden werde ich mich auf die Diskussion des Zusammenhangs zwischen der Geschwindigkeit bei einfachen kognitiven Aufgaben und der mentalen Leistung und danach auf den Zusammenhang mit Parametern des Blickverhaltens bei einer okulo-motorischen Aufgabe beschränken.

3.4.1. *Tapping, Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung und mentale Leistungsfähigkeit*

Im Rahmen der Forschung zu einem Generalfaktor (g-Faktor) der Intelligenz hat sich in den letzten Jahren eine Forschungsrichtung etabliert, die besonders die Bedeutung der Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung untersucht. Dieser »Mental-Speed«-Ansatz geht von der Annahme aus, dass interindividuelle Unterschiede in der kognitiven Gesamtleistung des Menschen (gemessen durch die so genannte »psychometrische Intelligenz«) durch die Geschwindigkeit bei elementaren kognitiven Aufgaben bestimmt wird (so genannte »Elementary cognitive tasks«, im folgenden ECTs genannt)⁶³. Begründet wird dies durch den Hauptvertreter dieses Ansatzes, Arthur Jensen⁶⁴, erstens mit dem Argument der begrenzten Informationsflusskapazität, welche durch eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit auch einen größeren Durchsatz ermöglicht, und zweitens durch ein physiologisches Argument, nämlich dass eine schnelle Verarbeitung vor dem Zerfall der im Kurzzeitgedächtnis gespeicherten Informationen stattfinden kann. Heute sucht man allerdings nicht mehr nach biologischen Substraten der Verarbeitungsgeschwindigkeit, sondern geht von kognitiven Prozessen aus, die z. B. zwischen Reaktionszeiten und Intelligenz vermitteln. Zwei Beispiele zum Zusammenhang zwischen ECTs und allgemeiner Intelligenz seien genannt: Zwischen der für den Zahlen-Verbindungs-Test (ZVT)⁶⁵ benötigten Dauer und Intelligenz konnten Korrelationen von bis zu $r = -0,71$ nachgewiesen werden⁶⁶, und mit den Wahl-Reaktionszeiten im so genannten »Hick-Paradigma« wurden Korrelationen von bis zu $r = -0,39$ gemessen⁶⁷, was einer mittleren Beziehungsstärke entspricht.

⁶² Die Theorie des g-Faktors der Intelligenz geht zurück auf die Arbeiten von Spearman. Siehe Charles E. Spearman, »General intelligence: objectively determined and measured«, in: *American Journal of Psychology* 15(2), 1904, S. 102–293.

⁶³ Aljoscha Neubauer, *Intelligenz und Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung*, Wien 1995.

⁶⁴ Arthur R. Jensen, *The g-factor. The science of mental ability*, Westport/CT 1998.

⁶⁵ Wolf D. Oswald u. Erwin Roth, *Der Zahlen-Verbindungs-Test [ZVT]*, Göttingen 1997.

⁶⁶ Neubauer, *Intelligenz und Geschwindigkeit* (wie Anm. 63).

⁶⁷ Ebenda.

Lassen sich diese Befunde auf die Tapping-Geschwindigkeit übertragen, und worin besteht die Verbindung zwischen Tapping und Intelligenz? Eine aktuelle Studie fand immerhin eine Korrelation von $r = -0,29$ zwischen dem IQ und dem mittleren Tapping-Intervall über 30 Sekunden⁶⁸. Außerdem fanden die Autoren einen beinahe linearen Zusammenhang in der Form, dass zwei IQ-Punkten ein Gewinn beim Tapping-Intervall von einer Millisekunde entsprach. Eine erste Antwort könnte sich in der Optimierung der Bewegungskoordination zwischen Auf- und Abwärtsbewegung finden. Wie weiter oben diskutiert wurde, besteht die periphere Optimierung beim Tapping in einer Angleichung der Dauern der Auf- und Abwärtsbewegung, denn bei der bevorzugten Hand ist die Aufwärtsbewegung schneller als die Abwärtsbewegung. Die Angleichung der beiden Bewegungsdauern wäre (unabhängig von sonstigen Trainingseffekten) eine notwendige Optimierungsvariable, durch die erst eine Geschwindigkeitssteigerung möglich wird. Eine zweite Antwort könnte die zeitliche Optimierung der Antagonisteninhibition liefern.

Für die These, dass das schnelle Tapping die Folge einer Systemeigenschaft ist, finden sich experimentelle Belege: In einer frühen Studie⁶⁹ wurden 50 Kinder im Alter von ca. zehn Jahren, die einen IQ-Wert von mehr als 135 (Stanford-Binet) hatten, mit einer Tapping-Aufgabe über 30 Sekunden getestet. Die überdurchschnittlich Intelligenten erreichten eine mittlere Frequenz von 5,2 Hertz, während die gleichaltrige Kontrollgruppe mit einem durchschnittlichen IQ von 110 lediglich eine Geschwindigkeit von 4,7 Hertz (rechte Hand) erreichte. Die Werte für die rechte und linke Hand unterschieden sich signifikant. Die Autoren interpretieren den Befund als Ergebnis einer vorgezogenen physischen Entwicklung. In einer anderen frühen Studie⁷⁰ fand man dagegen keine Tapping-Unterschiede. Allerdings war in dieser Studie die Altersstreuung erheblich (8–12 Jahre), obwohl Tapping einem deutlichen Alterseffekt unterliegt, und andererseits war das Kriterium für die Experimentalgruppe nur ein IQ von mindestens 115, was keiner besonders starken Selektion entspricht.

Die letzte hier erwähnte Studie zum Zusammenhang zwischen Tapping-Geschwindigkeit und allgemeiner Intelligenz untersuchte den zeitlichen Verlauf der Tapping-Leistung vor dem Hintergrund der Frage nach dem Einfluss motivationaler Variablen (Anstrengung, Ausdauer) und mentaler Kapazität⁷¹. Die Unterteilung des einminütigen Tappings in vier gleichgroße Abschnitte zeigte, dass diejenigen Personen, welche eine hohe Leistung in einem Intelligenztest (es wurde der g-Faktor mit den Raven-Matrizen gemessen) erzielten, auch die höchste Steigerungsrate im letzten Tapping-Abschnitt erzielten ($r = 0,28$). Die Autoren interpretieren dies als kurzfristig erfolgreiche Anpassungsstrategie, was auch als erfolgreiche psychomotorische Optimierung bezeichnet werden kann

⁶⁸ Siehe Ottensmeier u. a., Tapping (wie Anm. 17).

⁶⁹ Leta S. Hollingworth, ›Tapping-rate of children who test above 135 IQ (Stanford-Binet)‹, in: *Journal of Educational Psychology* 17(8), 1926, S. 505–518.

⁷⁰ Frieda A. Kiefer, ›Manual motor correlation in superior children‹, in: *Journal of Applied Psychology* 13, 1929, S. 357–371.

⁷¹ Graham R. Wilson, Olive A. Tunstall u. Hans J. Eysenck, ›Individual differences in tapping performance as a function of time on the task‹, in: *Perceptual & Motor Skills* 33(2), 1971, S. 375–378.

(auch wenn die Tapping-Geschwindigkeit nur als ein mäßig valider Indikator für Intelligenz gelten kann, was jedoch für alle reinen Speed-Aufgaben gilt).

Ich behaupte nicht, dass die Tapping-Leistung ein direkter Indikator für Intelligenz ist, doch da es sich beim Tapping ebenfalls um eine ECT handelt, interpretiere ich sie als die messbare Systemoptimierung im Sinne einer optimalen Aufgabenanpassung. Dies ist eine Eigenschaft intelligenten Verhaltens. Umgekehrt lässt sich daraus die Hypothese ableiten, dass herausragende Virtuosen, die es geschafft haben, ihre Psychomotorik in einem Grenzbereich noch zu optimieren, eine weit überdurchschnittliche allgemeine Intelligenz besitzen. Aus dieser Sicht wäre eine virtuose Begabung aber nur eine unspezifische Ausprägung von Intelligenz. Sollte diese Annahme zutreffen, dann müssten herausragende Virtuosen auch in der Lage sein, auf nicht-musikalischen Gebieten Herausragendes zu leisten. Hierzu liegen keine Daten vor, ebenso wenig wie Intelligenztests mit virtuosen Musikern existieren⁷². Zumindest informelle Argumente lassen sich für die These, dass Musik nicht intelligent macht, sondern die Intelligenten Musik machen (aber in nicht-musikalischen Berufen erfolgreich sind), finden: Ein Blick auf die Homepage des jährlich in Paris stattfindenden Klavierwettbewerbs für Amateure⁷³ zeigt erstaunliche Karrieren unter den mit hochvirtuosen Programmen teilnehmenden Pianisten: Unter den sieben Finalisten befinden sich u. a. eine Rechtsanwältin und ein Apotheker. Der Gewinner des Jahres 2002, Paul Romero, ist hauptberuflich Produzent von Videospiele aus Los Angeles.

Das Gegenargument, dass bisherige Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen überdurchschnittlicher musikalischer Begabung und Intelligenz allenfalls schwach bzw. nicht eindeutig nachweisen konnten⁷⁴, trifft so nicht, denn in der Regel sind in diesen Studien die musikalischen Vergleichsgruppen bereits hochgradig selektiert. Je breiter das untersuchte Intelligenzspektrum jedoch ist, desto höher müsste die Korrelation zwischen Intelligenz und Tapping-Geschwindigkeit ausfallen. Umgekehrt wird vorhergesagt: Je homogener die Untersuchungsgruppe ist (z. B. eine Gruppe aus nach Intelligenz selektieren Musikstudenten), desto mehr wird die Trainingsintensität über die erzielte Tapping-Geschwindigkeit aussagen.

Ein letzter Aspekt des Zusammenhangs zwischen Intelligenz und psychomotorischer Geschwindigkeitsoptimierung betrifft die verwendete Aufgabe: Im Gegensatz zum ein-

⁷² Die einzige mir bekannte Quelle, in der der Versuch einer Bestimmung des IQ-Wertes von berühmten Musikern versucht wurde, ist die Studie von Catharine Cox. Folgende IQ-Werte wurden auf Grund biographischer Analysen geschätzt: Für J. S. Bach 125–140, für L. v. Beethoven 135–140 und für W. A. Mozart 150–155. Allerdings ist die Zuverlässigkeit dieser Daten dem Verfahren des »Kaffeersatzlesens« vergleichbar. Siehe auch Catharine M. Cox, *Genetic studies of genius. II. The early mental traits of three hundred geniuses*, Stanford/CA 1926.

⁷³ Siehe <http://www.pianoamateur.com> und den Bericht über den Wettbewerb 2002 in der *Neuen Musikzeitung*, März 2002, S. 27.

⁷⁴ In einem Standardlehrbuch zur Intelligenzforschung findet sich nur am Rande die Diskussion des Zusammenhangs zwischen musikalischer Begabung und Intelligenz am Beispiel der fragwürdigen Komponistenstudie von Cox. Siehe Nicholas J. Mackintosh, *IQ and human intelligence*, Oxford 1998. Zur Übersicht siehe außerdem Heiner Gembris, *Grundlagen musikalischer Begabung und Entwicklung*, Augsburg 1998.

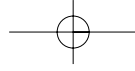
fachen Bewegungsablauf des Speed-Tappings bleibt die Frage offen, ob bei einer aus multiplen Gelenkbewegungen bestehenden Optimierungsaufgabe, wie etwa einem Triller auf der Klaviatur, der Zusammenhang zwischen dem IQ und der Trillergeschwindigkeit nicht höher als bei der Tapping-Geschwindigkeit sein wird. Multiple Gelenkbewegungen ermöglichen durch die sich addierenden Bewegungszustellungen grundsätzlich eine höhere Anschlagshäufigkeit als solche, die mit nur einem Gelenk (z. B. einem Finger) ausgeführt werden. Zumindest kann die Vorhersage einer unterschiedlichen Korrelation zwischen IQ und einfacher versus multipler Gelenkbewegung experimentell überprüft werden.

3.4.2. Optimierung okulomotorischer Bewegungsparameter und ihre Beziehung zur »mentalen Leistungsfähigkeit«

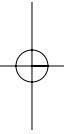
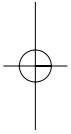
Wenn die Fähigkeit zur überdurchschnittlichen Optimierung eine Systemeigenschaft des Gehirns ist, dann müsste sie sich auch in anderen als psychomotorischen Aufgaben nachweisen lassen. Diese Annahme war in den letzten 20 Jahren Gegenstand der Untersuchung der schnellen Augenbewegungen (so genannter Sakkaden) durch den Kölner Neuropsychologen Niels Galley. In einer Studie⁷⁵ zum Zusammenhang zwischen Augenbewegungsparametern und Intelligenz (gemessen mit dem Wechsler-Intelligenztest) erhielten die Versuchspersonen die Aufgabe, ein sich zunehmend beschleunigendes optisches Signal (den so genannten »springenden Punkt«, d. h. ein Triggersignal, das seine Position auf dem Bildschirm sprunghaft horizontal verändert) mit dem Blick zu verfolgen. Mit zunehmender Bewegungsfrequenz kann das Signal nur noch dann erfolgreich verfolgt werden, wenn die Person etwas früher auf den nächsten Erscheinungspunkt des Signals schaut, d. h. wenn sie die Bewegung antizipiert, statt nur zu reagieren. Der Anteil dieser antizipatorischen Sakkaden (und noch mehrere andere Augenbewegungsparameter) kann aus den abgeleiteten Elektrookulogrammdata herausgefiltert werden. Es zeigte sich eine deutliche Korrelation sowohl zwischen dem g-Faktor und dem Median der Reaktionszeit ($r(119) = -0,34$) als auch dem g-Faktor und dem Median des Zeitpunktes der Bewegungsantizipation ($r(119) = 0,31$). Insgesamt lässt sich damit aussagen, dass die intelligenteren Personen ihre Okulomotorik so optimiert haben, dass sie kürzer fixieren, schneller reagieren und einen höheren Anteil antizipatorischer Sakkaden mit einer schmaleren Verteilung dieser antizipatorischen Sakkaden verwenden. Dies Verhalten scheint eine nicht durch Training der Blickverfolgungsaufgabe verbesserbare Systemeigenschaft des Augenbewegungssystems zu sein. Die Optimierung des Systems liegt nur darin, dass die intelligenteren Personen sowohl schnellere als auch genauere Bewegungen verwenden.

Das für die Virtuositätstheorie der psychomotorischen Optimierung Neue liegt nun in der Übertragung von Niels Galleys Befunden auf das Tapping bzw. auf das Instrumentalspiel: Bei den Augenbewegungen gehen die Autoren davon aus, dass die Hemmung des

⁷⁵ Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Niels Galley u. Lars Galley, »Fixation durations and saccadic latencies as indicators of mental speed«, in: *Personality psychology in Europe*, hrsg. v. Ivan Mervielde, Ian J. Deary, Filip De Fruyt u. Fritz Ostendorf, Tilburg 1999, S. 221–234.



»neuronalen Rauschens« das Optimierungsverhalten einschließlich der Geschwindigkeitssteigerung am besten beschreibt. Je erfolgreicher die »Schärfung« dieser Impulse im Sinne einer genaueren und schnelleren Bewegungssteuerung in die richtige Richtung gelingt, desto effizienter gelingt auch die Augenbewegungsaufgabe. Dies bezeichnet der Autor in letzter Konsequenz als die »Intelligenztheorie erfolgreicher Inhibition«, und Optimierung würde sich durch mehr Output bei weniger Input auszeichnen. Zur Prüfung dieser Vorhersage wäre ein »Experimentum crucis« durchzuführen, bei dem sowohl die Sakkadenparameter beim »springenden Punkt« als auch der IQ von Instrumentalvirtuosen und ihre Tapping-Geschwindigkeit gemessen wird. Mit diesem Instrumentarium ließe sich eine neuropsychologische Virtuositätstheorie begründen, die sich auf dem aktuellen Stand der Neurowissenschaften befände⁷⁶.



⁷⁶ Ich möchte den Kollegen Eckart Altenmüller, Hans-Christian Jabusch (beide vom Institut für Musikphysiologie und Musikermedizin der HMT Hannover), Niels Galley (Institut für Psychologie, Universität Köln), Andreas Lehmann (HfM Würzburg) und Ralf Krampe (MPI für Bildungsforschung, Berlin) ganz herzlich für Literaturhinweise und wertvolle Anmerkungen zum Manuskript danken.

