

C.T. Haas, S. Turbanski, I. Kaiser, D. Schmidtbleicher

Biomechanische und physiologische Effekte mechanischer Schwingungsreize beim Menschen

Biomechanical and physiological effects of oscillating mechanical stimuli in humans

Institut für Sportwissenschaften, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main

Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Beitrages ist die zusammenfassende Darstellung biomechanischer und physiologischer Effekte der Applikation mechanischer Schwingungsvorgänge beim Menschen.

Die biologische Wirkungsweise mechanischer Schwingungsreize ist ein komplexes Phänomen, das Forschungsgegenstand verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen ist. Ausgehend vom Verständnis, dass Komplexität vor allem in einer hohen Anzahl an möglichen Systemzuständen bzw. Lösungsmöglichkeiten besteht, wird diese im vorliegenden Forschungsgebiet offensichtlich, wenn man das breite Spektrum der aus verschiedenen Arbeitsgruppen hervorgehenden Untersuchungsergebnisse betrachtet. Im Hinblick auf den Einfluss mechanischer Schwingungen auf koordinative Aspekte von Bewegungen zeigen zahlreiche Studien auf, dass bei einer direkten Schwingungsapplikation am Muskel kinästhetische Illusionen und damit verbundene Korrekturbewegungen ausgelöst werden. Andererseits führen niederfrequente mechanische Ganzkörperschwingungen bei M. Parkinson-Patienten zu einer signifikanten Reduktion pathologischer Koordinationsparameter. Im Bereich der trainingswissenschaftlichen Betrachtung lassen sich erhebliche Ergebnisdivergenzen aufzeigen. So reichen die Resultate bezüglich der Effekte von Schwingungsreizen auf Maximal- und Schnellkraft von leicht negativ bis außerordentlich positiv.

Der physiologische Hintergrund des breiten Ergebnisspektrums ist zum einen darin zu sehen, dass mechanische Schwingungsreize auf multiplen physiologischen Ebenen wirksam werden, zum anderen in einer nichtlinearen Interaktionsstruktur zwischen Schwingungsreiz und biologischer Reaktion.

Schlüsselwörter: mechanische Schwingungen, Koordination, Kraft

Einleitung

Seit Mitte der neunziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts sind mechanische Schwingungsvorgänge (synonym findet auch der Begriff "Vibration" Verwendung) vermehrt Gegenstand und Mittel im konditionellen Training. Parallel dazu hat sich das Forschungsinteresse vor allem im Bereich der Biomechanik und der Trainingswissenschaften erheblich gesteigert. Primärer Untersuchungsgegenstand sind dabei die Effekte der Schwingungsreize im Hinblick auf die motorische Kraft (z.B. 6, 7, 8, 67, 68, 71). Ein weiterer Fokus liegt

Summary

This paper shows an overview of biomechanical and physiological effects of mechanical oscillations in humans.

The biological function of mechanical oscillations is a complex phenomenon that is analysed in various scientific fields. The basis of complexity is a large number of possible system states and solutions respectively which becomes obvious when one looks at the wide variety of scientific results. Regarding the effects of vibrations on coordination some analyses show that direct vibration transfer to muscles or tendons can lead to kinaesthetic illusions. Other studies found that low frequent whole-body-vibration can reduce coordinative deficits in Parkinson's disease patients. The diversity of scientific data also becomes obvious in the field of power and strength training. Results vary from slightly negative to highly positive effects of vibrations stimuli.

The physiological background of the wide variety of results is based on one hand on multiple physiological levels that can be affected by mechanical oscillations and on the other hand on a non-linear structure of interaction between vibration stimuli and biological reaction.

Key words: mechanical oscillations, coordination, power, strength

auf den Auswirkungen bezüglich koordinativer Eigenschaften und Beweglichkeit (z.B. 24, 26, 32). Abgesehen vom Forschungsinteresse im Bereich der Trainings- und Bewegungswissenschaften sind die Auswirkungen mechanischer Schwingungen in anderen wissenschaftlichen Disziplinen seit geraumer Zeit Gegenstand der Forschung. So untersucht die Arbeitsmedizin seit den fünfziger Jahren die bei diversen Arbeitsabläufen entstehenden Schwingungsbelastungen und daraus resultierende gesundheitliche Folgen (z.B. 14, 17, 18, 21, 22, 54, 72). Im Bereich der neurophysiologischen Grundlagenforschung dient die Schwingungsapplikation aufgrund

der potenten und gleichzeitig in hohem Maße dosierbaren nervalen Stimulusfunktion zur Analyse des sensorischen Entladungsverhaltens und der Reflexverschaltungen (z.B. 5, 11, 15, 48, 80, 81, 82). Gegenstand dieses Beitrages ist die Darstellung der Effekte mechanischer Schwingungsreize beim Menschen aus biomechanischer und neurophysiologischer Sicht. Der Fokus soll dabei in erster Linie auf den multiplen Effektebenen liegen und weniger einen einzelnen Funktionsmechanismus herausheben.

Effektebenen mechanischer Schwingungsreize

Betrachtet man die aus der Literatur hervorgehenden Resultate, so wird deutlich, dass der Transfer von mechanischen Schwingungen auf den Menschen mit einem weiten Spektrum an physiologischen Reaktionen verbunden ist. Erklärbar ist dies zum einen durch unterschiedliche Schwingungsparameter (Frequenz, Amplitude, Form etc.), zum anderen durch diverse Möglichkeiten, Schwingungsenergie auf den Menschen zu übertragen. Aus mechanischer Sicht wird klassischer Weise zwischen Ganz- und Teilkörperschwingungen (GKS bzw. TKS) differenziert. Differenzierungskriterium ist hier der Anteil des Körpergewichts, der am Transferpunkt wirksam ist (70). Besteht ein hoher Gewichtsanteil (z.B. beim Stehen, Sitzen oder Liegen auf einem vibrierenden Untergrund), liegen GKS vor, ist ein geringer Anteil vorhanden (z.B. beim Halten eines vibrierenden Gegenstandes), werden TKS appliziert. Letztere lassen sich bezüglich des Applikationsortes weiter differenzieren. Einerseits können sie auf ein gesamtes Körpersegment übertragen werden, andererseits gezielt auf ein Organ (z.B. Muskel- oder Sehnenkomplex).

Die Interaktion zwischen Schwingungsreiz und biologischer Reaktion ist durch ein mehrdimensionales Ursache-Wirkungs-System gekennzeichnet, das sich dadurch charakterisieren lässt, dass eine lineare Veränderung von Reizparametern, z.B. die Veränderung der Schwingungsfrequenz, meist in einer nichtlinearen und häufig auch nichtproportionalen Modifikation der biologischen Antwort resultiert (25, 72). Die Ursachen des nichtlinearen Systemverhaltens liegen dabei in verschiedenen Bereichen:

a) Mechanik: Aus mechanischer Sicht stellt der Mensch ein mehrfach massen- und federgekoppeltes Oszillatorensystem dar, das als frequenzselektiver Filter bezüglich des endogenen Schwingungstransfers fungiert. Je nach Ort der Schwingungsapplikation und der Körperposition verändert sich die Kopplungsfunktion und somit die Cut off Frequenz des Filters. So zeigten *Zimmermann und Cook* (87), dass sich der Energietransfer zwischen Hüfte und Kopf bei Schwingungsfrequenzen von unter 6 Hz bei einer Hüftposition von 9° posterior signifikant von den 0° bzw. 9° anterior Bedingungen unterscheidet. Demgegenüber ergibt sich bei Schwingungsfrequenzen von über 6 Hz ein inverses Verhältnis. Studien von *Lundström et al.* (44) stützen diese Ergebnisstruktur. So konnten unterschiedliche Schwingungstransferfunktionen

in Abhängigkeit vom Spannungsgrad der Muskulatur (entspannt vs. angespannte Position) festgestellt werden.

Das Auftreten von Resonanzerscheinungen stellt einen weiteren, weitgehend mechanischen Prädiktor der Nichtlinearitätsfunktion dar. Die Erzeugung von Resonanzerscheinungen basiert auf der Anregung eines schwingungsfähigen Systems im Bereich seiner Eigenfrequenz. Erfolgt diese Anregung über einen - relativ zur Schwingungsfrequenz - längeren Zeitraum, so können Resonanzkatastrophen (Zerstörung des Systems) entstehen. Analysiert man die in der Literatur angeführten Ganzkörperresonanzfrequenzen beim stehenden Menschen, so zeigt sich zum einen ein breites Spektrum, das sich zwischen 5 und 16 Hz erstreckt, zum anderen liegen mehrere argumentative Divergenzen vor (17, 18, 19, 20, 25, 61). Eine mögliche Ursache liegt in der o. a. positionsabhängigen Frequenzselektion. Des Weiteren besteht nach *Diekmann* (19) eine Abhängigkeit von der Schwingungsrichtung. So geht dieser davon aus, dass beim stehenden Menschen nur Vertikalschwingungen zu Resonanzerscheinungen führen, wobei die Funktion der Erdbeschleunigung als Ursache diskutiert wird. Theoriebasiert sind allerdings auch Situationen darstellbar, in denen auch Horizontalschwingungen Resonanzerscheinungen verursachen. Ergeben sich bei einem schwingungsfähigen System Abweichungen zwischen Eigenfrequenz und Anregungsfrequenz oder variiert die Anregungsfrequenz in einer harmonischen Form, so resultieren - in Abhängigkeit vom Grad der Abweichung bzw. Variation - Schwebungsvorgänge. Unregelmäßige Frequenzänderungen stellen aus physiologischer und informationstheoretischer Sicht eine eigene Reizkonfiguration dar und erzeugen weder Resonanzzustände noch Schwebungsvorgänge. Der physiologische Hintergrund der unterschiedlichen Qualitäten von Schwingungsreizen besteht darin, dass harmonische Schwingungsvorgänge nach einer kurzen Erfahrungsphase für den Menschen weitgehend antizipierbar sind. Die Schwingungsregulation erfolgt dabei über eine Anpassung der Stiffness der jeweiligen Muskel-Sehnen-Komplexe, welches weiterführend zu relativ rhythmischen muskulären Aktivierungsmustern führt. Stochastische Schwingungsvorgänge sind demgegenüber nicht vorhersehbar. Sie stellen somit ständig neue Reizzustände dar und bedingen ständige Stiffnessadaptationen, um an das jeweilige Reizmuster angepasste muskuläre Aktivierungszustände zu erzeugen. Da dies nur in begrenztem Umfang möglich ist, ergeben sich des Weiteren in arhythmischer Folge ballistische Korrekturbewegungen (22, 72, 74).

b) Physiologie: Aus physiologischer Sicht ist die Nichtlinearität der Reiz-Reaktionsfunktion u. a. dadurch erklärbar, dass Schwingungsreize nicht exklusiv von einem Sensortyp erfasst werden. Stattdessen besteht eine Interaktion zwischen verschiedenen Sensortypen (Hautsensoren, Muskelspindel, Golgisehnenorgan, Vestibularapparat etc.), die unterschiedliche, sich z. T. überlagernde Sensitivitätsbereiche und Bestfrequenzen (Reizfrequenz, bei der ein Sensortyp die höchste Sensitivität zeigt (31)) aufweisen (z.B. Meissner- und Pacini-Körper). Die sensorische Integration basiert nicht auf ei-

ner Funktion, in der die verschiedenen afferenten Signale in gleicher Wertigkeit repräsentiert sind, vielmehr dominieren einzelne Afferenzen. Phasensprüngen lassen sich in der physiologischen Reaktion als Dominanzwechsel zwischen verschiedenen Sensortypen erklären (25, 31, 33, 44, 65, 87). Die Dominanz eines Sensortyps resultiert u. a. daraus, in wie weit die Stimulationsfrequenz mit der sensorischen Bestfrequenz übereinstimmt. Die Existenz von Bestfrequenzen ist nicht nur mikroskopisch auf die Funktion und das Entladungsverhalten eines Sensortyps beschränkt, sondern kommt auch auf makroskopischer Ebene zum Tragen (25). So besteht für Schwingungen im θ -Frequenzbereich (3,5 – 7,5 Hz, orientiert an der Kategorisierung von EEG-Signalen und den damit zusammenhängenden Aktivierungszuständen) gegenüber Schwingungsvorgängen in anderen Frequenzbändern, wie z.B. α (7,5 – 12,5 Hz), aber gleichen Beschleunigungseffektivwerten, eine besonders hohe Sensitivität (22). Neben der sensorischen Dominanzfunktion liegt ein weiterer Erklärungsansatz für dieses Phänomen in der Interferenz zwischen peripher generierten neuronalen Oszillationen – als Folge der Schwingungsapplikation – und zentral, supraspinal vorliegenden nervalen Oszillationen (45, 46). Derartige Interferenzen lassen sich des Weiteren feststellen, wenn man biomechanische oder physiologische Reaktionsmuster beim Übergang zwischen verschiedenen Frequenzbändern analysiert (25). So resultiert der Wechsel zwischen dem θ - und α -Frequenzbereich in signifikanten

den Frequenzbändern könnte somit eine konstruktive Interferenz zentraler und peripherer nervaler Oszillationen darstellen (25).

Einflüsse auf Propriozeption und Koordination

a) **Akut-Effekte:** Das Wissen um die stimulierende Funktion mechanischer Schwingungsvorgänge für verschiedene Sensorensysteme geht auf die Tier- bzw. Humananalysen von *Matthews* (48) sowie *Hagbarth und Eklund* (27) zurück und die daraus resultierenden Beschreibungen des Tonic-Vibration-Reflex (TVR).

Die Übertragung von Vibrationen auf einen Muskel-Sehnen-Komplex verursacht eine rhythmische Reizung der Muskelspindeln mit entsprechender Erhöhung des afferenten Outputs. Auf efferenter Seite kann dies zu rhythmischen, reflektorischen Kontraktionsabläufen führen.

In neuerer Zeit beschäftigen sich zahlreiche Studien mit dem Zusammenhang zwischen Art bzw. Lokalität des Schwingungstransfers, der Reizcharakteristik und den jeweiligen biologischen Folgen hinsichtlich Bewegungs- und Haltungskontrolle (z.B. 15, 38, 42, 53, 64, 74, 75, 81, 82, 83). Mehrfach wurde dabei aufgezeigt, dass mechanische Schwingungsreize die Ausführung von Zielbewegungen bzw. die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts massiv be-

einflussen können, sowohl akut als auch in Form von Post-Effekten. *Kasai et al.* (38) und *Verschueren et al.* (81, 82, 83) führten diverse Trackingexperimente durch, die auf ein- oder zweigelenkigen Armbewegungen basierten und wiesen nach, dass die Übertra-

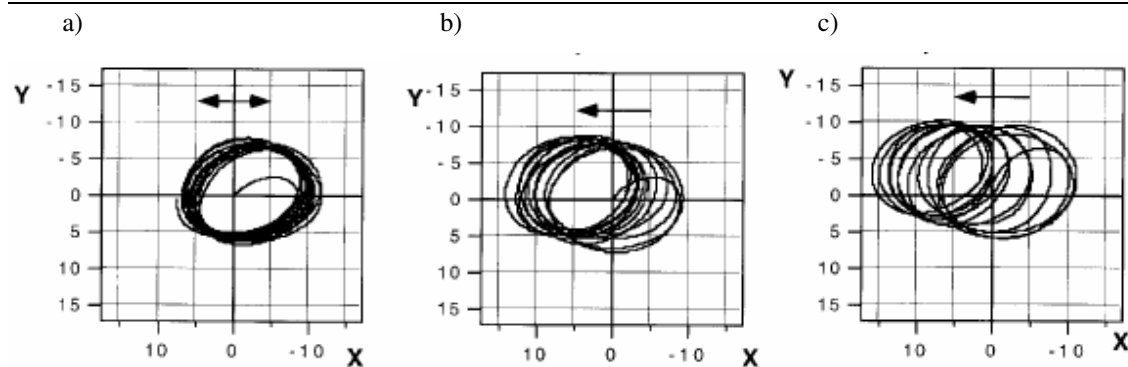


Abbildung 1: Auswirkungen der Applikation mechanischer Schwingung auf unterschiedliche Muskelgruppen im Verlauf manueller Koordinationstests ("circle drawing" - modifiziert nach *Verschueren et al.* (81)). a) zeigt den Kontrollversuch ohne Vibrationseinwirkungen, b) bei Vibrationsapplikation auf den *M. biceps brachii*, c) bei gleichzeitiger Vibrationsapplikation auf *M. biceps brachii* und *M. deltoideus*

Veränderungen der Bewegungsregulation bspw. in Form einer Modifikation des Bodenreaktionskraftverlaufs, einem Anstieg der Bodenreaktionskraft, Veränderungen der muskulären Aktivierungsmusters etc. Im Vergleich zu frequenzbandüberschreitenden Frequenzveränderungen ergeben Modifikationen um den gleichen Betrag, jedoch innerhalb eines Frequenzbandes, nur leichte, nicht signifikante Veränderungen in den entsprechenden Parametern (25). Eine mögliche Ursache dieser Interferenzen liegt in dem umfangreich beschriebenen Phänomen, dass sich supraspinal generierte nerval Oszillationen im α -Frequenzband elementar und kohärent bei muskulären Kontraktionen manifestieren (42, 45, 46). Der Phasensprung zwischen den bei-

gung von Vibrationen auf einen an der Bewegungsausführung beteiligten Muskel (*M. biceps brachii*, *M. triceps brachii*, *M. deltoideus*) zu over- bzw. undershooting errors führt (vgl. Abb. 1). Physiologischer Hintergrund dieses Phänomens, das als kinästhetische Illusion beschrieben wird, sind die an den Muskelspindeln generierten Reizsituationen, die sich unter nicht artifiziellen Bedingungen in Gelenkwinkelpositionen ergeben, die von der aktuell vorliegenden Position abweichen und somit Des-Informationen und Korrekturbewegungen erzeugen.

Der Grad der kinästhetischen Illusionen und die damit verbundene Modifikation der Bewegungssteuerung hängt von verschiedenen Parametern ab. Aus mehreren Studien

geht hervor, dass zur Illusionsgenerierung das Überschreiten einer Frequenzschwelle notwendig ist. So stellten *Naito et al.* (53) fest, dass die Vibrationsapplikation an den Dorsiflexoren des Handgelenks bei einer hohen Frequenz (83 Hz) zu einer illusionierten Veränderung des Gelenkwinkels in Höhe von 16,8° führt, während dies bei niedrigerer Frequenz (12,5 Hz) nicht der Fall ist. Die elektromyographischen Daten stützen die psychometrischen Resultate (persönliches Empfinden einer Gelenkwinkelveränderung) durch hochsignifikant größere Aktivitäten in den Dorsiflexoren unter Illusionsbedingungen (53). *Kasai et al.* (38) übertrugen Vibrationen im Frequenzbereich zwischen 30 und 100 Hz auf die Oberarmflexoren bzw. -extensoren. Fehlerhafte Ausführungen (undershooting error) von zyklischen Extensions-Flexionsbewegungen konnten erst ab 50 Hz festgestellt werden. Die größten kinästhetischen Illusionen und somit Abweichungen von der Bewegungsvorgabe wurden bei 100 Hz identifiziert. *Cordo et al.* (15) stellten einen doppelten, frequenzabhängigen Phasensprung in der biologischen Reaktion fest. Während die 20 Hz Bedingung (M. biceps brachii Vibration) einen overshooting error verursachte, wurden bei 30 Hz nur geringe bzw. keine Fehler festgestellt; bei 40 Hz konnten dann undershooting errors identifiziert werden. Unter Einbeziehung weiterer Resultate gehen die Autoren davon aus, dass die durch die Schwingungsapplikation erzeugte Wahrnehmungsveränderung nicht als einfache Summation der sensorischen Signale erklärbar ist. Eher scheint den Autoren die Relation zwischen den aus den verschiedenen Reizbedingungen (d.h. willkürliche Bewegung vs. Vibrationsapplikation) resultierenden Spindelafferenzen bedeutsam.

Steyvers et al. (74, 75) analysierten mittels Transkranieller Magnet-Stimulation (TMS) die Effekte unterschiedlicher Vibrationsfrequenzen (20, 75 und 100 Hz) im Hinblick auf Veränderungen der kortikalen Aktivierbarkeit. Während die 20 Hz Bedingung nicht zu einer signifikanten Erregbarkeitsveränderung (Ruhe vs. Vibration) führte, zeigten sich bei 75 Hz bzw. 100 Hz hochsignifikante Anstiege von 49,1% bzw. 33,8%. Ein Erklärungsansatz besteht darin, dass zwar schon zwischen 3 Hz und 15 Hz spontane Entladungen festgestellt werden können, ein zyklisches 1:1 Feuerungsverhalten ergibt sich allerdings erst ab Reizungsfrequenzen oberhalb von 20 Hz (64).

Obwohl die o. a. Resultate auf einen markanten Zusammenhang zwischen der Reizfrequenz, dem sensorischen Entladungsverhalten und den daraus resultierenden kinästhetischen Illusionen hindeuten, bleibt bisher ungeklärt, in wie weit die Schwingungsamplitude für das Auftreten kinästhetischer Illusionen verantwortlich ist. Der aus der Schwingungsapplikation resultierende Reiz wird primär mit Ia-Afferenzen in Zusammenhang gebracht (11, 12, 15, 75). Diese werden sowohl von "nuclear chain-" als auch "nuclear bag Fasern" versorgt und sind somit sensitiv für absolute Längenänderungen sowie deren Geschwindigkeit. Beide Parameter werden sowohl durch die Schwingungsfrequenz als auch die -amplitude determiniert. Obwohl Frequenzveränderungen - bedingt durch den quadratischen Zusammenhang mit der Geschwindigkeit vs. des linearen Zusammenhangs mit Amplitudenveränderungen - einen größeren Einfluss

ausüben, ist es vorstellbar, dass sich die Frequenzschwelle zur Auslösung von kinästhetischen Illusionen durch Veränderungen der Schwingungsamplitude verschieben lässt.

Neben der Frequenzbeziehung zeigten sich weitere Abhängigkeiten für das Auftreten kinästhetischer Illusionen bzw. fehlerhafter Bewegungsausführungen. *Cordo et al.* (15) wiesen den Einfluss der Relation zwischen "Onset-Offset der Vibrationsapplikation" und "Onset-Offset der Bewegungsausführung" auf das Entstehen kinästhetischer Illusionen nach. *Steyvers et al.* (74) stellten eine Abhängigkeit des Umfangs der kinästhetischen Illusion von der Geschwindigkeit der Bewegungsausführung fest. Während geringe Bewegungsgeschwindigkeiten (zyklische Bewegungen des Unterarms) mit einem Zeitfenster von 750 ms zu einer 26% Abweichung von der Zielbewegung führten, ergaben sich bei hohen Bewegungsgeschwindigkeiten (197 ms Dauer) nur noch 11% Abweichung.

Ivanenko et al. (35) zeigten des Weiteren, dass die Auslösung kinästhetischer Illusionen von der Existenz und dem Grad weiterer Kontrollanforderungen abhängig ist. So besteht ein Zusammenhang zwischen den mit der kinästhetischen Illusion verbundenen motorischen Aktivitäten und der Instabilität der Unterstützungsfläche, die durch Plattformen mit unterschiedlichen Radien der Auflagefläche (30 - 120 cm) simuliert wurde. Im Vergleich zur Kontrollbedingung (flacher Untergrund), führte die Schwingungsapplikation an der Achillessehne (f: 40 Hz, \dot{y} : 0,8 mm) mit zunehmender Instabilität der Plattform zu geringeren kinästhetischen Illusionen in Form von KSP Verlagerung nach posterior. Gleichzeitig erhöhten sich die zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts notwendigen Regulationsbewegungen. Bei Vibrationsapplikation am M. trapezius ergaben sich gleichartige Veränderungen, allerdings in geringerem Ausmaß. Bei Kontakt eines Fingers mit einem externen fixierten Objekt reduzierten sich auftretende Ausgleichsbewegungen. Die Autoren erklären dieses Phänomen mit Veränderung der Dominanz der verschiedenen propriozeptiven Signale. Diese Argumentation wird durch die Ergebnisse weiterer Autoren gestützt. *Lackner et al.* (42) konnten zeigen, dass eine über einen Finger erzeugte Kontaktkraft von < 1 N mit einem stationären Objekt ausreicht, um bei einer Vibrationsapplikation auf den M. peroneus (120 Hz) signifikant ($p < 0,001$) reduzierte Körperschwankungen zu erzeugen. In ähnlicher Weise neutralisiert der Handkontakt mit einem stationären Objekt kinästhetische Illusionen bei Laufbewegung auf der Stelle (34, 35). Während die Vibrationsapplikation an der ischiocruralen Muskulatur ohne einen stationären Kontakt zu einer unwillkürlichen Vorwärtsbewegung mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s führt, kann keine Translation bei externem Kontakt festgestellt werden (34, 35).

Zum Einfluss von Vibrationen auf die Gangmotorik liegen zahlreiche weitere Evidenzen aus verschiedenen Arbeitsgruppen (z.B. 4, 10, 34, 35, 83) vor. Während die Vibrationsübertragung auf die ischiocrurale Muskulatur bei Vorwärtsbewegungen zu einer Erhöhung der Ganggeschwindigkeit führt, kann beim Rückwärtslaufen eine Verringerung der Geschwindigkeit festgestellt werden. Die Vibrationsapplika-

tion am M. quadriceps führt bei diesen Bedingungen zu einer Geschwindigkeitserhöhung, bei der Vorwärtsbewegung ergeben sich kaum Effekte. Während *Ivanenko et al.* (34, 35) davon ausgehen, dass die Vibrationseffekte vor allem während der Schwungphase zu einer Gangbildmodifikation führen, stellen *Verschueren et al.* (83) Veränderungen des EMG-Musters primär während der Stützphase fest. Unabhängig von der jeweiligen Ergebnisstruktur lässt sich spekulieren, dass eine funktionale Verschaltung zwischen Ia-Afferenzen und Druckrezeptoren in der Fußsohle, die während der Stützphase "feuern", besteht. Weitgehend konvergent sind die jeweiligen Interpretationen, dass Vibrationen an den unteren Extremitäten zu Des-Informationen über die jeweilige Position führen. Ähnliche Argumente werden für die Effekte angeführt, die aus der Vibrationsapplikation an der Nackenmuskulatur resultieren. So kann bei bilateraler Reizung eine Erhöhung der Ganggeschwindigkeit festgestellt werden, bei unilateraler Reizgebung ergibt sich eine Abweichung der Gangrichtung zur kontralateralen Seite (10, vgl. Abb. 2). Konsistent mit dieser Ergebnisstruktur ist die Argumentation von *Biquer et al.* (4), dass Vibrationen Einfluss auf die visuelle Repräsentation nehmen, da sich diese über propriozeptive Signale der Nackenmuskulatur kalibriert.

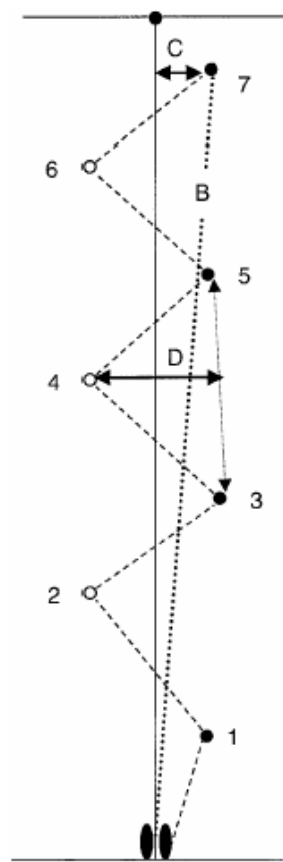


Abbildung 2: Effekte der Vibrationsübertragung auf die Nackenmuskulatur während des Gehens. Die unilaterale Applikation führt zu Abweichungen von der Richtungsvorgabe zur kontralateralen Seite (modifiziert nach Bove et al. (11))

Achillessehne bzw. am M. tibialis anterior. Während der Reizgebung traten bei allen Versuchspersonen kinästhetische Illusionen auf. Nach Absetzen der Vibration konnten für eine Zeitdauer von 19 Minuten deutliche anterior-posterior Schwankungen festgestellt werden, wobei die massivste Ausprägung direkt nach dem Absetzen vorlag. Vereinzelt traten erhöhte Körperschwankungen noch 3 Stunden nach

zung eine Erhöhung der Ganggeschwindigkeit festgestellt werden, bei unilateraler Reizgebung ergibt sich eine Abweichung der Gangrichtung zur kontralateralen Seite (10, vgl. Abb. 2). Konsistent mit dieser Ergebnisstruktur ist die Argumentation von *Biquer et al.* (4), dass Vibrationen Einfluss auf die visuelle Repräsentation nehmen, da sich diese über propriozeptive Signale der Nackenmuskulatur kalibriert.

b) Post-Effekte: Im Gegensatz zur großen Anzahl an Studien, die Akuteffekte mechanischer Schwingungsreize beschreiben, beschäftigen sich weit weniger Analysen – abgesehen von der arbeitsphysiologischen Forschung, die Langzeiteffekte einer chronischen Schwingungsübertragung und daraus resultierende Krankheitsbilder untersucht (51) – mit koordinativen Post-Effekten der Schwingungsapplikation.

Wierzbicka et al. (85) analysierten Schwankungen des vertikalen Kraftangriffpunktes nach einer 30-sekündigen Vibrationsapplikation (80 Hz) an der

der Schwingungsapplikation auf. In eigenen Studien wurden Veränderungen in der Gleichgewichtsregulation und anderen koordinativen Leistungen nach der Applikation von mehrdimensionalen Ganzkörperschwingungen (5 Serien à 60 Sekunden) bei verschiedenen Athleten und Patienten-Gruppen analysiert. Bei einer Analyse mit Sportstudenten wurden die Effekte unterschiedlicher Schwingungsfrequenzen fokussiert. Die Abbildung 3 zeigt die relativen Auslenkungen einer Messplattform vor und nach der Schwingungsapplikation bei 6 Hz bzw. 10 Hz ($\pm 1\text{Hz/s}$). Während bei der Stimulation im θ -Frequenzbereich hochsignifikante ($p < 0,01$) Verbesserungen von durchschnittlich 40% zwischen Pre- und Post-Test festgestellt wurden (der Vergleich der einzelnen Pre- bzw. Post-Tests verfehlte das Signifikanzniveau jeweils deutlich), ergab die Stimulation im α -Frequenzbereich nur geringe, nicht signifikante Verbesserungen (26).

Als Erklärung für die Post-Effekte bei *Wierzbicka et al.* (85) wird die Generierung von unwillkürlichen Kontraktionen, die durch Veränderungen supraspinaler drives entstehen, angeführt. Dass supraspinale Strukturen durch die Schwingungsapplikation miteinbezogen werden, wird u. a. deshalb angenommen, da unwillkürliche Post-Kontraktionen nicht nur am vorher stimulierten Muskel festgestellt werden konnten, sondern auch an anderen, vom Applikationsort weiter entfernt liegenden Muskelgruppen (24, 25, 64, 85). Die mögliche Einbeziehung der Funktion verschiedener Hirnareale als Folge der Vibrationsapplikation wird ebenfalls aus eigenen Untersuchungen mit M. Parkinson Patienten deutlich. Neben der positiven Veränderung der Gleichgewichtsregulation, die exemplarisch in Abbildung 4 dargestellt wird, zeigen sich, trotz der Reizgebung an den unteren Extremitäten, auch positive, hochsignifikante Modifikationen in der manuellen Koordination (24).

Obwohl die o. a. Studien deutliche Post-Effekte der Vibrationsapplikation nachwiesen, unterscheidet sich die Richtung der Veränderung (Erhöhung der Schwankung vs. verbesserte Gleichgewichtsregulation). Als Erklärung lassen sich zwei Ansätze anführen. So differieren zum einen die Stimulationsfrequenzen erheblich, wobei sowohl das θ - wie auch das α -Frequenzspektrum nicht für die Auslösung von kinästhetischen Illusionen und somit auch nicht für negative Post-Effekte verantwortlich gemacht werden (53, 83). Zum anderen bestehen Unterschiede in der Art der Reizgebung. Während die direkte Vibrationsapplikation einen artifiziellen Stimulus darstellt – d.h. es wird eine nicht bestehende Position des Körperschwerpunktes simuliert, woraus nicht notwendige reflektorische Korrekturkontraktionen entstehen – resultieren aus den Ganzkörperschwingungen rhythmische, mehrdimensionale mechanische "Störimpulse". Die dabei auftretenden muskulären Aktivierungsmuster dienen bei diesen Bedingungen der Haltungskorrektur und der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts.

Einflüsse auf die motorische Kraft

In den 80er Jahren publizierte *Nasarov* erste Ergebnisse über ein vibrationsgestütztes Krafttraining, welches er als biome-

chanische oder rhythmische neuromuskuläre Stimulation bezeichnete (58). Inzwischen liegen zahlreiche Studien zum Einfluss von Vibrationen auf diverse Kraft- und Schnelligkeitsparameter vor, wobei die Ergebnisse erhebliche Varianzen aufweisen. So findet man sowohl Studien, die ausgeprägt positive Effekte eines Vibrationstrainings aufzeigen, als auch Analysen, die keine oder nur gering positive Einflüsse mechanischer Schwingungsreize registrierten.

Im Hinblick auf den Untersuchungsmodus dieser Studien lassen sich zwei Designs differenzieren. Während ein Teil die Veränderung der motorischen Kraft innerhalb von kurzen Zeitfenstern untersucht (ad-hoc Effekte (Δt 60 - 120 min)), beziehen sich andere Studien auf mittel- und langfristige Veränderungen (Längsschnitt ($\Delta t > 14$ Tage)). Eine weitere Differenzierung lässt sich bezüglich des Applikationsortes

Training mit fünf Serien einminütiger Vibrationseinwirkung (f: 30 Hz) auf den Arm um 8% ($p < 0,001$) erhöht werden (8). Auf eine spontane Zunahme der Maximal- und Schnellkraft nach einem Training auf der Basis mechanischer Schwingungsreize weisen auch weitere Autoren hin (37, 59). Insbesondere zeigen mehrere Studien eine Verbesserung in den Sprungleistungen in Höhe von rund 4 - 10% (9, 13, 16, 69).

Als Erklärung für die Zunahme der Kraftfähigkeiten nach einer Stimulation mit mechanischen Oszillationen werden diverse Funktionen diskutiert. *Bosco et al.* (10) und *Issurin et al.* (32) gehen von einer effizienteren neuromuskulären Koordination in Form einer synchronisierteren muskulären Aktivität und einer größeren Anzahl rekrutierter motorischer Einheiten aus. Als Ursache dieser Modifikation wird das Auftreten des Tonic-Vibration-Reflex (TVR) und die damit verbundene Erhöhung effe-

renter Signale diskutiert (27, 48). Obgleich die angeführten Argumente für die jeweils gefundenen Resultate tragfähig erscheinen, kann keine Verallgemeinerung vorgenommen werden, da auch zahlreiche Evidenzen vorliegen, die gegen eine Erhöhung des effe- renten bzw. motorischen Outputs sprechen (5, 38, 39, 71).

Andere Erklärungs-

ansätze für die Verbesserung der motorischen Kraft berücksichtigen hormonelle und enzymatische Einflüsse. So wurden neben neuromuskulären Parametern auch unmittelbare Antworten von Hormonen auf Ganzkörpervibrationen evaluiert. *Bosco et al.* (9) fanden dabei signifikante Anstiege von Testosteron und Wachstumshormonen. Eine positive Wirkung dieser biochemischen Veränderung auf die motorische Kraft ist zwar im Längsschnitt denkbar, als Erklärung für ad-hoc Reaktionen, wie sie von *Bosco et al.* (9) angeführt wird, ist sie aber unwahrscheinlich, da innerhalb dieses Zeitraumes kaum hypertrophe morphologische Anpassungen zu erwarten sind. Des Weiteren erscheint auch hier die Aufstellung allgemeiner Kausalbeziehungen kaum möglich, da die Interaktion zwischen dem mechanischen Schwingungsreiz und

Hormonkonzentrationen hochgradig komplex ausfällt. So zeigt eine Studie von *McCall et al.* (49) einen Anstieg von BGH um 94 % bei der Applikation von Schwingungen mit 100 Hz auf den M. tibialis anterior, allerdings führt die gleiche Applikationsstruktur am M. soleus zu einer BGH Reduktion um 22%. Die Autoren führen verschiedene

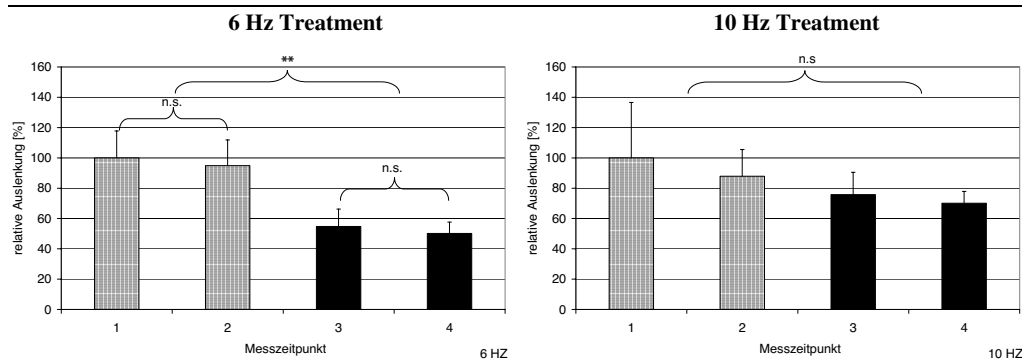


Abbildung 3: Relative Auslenkungen der Messplattform in x-Richtung vor (1, 2) und nach (3, 4) dem Treatment bei 6 Hz und bei 10 Hz (n.s. : nicht signifikant; * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$)

der Schwingung vornehmen. So kann die Reizgebung durch direkte Übertragung des Schwingungsvorgangs auf einzelne Körpersegmente bzw. Muskel- Sehnenkomplexe erfolgen, als auch in Form von Ganzkörperschwingungen.

a) ad hoc-Effekte: Die Arbeitsgruppe um *Bosco* stellt in mehreren Untersuchungen leistungspotenzierende Effekte mechanischer Schwingungsvorgängen dar (7 - 10). So führte ein 10-minütiges Training mit Ganzkörperschwingungen (f: 26 Hz) unmittelbar im Anschluss zu einer signifikanten Verbesserung der Maximalkraft und Bewegungsschnelligkeit der Beinstreckerkette in Höhe von 4% bis 7% (7, 9). Bei Leistungsboxern der italienischen Nationalmannschaft konnte die realisierte Kraft ("average mechanical power") durch ein

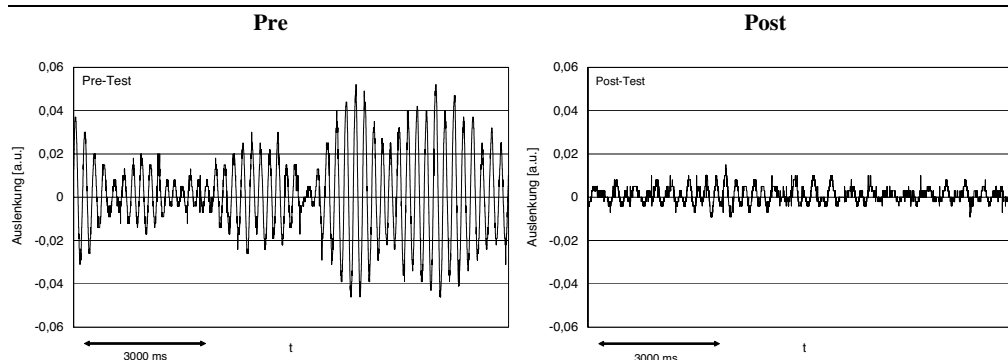


Abbildung 4: Relative Auslenkungen der Messplattform in x-Richtung vor und nach dem Treatment

Erklärungsmodelle an, eine Aufklärung dieses Phänomens konnte allerdings bisher nicht erbracht werden.

Vergleichbar komplexe Zusammenhangstrukturen gehen aus tierexperimentellen Analysen zum Einfluss von Vibrationen auf supraspinale Hormon- und Neurotransmitterkonzentrationen hervor. Einen Anstieg der Katecholaminkonzentrationen und Reduktion des Serotonins im Hypothalamus und Kortex konnte nach 15-minütiger mechanischer Oszillation bei Ratten beobachtet werden (50). Veränderungen werden nach Ganzkörpervibrationen verschiedentlich im dopaminergen und serotonergen System beschrieben, wobei Effekte in unterschiedlichen Systemen und Hirnarealen registriert wurden (1, 50, 51, 56, 57, 78, 86). Neben Veränderungen des Dopamins werden auch Zunahmen von Kortikosteroiden (0), Norepinephrin und Noradrenalin (86) als Folge von mechanischer Oszillation beschrieben. Yamaguchi (86) stellt zudem fest, dass die Effekte bei Ganzkörpervibrationen deutlicher ausfallen als bei lokaler Applikation von mechanischen Schwingungen. Des Weiteren zeigten sich deutliche Interaktionen mit der Dauer der Reizgebung. Als Schlussfolgerung aus den genannten Untersuchungen kann konstatiert werden, dass mechanische Ganzkörperschwingen Einfluss auf Hormon- und Neurotransmitterkonzentrationen ausüben können. Genauere Aussagen lassen sich allerdings jeweils nur auf spezifische Anwendungssituationen beziehen. Die Aufstellung verallgemeinernder Kausalbeziehungen erscheint derzeit nicht möglich.

Entgegen der oben angeführten positiven Effekte mechanischer Schwingungen, kommen andere Studien zu divergenten Resultaten. So konnten Samuelson *et al.* (67) und Jordan *et al.* (36) bei einer Stimulation mit 20 Hz bzw. 30 Hz keine ad-hoc Verbesserungen in der isometrischen Maximalkraft der Beinstrecker feststellen. Jordan *et al.* (36) postulieren sogar eine gesteigerte Inhibition nach einem Training mit drei Sätzen und einminütiger Vibrationseinwirkung. Dies wird von de Ruiter *et al.* (66) bestätigt, die eine Reduktion der Maximalkraft ($p < 0.05$) im Abstand von 90 Sekunden nach mechanischer Oszillation feststellten. Nach einem vierminütigen Vibrationstraining konnten auch Torvinen *et al.* (76) keine verbesserten Maximal- und Schnellkraftwerte in verschiedenen Testsituationen registrieren, die im Abstand von 2 und 60 Minuten nach dem Treatment durchgeführt wurden. Sarabon *et al.* (68, 69) finden nach der Applikation von Ganzkörperschwingungen in 5 einminütigen Serien bei verschiedenen Frequenzen und Amplituden (f : 6 Hz u. 10 Hz, \hat{y} : 4 mm u. 10 mm) reduzierte Explosivkraftwerte der Beinstreckerkette, allerdings verbesserte Leistungen bei Drop-Jumps. Reduzierte Sprungleistungen wurden nach oszillatorischer Stimulation sowohl von Rittweger *et al.* (63), die mit erschöpfenden Ganzkörpervibrationen arbeiteten, als auch von Künemeyer und Schmidtbleicher (41), die Teilkörperschwingungen verwendeten, erhoben.

Die Erklärungsansätze für die vorgestellten Resultate sind erneut vielfältig. So wird vor allem eine präsynaptische Hemmung der α -Motoneuronen diskutiert (5, 41, 68). Weitere Erklärungsansätze liegen in einer reduzierten Muskelstiffness (41), einer Transmitterentleerung in den erregenden

Bahnen der α -Motoneuronen (6, 41) sowie im Auftreten der Renshaw-Hemmung (41). Keine Veränderungen in der Modulation der Feuerungsrate von motorischen Einheiten – weder eine Potenzierung noch eine Reduktion nach Vibrationen – konnten Griffin *et al.* (21) feststellen. Auch eine Erhöhung der Muskeltemperatur durch Vibrationen wird angeführt, die zu Ermüdungserscheinungen führen soll (66).

b) Langzeiteffekte: Im Hinblick auf Langzeit- und Längsschnitteffekte mechanischer Schwingungsreize liegen ebenfalls divergente Untersuchungsergebnisse vor. Nach Issurin *et al.* (32) erhöhte sich die Maximalkraft um bemerkenswerte 49,8% nach nur drei Trainingswochen und Bosco *et al.* (6) fanden Verbesserungen in der Sprungkraft nach 10 Trainingseinheiten. In einer anderen Studie kam es zu 3% bis 10% Verbesserung der isometrischen und statischen Maximalkraft (16). Ferner erwies sich bei einer Studie mit Schwimmern, dass das Training mit mechanischen Oszillationen gegenüber einem herkömmlichen Training zur Verbesserung der Kraftausdauer überlegen zu sein scheint (2, 3). Eine Steigerung der Kraftausdauer durch Vibrationen registrierten auch Issurin *et al.* (32). Sie beschreiben die erstaunliche Zunahme von 56%.

In Einzelfallstudien konnte ebenfalls aufgezeigt werden, dass sich die Maximalkraft durch ein Training mit Vibrationsüberlagerung deutlich steigern lässt (84). Spitzenpfeil *et al.* (73) beschreiben Verbesserungen der isometrischen Maximalkraft von bis zu 40%, wobei der Trainingszeitraum nicht angeführt wird. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass nach den bisher vorliegenden Kenntnissen der Krafttrainingstheorie Verbesserungen der Maximalkraft um 40–50% in kurzen Zeitabständen sicherlich nur mit Untrainierten oder mit Patienten zu erzielen sind. Als Erklärungsansatz wird ein reduzierter Reibungswiderstand in der Muskulatur infolge des Vibrationstrainings genannt (84) und Spitzenpfeil *et al.* (73) gehen davon aus, dass bereits ermüdete motorische Einheiten "re-rekruiert" werden können. Cardinale (13) diskutiert ferner neben den peripheren Effekten auch Veränderungen auf zentraler Ebene. In Übereinstimmung mit Müller *et al.* (52) weisen wir darauf hin, dass sich auf der Basis geringer Personenstichproben bzw. Einzelfallstudien keine allgemein gültigen Schlussfolgerungen ziehen lassen.

Entgegen der o. a. Studien liegen auch hier verschiedene Evidenzen vor, die nach einem mehrwöchigen Training mit Ganzkörpervibrationen keine oder nur geringe Anzeichen für eine Leistungsverbesserung feststellten. Weder bei der Maximal- oder Explosivkraft noch bei Sprungtests wurden markante Veränderungen registriert (69, 43, 77). Ein 8-wöchiges Training mit Ganzkörpervibrationen führte zu keinen Verbesserungen im Hinblick auf verschiedene Sprungtests (Counter-Movement-Jumps und Drop-Jumps) wie auch auf die isometrische Maximalkraft (41). Auch de Ruiter *et al.* (66) haben nach einem zweiwöchigen Training mit einer Frequenz von 30 Hz und einer Amplitude von 8 mm keine Verbesserung in der Maximal- oder Explosivkraft registriert. Schlumberger *et al.* (71) verglichen ein konventionelles sowie ein vibrationsgestütztes Trainingsprogramm für die Beinstreckerkette. Da sich

keine signifikante Überlegenheit einer Methode feststellen lässt, kommen sie zu dem Ergebnis, dass sich die Trainingseffekte eines Krafttrainings mit überlagerten Vibrationen nicht von einem traditionellen Krafttraining unterscheiden (71).

Da die Längsschnitteffekte u.a. eine Folge der jeweiligen spontanen Veränderungen darstellen, sind die Erklärungsansätze für die zuletzt vorgestellten Resultate weitgehend deckungsgleich mit der o. a. Argumentation (Ad-hoc Effekte).

Fazit

Über die Gegenüberstellung von positiven und negativen Effekten mechanischer Schwingungsreize auf die muskuläre Leistungsfähigkeit hinaus wird die Komplexität durch Studien mit indifferenten Ergebnissen deutlich. So registrierten *Delecluse et al.* (16) zwar eine signifikante Verbesserung der Sprungkraft und Maximalkraft, aber keinen Effekt bei der maximalen Bewegungsschnelligkeit. Bei der Erfassung der isometrischen Maximalkraft konnten nach Vibrationsstimulation in drei verschiedenen Positionen einmal eine Reduktion, einmal keine Veränderung und einmal eine signifikante Verbesserung erhoben werden. *Vaczi et al.* (79) und *Sarabon et al.* (68, 69) fanden positive Auswirkungen im Hinblick auf die Reaktivkraft, allerdings reduzierte Explosivkraftwerte. Außerdem stellten *Markitz et al.* (47) nach einem 6-wöchigen Trainingsprogramm reduzierte Maximalkraftwerte in den Beinextensoren fest, allerdings auch eine Erhöhung der Kraftwerte der Kniegelenksflexoren. *Müller et al.* (52) konnten ferner in ihrer kürzlich veröffentlichten Trainingsstudie größere Verbesserungen der Sprungkraft (Counter-Movement- und Drop-Jump) unter Vibrationsreizen registrieren, wobei der Vergleich zum konventionellen Training nicht signifikant war. Bei der Messung der Maximalkraft konnte ebenfalls kein Profit des Vibrationstrainings aufgezeigt werden, so dass "die Aussage, dass das Training mit Vibrationen effektiver ist als ein Training ohne Vibrationsstimuli, nicht zulässig ist." (52, S. 9).

Ein Erklärungsansatz für diese Ergebnisstruktur könnte darin liegen, dass mechanische Schwingungen generell auf multiplen biologischen Ebenen wirksam werden. Dementsprechend wäre auch denkbar, dass eine gegenläufige Veränderung verschiedener Parameter erzeugt werden kann. Wenn die inhibierenden Einflüsse der Vibrationen überwiegen (bspw. neuromuskuläre), dann wird insgesamt eine Reduktion der motorischen Leistungsfähigkeit registriert, wenn die potenzierenden Einflüsse überlegen sind (bspw. biochemische), wird man dementsprechend eine Verbesserung feststellen können, ohne dass gleichzeitig gegenläufige Effekte identifiziert werden. Weitere Ursachen für die angeführten Ergebnisdivergenzen liegen in den verschiedenen Treatmentmethoden. Die angeführten Studien variieren bezüglich der verwendeten Schwingungsart (Ganzkörpervibrationen vs. Teilkörper- vs. direkte Muskelapplikation) der Frequenz, der Amplitude, der Dauer und Anzahl der Serien teilweise erheblich. So werden bei Untersuchungen mit Sportbezug Frequenzen von 6 Hz (25, 68, 69) bis 44 Hz (32) und Amplituden von 2 mm (41) bis 14 mm (25) angegeben.

Es ist festzuhalten, dass nach wie vor zahlreiche offene Fragen auf verschiedenen Ebenen bestehen. Es werden zwar zahlreiche physiologische Thesen zu den Effekten mechanischer Schwingungsreize angeführt, die meisten sind aber noch nicht ausreichend aufgeklärt bzw. wissenschaftlich gesichert, so dass in diesem Bereich noch Forschungsdefizite vorliegen.

In vielen neurophysiologisch orientierten Studien wird aufgezeigt, dass mechanische Schwingungsreize die Ausführung von Zielbewegungen bzw. die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts massiv beeinflussen können. Dieses Phänomen wird allgemein als kinästhetische Illusion bezeichnet. Auf der anderen Seite konnte in eigenen Untersuchungen aufgezeigt werden, dass randomisierte Ganzkörperschwingungen die Motorik von Patienten mit Morbus Parkinson hochgradig positiv beeinflussen. Somit besteht unseres Erachtens ein großes Potential für den Einsatz mechanischer Schwingungsreize - bedingt durch die Umgehung der willkürlichen Aktivierungsproblematik - vor allem im Bereich der neuromuskulären Rehabilitation. Obwohl die Wirkungsmechanismen nicht vollständig aufgeklärt sind, bieten sich gute Ansatzpunkte im Bereich der Therapie nervaler Krankheitsbilder und neuromuskulärer Bewegungsstörungen. Im Hinblick auf sport- und leistungsportorientiertes Krafttraining kommt einem Vibrationstraining nur eine ergänzende Funktion zu. Das Potential, ein konventionelles Training zu ersetzen, scheint aber nicht zu bestehen.

Literatur

0. *Ariizumi M, Okada A*: Effect of whole body vibration on the rat brain content of serotonin and plasma corticosterone. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 52 (1983) 15-19.
1. *Ariizumi M, Okada A*: Effect of whole body vibration on biogenic amines in rat brain. *Br J Ind Med* 42 (1985) 133-136.
2. *Becerra Motta JA, Becker R*: Die Wirksamkeit der Biomechanischen Stimulation (BMS) in Verbindung mit traditionellen Methoden der Kraftausdauerentwicklung im Schwimmen. *Leistungssport* 31 (2001) 29-35.
3. *Becerra Motta L, Becerra Motta JA, Becker R*: Die Biomechanische Stimulation im Muskelkrafttraining. *Leistungssport* 33 (2002) 38-43.
4. *Biguer B, Donaldson IM, Hein A, Jeannerod M*: Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain* 111 (1988) 1405-1424.
5. *Bongiovanni LG, Hagbarth KE, Stjemberg L*: Prolonged muscle vibration reducing motor unit output in maximal voluntary contractions in man. *Journ Physiol* 67 (1989) 15-23.
6. *Bosco C, Cardinale M, Tsarpela O, Colli R, Tihanyi J, von Duvillard SP, Viru A*: The influence of whole body vibration on jumping performance. *Biol. Sport* 15 (1998) 157-164.
7. *Bosco C, Colli R, Introi E, Cardinale M, Tsarpela O, Madella A, Tihanyi J, Viru A*: Adaptive response of human skeletal muscle to vibration exposure. *Clin Physiol* 19 (1999a) 183-187.
8. *Bosco C, Cardinale M, Tsarpela D*: Influence vibration on mechanical power and electromyogram activity in human arm flexor muscles. *Eur J Appl Physiol* 79 (1999b) 306-311.
9. *Bosco C, Iacovelli M, Tsarpela O, Cardinale M, Bonifazi M, Tihanyi J, Viru M, de Lorenzo A, Viru A*: Hormonal responses to whole-body vibration in men. *Eur J Appl Physiol* 81 (2000) 449-454.
10. *Bove M, Diverio M, Pozzo T, Schieppati M*: Neck muscle vibration disrupts steering of locomotion. *J Appl Physiol* 91 (2001) 581-588.
11. *Burke D, Hagbarth KE, Lofstedt L, Wallin BG*: The responses of human spindle endings to vibration of non contracting muscles. *J Physiol* 261(1976 a) 673-693.

12. *Burke D, Hagbarth KE, Lofstedt L, Wallin BG*: The responses of human spindle endings to vibration during isometric contraction. *J Physiol* 261(1976 b) 695-711.
13. *Cardinale M*: The effects of vibration as an exercise intervention: Current perspectives and future trends for research. *Proceedings of 8th annual congress of ECSS (2003)* 217-218.
14. *Coermann R*: The mechanical impedance of the human in sitting and standing position at low frequencies. In *LIPPERT S*: *Vibration Research*, Pergamon (1963) 73-85.
15. *Cordo P, Gurfinkel VS, Bevan L, Kerr GK*: Proprioceptive consequences of tendon vibration during movement. *J Neurophysiol* 74 (1995) 1675-1688.
16. *Delecluse C, Roelants M, Verschueren S*: Strength increase after whole-body vibration compared with resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 35 (2003) 1033-1041.
17. *Diekmann D*: Einfluß vertikaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie* 16 (1957) 519-564.
18. *Diekmann D*: Mechanische Modelle für den vertikal schwingenden Körper. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie* 17 (1958 a) 67-82.
19. *Diekmann D*: Einfluß horizontaler mechanische Schwingungen auf den Menschen. *Internationale Zeitschrift für angewandte Physiologie* 17 (1958b) 83-100.
20. *Dupuis H, Zerlett G*: Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen. *Schriftreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V.* (1984).
21. *Griffin L, Garland SJ, Ivanova T, Gossen ER*: Muscle vibration sustains motor unit firing rate during submaximal isometric fatigue in humans. *J Physiol* 535 (2001) 929-936.
22. *Griffin MJ*: *Handbook of human vibration*. Academic press, San Diego, 1996.
23. *Gurfinkel VS, Levik, YS, Lebedev MA*: Immediate and remote postactivation effects in the human motor system. *Neurophysiology T21 (1989)* 341-351 (Abstract – Artikel in Russisch).
24. *Haas C, Schmidbleicher D*: Effects of whole-body vibration on motor control in Parkinson's disease. *J Neural Transm.* 110 (2003a) XVI.
25. *Haas C*: *Simulation und Regulation mechanischer Schwingungen im alpinen Skirennlauf*. Sport & Buch Strauss (2002).
26. *Haas C, Kaiser I, Turbanski S, Schmidbleicher D*: Zum Einsatz randomisierter Oszillationen in der Prävention und Rehabilitation von Rupturen des vorderen Kreuzbandes im alpinen Skirennlauf, Forschungsbericht, (2003b) unpublished.
27. *Hagbarth KE, Eklund G*: Tonic vibration reflex (TVR) in spasticity. *Brain Research* 2 (1966) 201-203.
28. *Haken H*: *Synergetics, an introduction: Non-equilibrium phase transitions and self organisation in physics, chemistry and biology*. (1977/83) 3. Auflage, Springer, Berlin.
29. *Haken H*: What can Synergetics Contribute to the Understanding of Brain Functioning? In: Uhl C (Hrsg): *Analysis of Neurophysiological Brain Functioning*. (1999) Springer, Berlin, 7- 40.
30. *Haverkamp M*: Laboruntersuchung zur akuten Wirkung stoßartiger Ganzkörper-Schwingungen auf den Menschen. *VDI, Düsseldorf* (1990).
31. *Horn E*: *Vergleichende Sinnesphysiologie*, Fischer, Stuttgart.
32. *Issurin VB, Liebermann DG, Tenebaum G*: Effects of vibratory stimulation training on maximal force and flexibility. *J of Sports Sci* 12 (1994) 561-566.
33. *Ivanenko YP, Talis VL, Kazennikov OV*: Support stability influences postural responses to muscle vibration in humans. *Eur J Neurosci* 11 (1999) 647-654.
34. *Ivanenko YP, Grasso R, Lacquaniti F*: Neck muscle vibration makes walking humans accelerate in the direction of gaze. *J Physiol* 525 (2000a) 803-814.
35. *Ivanenko YP, Grasso R, Lacquaniti F*: Influence of leg muscle vibration on human walking. *J Neurophysiol* 84 (2000b) 1737-1747.
36. *Jordan M, Norris S, Herzog W, Smith D, Spiewak S*: The acute effects of whole-body vibration on specific neural and mechanical properties of muscle during maximal isometric knee extension. *Proceedings of 8th annual congress of ECSS (2003)* 379.
37. *Kaji H, Goto K, Takamatsu K*: Effects of whole-body vibration on intermittent force production in female judo players. *Proceedings of the 10th Annual Meetin of Japan Society of Exercise and Sports Physiology (2002)* 197.
38. *Kasai T, Kawanishi M, Yahagi S*: The effects of wrist muscle vibration on human voluntary elbow flexion-extension movements. *Exp Brain Res* 90 (1992) 217-220.
39. *Kouzaki M, Shinohara M, Fukunaya T*: Decrease in maximal voluntary contractions by tonic vibration applied to a single synergistic muscle in humans. *J App Physiol* 89 (2000) 1420-1424.
40. *Kubota A, Ootsuka Y, Xu T, Terui N*: The 10-Hz rhythm in the sympathetic nerve activity of cats, rats and rabbits. *Neuroscience Letters* 25 (1995) 173-176.
41. *Künnemeyer J, Schmidbleicher D*: Beeinflussung der Reaktivität durch die rhythmische neuromuskuläre Stimulation (RNS). *Sportverl Sportschad* 11 (1997) 39-42.
42. *Lackner JR, Rabin E, DiZio P*: Fingertip Contact Suppresses the Destabilizing Influence of Leg Muscle vibration. *J Neurophysiol* 84 (2000) 2217-2224.
43. *Löberbauer E, Zöllinger G, Müller E*: Whole body vibration and training. *Proceedings of 8th annual congress of ECSS (2003)* 218.
44. *Lundström R, Holmlund P, Lindberg L*: Absorption of energy during vertical whole body vibration exposure. *J Biomech* 31 (1998) 317-326.
45. *McAuley JH, Rotwell JC, Marsden CD*: Frequency Peaks of tremor, muscle vibration and electromyographic activity at 10 Hz, 20 Hz and 40 Hz during human finger muscle contraction may reflect rhythmicities of central neural firing. *Exp Brain Res* 114 (1997) 525-541.
46. *McAuley JH, Marsden CD*: Physiological and pathological tremors and rhythmic central motor control. *Brain* 123 (2000) 1545-1567.
47. *Markitz S, Haas C, Schmidbleicher D*: Effects of simulation on regulating oscillating ground reaction force in alpine skiing. *Book of abstracts 2nd international congress on science and skiing (2000)*, 176-177.
48. *Matthews PB*: The reflex excitation of the soleus muscle of the decerebrate cat caused by vibration applied to wrist tendon. *J Physiol* 184 (1966) 450-472.
49. *McCall GE, Grindeland RE, Roy RR, Edgerton VR*: Muscle afferent activity modulates bioassayable growth hormone in human plasma. *J Appl Physiol*. 89 (2000) 1137-1141.
50. *Minasian SM, Baklavadzian OG, Oganessian AO, Chiflikian MD*: Biogenic amine content of brain sections, blood and adrenals in rabbits exposed to vibration and noise. *Fiziol Zh SSSR Im I M Sechenova* 71 (1985) 439-445. (Abstract – Artikel in Russisch).
51. *Murata K, Saraki S, Okajima, F, Nakao M, Suwa K, Matsunaga C*: Effects of occupational use of vibrating tools in the automatic central and peripheral nervous system. *Int Arch Occup Environ Health* 70 (1997) 94-100.
52. *Müller E, Löber E, Kruk M*: Elektrostimulation und Whole Body Vibration: zwei erfolgreiche Krafttrainingsmethoden? *Leistungssport* 4 (2003) 4-10.
53. *Naito E, Kochiyama T, Kitada R, Nakamura S, Michikazu M, Yonekura Y, Sadato N*: Internally Simulated Movement Sensations during Motor Imagery Activate Cortical Motor Areas and the Cerebellum. *J Neurosci* 22 (2002) 3683-3691.
54. *Nakamura H*: Neurobiology of physical environmental stress. *Nippon Eisegaku Zasshi* 47 (1992) 785-797. (Abstract – Artikel in Japanisch).
55. *Nakamura H, Moroji T, Nakamura H, Nohara S, Okada A*: Effects of whole-body vibration exposure on DOPAC and VIP-like immunoreactivity in the rat brain. *Nippon Eisegaku Zasshi* 46 (1992a) 1095-1103. (Abstract – Artikel in Japanisch).
56. *Nakamura H, Moroji T, Nohara S, Nakamura H, Okada A*: Activation of cerebral dopaminergic systems by noise and whole-body vibration. *Environ Res* 57 (1992b) 10-18.
57. *Nakamura H, Moroji T, Nagase H, Okazawa T, Okada A*: Changes of cerebral vasoactive intestinal polypeptide- and somatostatin-like immunoreactivity induced by noise and whole-body vibration in the rat. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68 (1994) 62-67.
58. *Nasarov VT*: Rhythmische neuromuskuläre Stimulation (RNS) nach Nasarov. (1991). Unveröffentlichtes Skript.
59. *Nishihira Y, Iwasaki T, Hatta A, Wasaka T, Kaneda T, Kuroiwa K, Akiyama S, Kida T, Ryol KS*: Effect of whole body vibration stimulus and voluntary contraction on motoneuron pool. *Advances in Exercise and Sport Physiology* 1 (2002) 83-86.
60. *Okada A, Ariizumi M, Okamoto G*: Changes in cerebral norepinephrine induced by vibration or noise stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 52 (1983) 94-97.
61. *Randall JM, Matthews RT, Stiles MA*: Resonant frequencies of standing humans. *Ergonomics* (9), 879-886.
62. *Ribot-Ciscar E, Roll JP, Gilhodes JC*: Human motor activity during postvibratory and immediate voluntary muscle contraction. *Brain Res* 716 (1996) 84-90.

63. Rittweger J, Beller G, Felsenberg D: Acute physiological effects of exhaustive whole-body vibration in man. *Clin Physiol* 20 (2000) 134-142.
64. Roll JP, Vedel JP, Ribot E: Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res* 76 (1989) 213-222.
65. Roll JP, Gilhodes JC: Proprioceptive sensory codes mediating movement trajectory perception: human hand vibration-induced drawing illusions. *Can J Physiol Pharmacol* 73 (1995) 295-304.
66. de Ruyter CJ, van der Linden RM, van der Zijden MJA, Hollander AP, de Haan A: Short-term effects of whole-body vibration on maximal voluntary isometric knee extensor force and rate of force rise. *Eur J App Physiol* 88 (2003) 472-475.
67. Samuelson B, Jorfeldt L, Ahlborg B: Influence of vibration on endurance of maximal isometric contractions. *Clin Physiol* 9 (1989) 21-25.
68. Sarabon N, Haas C, Wirth K, Schmidtbleicher D: Explosiv isometric contraction after low frequency whole-body vibrations (WBV): acute impairment of neuromechanical parameters. Abstract Book: 3rd International Conference on Strength Training (2002).
69. Sarabon N, Haas C, Wirth K, Schmidtbleicher D: Low frequency whole-body vibrations (WBVs): impact on spinal excitability and stretch-shortening cycle (SSC) effectiveness. European Workshop on Movement Science, (2003) in press.
70. Scheibe W, Schwarzlose H: Mechanische Schwingungen. In: Rohmert W, Rutenfranz J (Hrsg.): *Praktische Arbeitsphysiologie*. Thieme, Stuttgart, New York, 258-297.
71. Schlumberger A, Salin D, Schmidtbleicher D: Krafttraining unter Vibrationsseinwirkung. *Sportverl Sportschad* 15 (2001) 1-7.
72. Sörensson A, Burström L: Transmission of vibration energy to different parts of the human hand-arm-system. *International Arch Occup Environ Health* (1997) 199-204.
73. Spitzenpfeil P, Schwarzer J, Fiala M, Mester J: Strength training with whole-body vibrations. Single case studies and time series analysis. Proceedings of the 4th Annual Congress of the European College of sport Science (1999) 613.
74. Steyvers M, Verschuere MP, Levin O, Ouamer M, Swinnen SP: Proprioceptive control of cyclical bimanual forearm movements across different movement frequencies as revealed by means of tendon vibration. *Exp Brain Res* 140 (2001) 326-334.
75. Steyvers M, Levin O, Verschuere SM, Swinnen SP: Frequency-dependent effects of muscle tendon vibration on corticospinal excitability: a TMS study. *Exp Brain Res* (2003) - Epub ahead of print.
76. Torvinen S, Sievanen H, Jarvinen TA, Pasanen M, Kontulainen S, Kannus P: Effect of 4-min vertical whole body vibration on muscle performance and body balance: a randomized cross-over study. *Int J Sports Med* 23 (2002) 374-379.
77. Torvinen S, Kannus P, Sievanen H, Jarvinen TA, Pasanen M, Kontulainen S, Jarvinen TL, Oja P, Vuori I: Effect of four-month vertical whole body vibration on muscle performance and balance. *Med Sci Sports Exerc* 23 (2003) 1523-1528.
78. Tropnikova GK, Pushkarchuk AA, Mironova GP, Burko EV: Biogenic amines in the small intestines in guinea pigs in simulated weightlessness and vibration. *Aviakosm Ekolog Med* 27 (1993) 50-54. (Abstract - Artikel in Russisch).
79. Vaczi M, Tihanyi J, Rácz L: Acute effects of whole body vibration on maximal isometric strength in elite weightlifters. Proceedings of 8th annual congress of ECSS (2003) 301.
80. Verschuere SMP, Cordo PJ, Swinnen SP: Representation of wrist joint kinematics by the ensemble of muscle spindles from synergistic muscles. *J Neurophysiol* 79 (1998) 2265-2276.
81. Verschuere SMP, Swinnen SP, Cordo PJ, Dounskaia NV: Proprioceptive control of multijoint movement: unimanual circle drawing. *Exp Brain Res* 121 (1999a) 171-181.
82. Verschuere SMP, Swinnen SP, Cordo PJ, Dounskaia NV: Proprioceptive control of multijoint movement: bimanual circle drawing. *Exp Brain Res* 121 (1999b) 182-192.
83. Verschuere SMP, Swinnen SP, Desloovere K, Duysens J: Vibration-induced changes in EMG during Human Locomotion. *J Neurophysiol* 89 (2003) 1299-1307.
84. Weber R: Muskelstimulation durch Vibration. *Leistungssport* (1997) 53-56.
85. Wierzbicka MM, Gilhodes JC, Roll JP: Vibration-Induced Postural Post-effects. *J Neurophysiol* 79 (1998) 143-150.
86. Yamaguchi Y: The response of monoamines in the rat brain to local vibration exposure. *Sangyo Igaku*, 27 (1985) 73-82. (Abstract - Artikel in Japanisch).
87. Zimmermann CL, Cook TM: Effects of vibration frequency and postural changes on human responses to seated whole body vibration exposure. *Intern Arch Occup Environ Health* 69 (1997) 165-179.

Korrespondenzadresse:

Dr. C.T. Haas

Institut für Sportwissenschaften

J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main

Ginnheimer Landstr. 39

60487 Frankfurt

Fax: 069 – 798 245 74

e-mail: c.haas@sport.uni-frankfurt.de