

1. Kraft und posturale Kontrolle im Alter: Auswirkungen von Training

Autoren: Urs Granacher¹, Albert Gollhofer², Lukas Zahner¹

Zusammenfassung

Der Vorgang des Alterns ist u.a. durch strukturelle Veränderungen im neuromuskulären System geprägt, die einen Verlust der Maximal- und Explosivkraft sowie Defizite in der posturalen Kontrolle (Haltungskontrolle) bedingen und damit ein erhöhtes Sturzrisiko verursachen. Die einfache und numerische Atrophie primär von Typ-II-Fasern ist für den altersbedingten Verlust an Muskelmasse (Sarkopenie) und Kraft verantwortlich. Multiple Denervations- und Reinnervationsprozesse von Muskelfasern scheinen die numerische Atrophie zu verursachen. Neue Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass nicht der Verlust von Motoneuronen die numerische Atrophie induziert, sondern das im Alter erheblich verschlechterte Potenzial zur Regeneration und Reinnervation von Muskelfasern. Diese Annahme wird durch den altersbedingten Verlust von Satellitenzellen, der zur Sarkopenie beiträgt, unterstützt. Defizite in der statischen und dynamischen Haltungskontrolle äußern sich im Alter in Form verlängerter Latenzzeiten und verschlechterter posturaler Reflexe bei der Kompensation von Störreizen während des Stehens und Gehens. Hierfür scheinen biologische Alterungsprozesse, die auf allen Ebenen des somatosensorischen Systems stattfinden, verantwortlich zu sein. Morphologische Veränderungen der Muskelspindeln und damit eine eingeschränkte sensorische Bewegungswahrnehmung sind für diesen Sachverhalt beispielhaft. Daher müssen adäquate Trainingsmaßnahmen entwickelt und angewandt werden, die den degenerativen Prozessen im somatosensorischen System ent-

gegenwirken bzw. diese verlangsamen. Durch spezifisches Krafttraining kann auch in höchstem Alter die Maximal- und Explosivkraft verbessert werden. Dies wird einerseits durch neuronale Mechanismen (verbesserte intra- und intermuskuläre Koordination) und andererseits durch eine vergrößerte Anzahl von Satellitenzellen und damit durch Hypertrophie induziert. Gleichgewichtstraining bewirkt sowohl eine verbesserte Fähigkeit zur Kompensation von Störreizen während des Gehens als auch einen Zuwachs der Maximal- und Explosivkraft der Beinstrecker. Neuere Forschungsansätze orientieren sich gezielt an den körperlichen Defiziten älterer Menschen, indem, in Anlehnung an die Vorgehensweise im Leistungssport, spezifische Trainingsreize appliziert werden. Entsprechend wird Krafttraining mit stark explosiven Kraftein-sätzen durchgeführt und in das Gleichgewichtstraining werden Störreize integriert. Vorläufige Studienergebnisse deuten darauf hin, dass diese Trainingsmaßnahmen spezifische Anpassungen der Schnellkraft und der Gleichgewichtsregulation hervorrufen, die denjenigen traditioneller Trainingsprogramme überlegen sind und damit einen verstärkt sturzpräventiven Charakter haben könnten.

Schlüsselwörter: Maximal- und Schnellkraft, Krafttraining, Gleichgewichtstraining

¹ Institut für Sport und Sportwissenschaften der Universität Basel, Schweiz

² Institut für Sport und Sportwissenschaft der Universität Freiburg, Deutschland

1.1. Einleitung

In den Industrienationen ist eine stetig voranschreitende Überalterung der Gesellschaft zu verzeichnen (1). Aufgrund dieser Tendenz und einer verstärkt notwendigen medizinischen Betreuung im Alter unterliegt das Gesundheitssystem enormen finanziellen Belastungen (2). Die intensive medizinische Versorgung im Alter hat ihre Ursache u.a. in einer altersbedingten Reduktion der neuromuskulären Leistungsfähigkeit, die sich in Form von Kraftverlusten, verstärkten posturalen Schwankungen, Ganginstabilitäten und einer verschlechterten Fähigkeit zur Kompensation von extern auftretenden Störreizen während des Stehens und Gehens äußert (3). Eine Folge dieser Funktionseinbußen ist die erhöhte Anzahl von Stürzen im Alter, welche v.a. durch den altersbedingten Krafterückgang (4) sowie Defizite in der statischen (5) und dynamischen posturalen Kontrolle (Haltungskontrolle) (6) verursacht wird (vgl. Kap. „Stürze“).

Aus unterschiedlichen Studien geht hervor, dass das neuromuskuläre System des älteren Menschen über eine trainingsbedingte Plastizität (Anpassungskapazität) verfügt, die sogar mit derjenigen junger Menschen vergleichbar ist (7). Durch den gezielten Einsatz von Krafttraining kann altersbedingten muskulären Defiziten entgegengewirkt werden (8). Gleichgewichtstraining reduziert posturale Schwankungen (9) und

verbessert die Fähigkeit, Stolpersituationen während des Gehens erfolgreich zu kompensieren (10). Aufgrund dieser Wirkweisen bieten sich diese Trainingsmaßnahmen für den sturzpräventiven Einsatz an (vgl. Kap. „Stürze“).

In den nun folgenden Ausführungen wird zunächst auf den altersbedingten Kraftverlust und auf Defizite in der posturalen Kontrolle eingegangen. Anschließend werden die neuromuskulären Wirkweisen von Kraft- und Gleichgewichtstraining diskutiert.

1.2. Kraftverlust im Alter

Biologische Alterungsprozesse führen zu einem unvermeidlichen Verlust der Maximal- und der Schnellkraft (11). Aus unterschiedlichen Studien geht hervor, dass sich die Maximalkraft zwischen dem 30. und 80. Lebensjahr in Abhängigkeit von den folgenden Faktoren um 20% bis 40% reduziert (3):

- ▶ angewandtes Studiendesign (Querschnitt vs. Längsschnitt) (12)
- ▶ Kontraktionsform (isokinetisch vs. isometrisch) (13)
- ▶ Muskelgruppe (untere vs. obere Extremität) (14)
- ▶ Altersgruppe (alt vs. sehr alt) (15)
- ▶ Gesundheitszustand (gesund vs. chronisch krank) (16)
- ▶ Fitnesszustand (inaktiv vs. aktiv) (17)

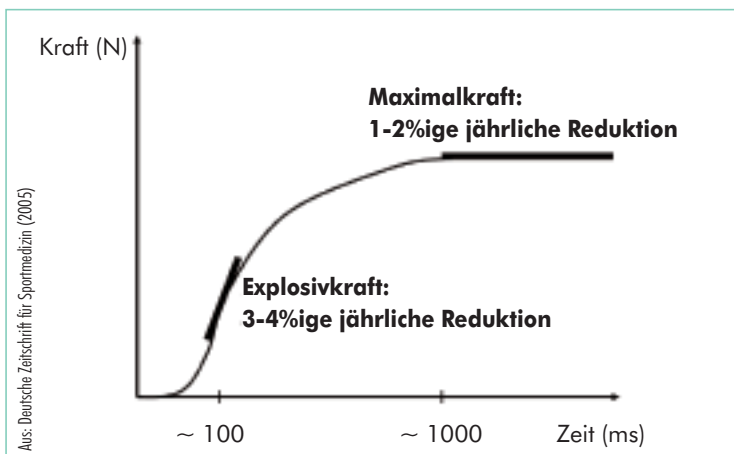


Abb. 1: Schematische Darstellung eines Kraft-Zeit-Verlaufs. Dargestellt ist die ab dem 65. Lebensjahr einsetzende jährliche Reduktion der Maximalkraft und der Explosivkraft (Parameter der Schnellkraft, entspricht der größten Steigung im Kraft-Zeit-Verlauf). In Anlehnung an Skelton et al. (11)

Von diesem Krafterückgang scheint insbesondere die Muskulatur der unteren Extremitäten betroffen zu sein (Knieextensoren und Plantarflexoren) (14, 18). Dies wird vermutlich durch eine verstärkte körperliche Inaktivität im Alter verursacht, die v.a. die unteren Extremitäten in Mitleidenschaft zieht. Die Auswirkungen des Alterns sind nicht nur unterschiedlicher Ausprägung im Hinblick auf die untersuchten Muskelgruppen und die Kontraktionsweise, sondern auch in Bezug auf den gewählten Krafteinsatz. Neuere Studien belegen, dass die Fähigkeit zur schnellen Kraftentwicklung stärker durch Alterungsprozesse beeinträchtigt wird als das Vermögen, maximale Kräfte zu entwickeln (15). Skelton et al. (11) berichten, dass sich ab dem 65. Lebensjahr die Maximalkraft um jährlich ein bis zwei Prozent reduziert, wohingegen die Explosivkraft, definiert als größter Anstieg im Kraft-Zeit-Verlauf, einer jährlichen Reduktion von drei bis vier Prozent unterliegt (vgl. Abb. 1).

Weiterhin ermittelten McNeil et al. (15) eine 25%ige Reduktion der Schnellkraft der Dorsalflexoren zwischen dem dritten und siebten Lebensjahrzehnt. Dieser Verlust verdoppelte sich während der nächsten beiden Lebensdekaden, so dass die Schnellkraft von Männern in der neunten Lebensdekade um 60% im Vergleich zu derjenigen junger Männer (mittleres Alter 26 Jahre) verringert war. Dieses Phänomen konnte ebenfalls bei konzentrischen Kontraktionen, bei reaktiven Sprüngen im Dehnungsverkürzungszyklus (19, 20) sowie bei explosiv durchgeführten isometrischen Kontraktionen (21, 22) festgestellt werden.

Von einem funktionellen oder therapeutischen Standpunkt aus betrachtet wäre es interessant zu wissen, ob Assoziationen zwischen Maximal- und Schnellkraft einerseits und der Bewegungsqualität beim Vollzug von Alltagsaktivitäten, der Haltungskontrolle und der Sturzhäufigkeit andererseits bestehen. In unterschiedlichen Untersuchungen konnte ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Kennwerten der Schnellkraft (Beinstrecker) und der Leistung in Tests zur Überprüfung der Alltagsstauglichkeit (z.B. Zeit zum Treppensteigen, normale und maximale Gehgeschwindigkeit, 6-Minuten-Gehtest) hergestellt werden (23, 24). Weiterhin wurden für gesunde ältere Menschen geschlechtsspezifische Kraftschwellenwerte der

Knieextensoren ermittelt, die eine hohe Vorausagekraft im Hinblick auf die zukünftige Mobilitätseinschränkung haben (25). Es wird berichtet, dass Frauen mit einem Schwellenwert von 1,01 Nm/kg und Männer mit einem Wert von 1,13 Nm/kg einem hohen Risiko unterliegen, zukünftig Mobilitätseinschränkungen zu erfahren. Werte von 1,34 Nm/kg (Frauen) und 1,71 Nm/kg (Männer) deuten hingegen auf ein geringes Risiko hin (25). In einer weiteren Studie untersuchten Izquierdo, Aguado, Gonzalez, Lopez und Häkkinen (26) den Zusammenhang zwischen Kennwerten der Kraft und der posturalen Kontrolle bei jungen Erwachsenen (mittleres Alter 21 Jahre), bei Erwachsenen mittleren Alters (mittleres Alter 40 Jahre) und bei älteren Menschen (mittleres Alter 71 Jahre). Die Autoren konnten eine statistisch signifikante Assoziation zwischen der Explosivkraft der Beinstrecker und den posturalen Schwankungen feststellen.

Im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen der Kraft der unteren Extremitäten und dem Sturzrisiko geht aus der Studie von Pijnappels et al. (4) hervor, dass ein gewisses Maximalkraftniveau der Beinstrecker vorhanden sein muss, um Störreize während des Gehens erfolgreich kompensieren zu können. Weiterhin konnten die Autoren anhand der Maximalkraft der Beinstrecker ältere sturzgefährdete Personen identifizieren.

Asymmetrische Kraftleistungen der Beine (Ungleichgewicht zwischen rechtem und linkem Bein) scheint ebenfalls Ursache für ein erhöhtes Sturzrisiko im Alter zu sein (27). Vermutlich erschwert das ungleiche Kraftverhältnis zwischen rechtem und linkem Bein das Vermögen, den Körperschwerpunkt über der schmalen Unterstützungsfläche der Füße zu halten (28).

1.3. Ursachen des Kraftverlustes im Alter

Die Kraft, welche ein Muskel produzieren kann, wird neben neuronalen Faktoren v.a. durch die vorhandene Skelettmuskelmasse beeinflusst (29). Daher ist eine altersbedingte Verringerung der Muskelmasse, die auch als Sarkopenie bezeichnet wird (30), maßgeblich für den Kraftverlust im Alter verantwortlich. Aus unterschiedlichen Studien geht hervor, dass sich die Muskelmasse zwischen dem 40. und 80. Le-

bensjahr um 30% bis 50% reduziert (13, 31). Janssen, Heymsfield, Wang und Ross (32) führten magnetresonanztomographische Untersuchungen des ganzen Körpers bei 468 Frauen und Männern im Alter von 18 bis 88 Jahren durch. Die Autoren konnten bereits ab der dritten Lebensdekade einen Verlust der Muskelmasse relativ zur Körpermasse feststellen. Erst gegen Ende der fünften Lebensdekade war jedoch ein erheblicher Verlust der absoluten Muskelmasse zu verzeichnen. Der Rückgang der Muskelmasse war unabhängig von der Körperstatur und fiel bei Männern stärker aus als bei Frauen (sowohl absolut als auch relativ zur Körpermasse betrachtet). Weiterhin war bei Frauen und Männern die untere Extremität stärker betroffen als die obere. Da die Muskeln der unteren Extremitäten insbesondere für die Verrichtung von Alltagsaktivitäten gebraucht werden (z.B. Gehen, Treppensteigen), ist davon auszugehen, dass der in den unteren Extremitäten dominant auftretende Verlust an Muskelmasse durch körperliche Inaktivität verursacht wird.

Welche neuromuskulären Faktoren tragen zur Sarkopenie bei?

Die im Alter verringerte Muskelmasse wird durch

1. eine Reduktion des Querschnitts einzelner Muskelfasern (einfache Atrophie),
2. eine numerische Verringerung der Anzahl von Muskelfasern (numerische Atrophie),
3. eine Kombination aus einfacher und numerischer Atrophie (33) und
4. Veränderungen der Muskelarchitektur verursacht.

Exkurs: Letzteres wurde in einer Studie von Nairi, Maganaris, Reeves und Capodaglio (34) bei jungen und älteren körperlich aktiven Männern untersucht, indem die Fasziolenlänge des Musculus gastrocnemius medialis sowie der Winkel, mit dem die Faszie in die Sehnenplatte (Aponeurose) eintritt (Fiederungswinkel oder engl. pennation angle), analysiert wurde. Bei den älteren Probanden waren die Fasziolenlänge im Mittel um 10% kürzer und der Fiederungswinkel um 13% kleiner als bei den jungen. Die Ursache für dieses Phänomen ist vermutlich der altersbedingte Verlust von in Serie geschalteten Sarkomeren, der

sich negativ auf die Kraft-Geschwindigkeits-Relation des betroffenen Muskels auswirkt (34). Biologische Alterungsprozesse beeinflussen jedoch nicht nur in Serie geschaltete Sarkomere, sondern insbesondere auch parallel angeordnete Sarkomere. So ist der Verlust an Muskelmasse vor dem 50. Lebensjahr primär auf körperliche Inaktivität zurückzuführen, die wiederum eine Reduktion des Querschnitts einzelner Muskelfasern (parallel angeordnete Sarkomere) bewirkt (35). Nach dem 50. Lebensjahr und v.a. mit Beginn der sechsten Lebensdekade ist die numerische Atrophie für den weiteren Verlust der Muskelmasse verantwortlich. In diesem Zusammenhang ermittelten Lexell et al. (31) einen 50%igen Verlust der Anzahl an Muskelfasern im Musculus vastus lateralis zwischen dem 50. und 80. Lebensjahr. Die numerische Atrophie geht einerseits mit Einlagerungen von Fett- und Bindegewebe im Muskel einher (36) und andererseits mit einer Schädigung von Satellitenzellen (Stammzellen im Muskel, die u.a. für seine Regeneration verantwortlich sind). Renault, Thornell, Eriksson, Butler-Browne und Mouly (37) konnten bei älteren Probanden eine geringere Anzahl an Satellitenzellen im Vergleich zu jüngeren feststellen. Für den altersbedingten Verlust von Muskelfasern und Satellitenzellen wird das Absterben (Apoptose) des Zellkerns (Nukleus) mit nachfolgender Degeneration der gesamten Zelle verantwortlich gemacht (Alway und Siu (38)). Der numerische Verlust von Satellitenzellen hat einen doppelt negativen Effekt auf die alternde Muskulatur. Einerseits verschlechtert sich das regenerative Potenzial des Muskels, andererseits ist die Fähigkeit zur Hypertrophie (Vergrößerung des Muskelquerschnitts) bei geeigneter Reizsetzung im Krafttraining eingeschränkt.

Es stellt sich nun die Frage, ob ein Fasertyp von der altersbedingten Muskelatrophie besonders stark betroffen ist. Unterschiedlichen Studien ist zu entnehmen, dass die Typ-II-Fasern (schnell zuckende Fasern) stärker den Alterungsprozessen unterliegen als die Typ-I-Fasern (langsam zuckende Fasern) (31, 39). Lexell et al. (31) zufolge reduziert sich der Querschnitt der Typ-II-Fasern im Musculus vastus lateralis zwischen dem 20. und 80. Lebensjahr um 26%. Biopsische Analysen des Musculus gastrocnemius von jungen und älteren Personen ergaben einen 13- bis 31%igen Rückgang der Quer-

schnittsfläche von Typ-IIa- (schnell zuckender Fasertyp mit oxidativer Ausprägung) und Typ-IIb-Fasern (schnell zuckender Fasertyp mit glykolytischer Ausprägung) (39). Unterschiedliche Mechanismen werden für die einfache und numerische Atrophie im Alter verantwortlich gemacht. Es wird vermutet, dass sich die Muskelquerschnittsfläche v.a. durch körperliche Inaktivität reduziert. Für den bereits beschriebenen Verlust von Typ-II-Fasern werden das Absterben der Muskelzellkerne sowie die fehlende neuronale Ansteuerung der Muskelfasern verantwortlich gemacht (38, 40). Letzteres wird vor allen Dingen durch den numerischen Verlust großer Alpha-Motoneurone, welche die Typ-II-Fasern innervieren, verursacht (41–43). Der Verlust großer Alpha-Motoneurone führt zur Denervation insbesondere von Typ-II-Fasern (44). Die denervierten Muskelfasern degenerieren oder aber werden durch aussprossende Kollaterale kleiner Alpha-Motoneurone (innerviere Typ-I-Fasern) reinnerviert und damit zu Typ-I-Fasern umgewandelt (45). Als Folge multipler Denervations- und Reinnervationsprozesse vergrößert sich das Innervationsverhältnis der überlebenden motorischen Einheiten (45, 46). Funktionell betrachtet wirkt sich das vergrößerte Innervationsverhältnis motorischer Einheiten negativ auf die Feinregulation der Kraft bei niedriger Intensität aus (47).

Exkurs: Neue Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass nicht der Verlust von Motoneuronen die numerische Atrophie induziert, sondern das im Alter erheblich verschlechterte Potenzial zur Regeneration und Reinnervation von Muskelfasern (48). Die Autoren argumentieren, dass die altersbedingte Reduktion der Motoneurone lediglich 10% bis 15% beträgt (49) und damit zu gering ausfällt, um als singuläre Ursache für den Muskelfaserverlust in Frage zu kommen. Neben der einfachen und numerischen Atrophie ist in der Muskulatur älterer Menschen eine größere Anzahl von Markern enthalten, welche für die Regeneration der Muskelfasern verantwortlich sind (36). Dies impliziert, dass aufgrund der Markeraktivierung eine Schädigung des Muskels in Form teilweise denervierter Muskelfasern vorliegt. Indes versuchen die noch intakten Kollaterale dieser Motoneurone bereits denervierte Muskelfasern zu reinnervieren. Da jedoch die Plastizität der Axone im Alter eingeschränkt ist (50), scheint nicht der voranschreitende Verlust von

Motoneuronen, sondern das fehlende regenerative Potenzial der Motoneurone, bereits denervierte Fasern zu reinnervieren, für den endgültigen Verlust von Muskelfasern verantwortlich zu sein (48).

Neben der Sarkopenie tragen auch neuronale Faktoren zum Krafterückgang im Alter bei. In einer Studie von Macaluso et al. (51) wurden die Maximalkraft bei isometrischer Kontraktion der Kniestrecker und -beuger sowie die Elektromyogramme (EMG) des Musculus vastus lateralis und des Musculus biceps femoris bei jungen und älteren Frauen analysiert. Es konnte eine statistisch signifikante Reduktion der Maximalkraft der Knieextensoren und -flexoren festgestellt werden, die mit einer reduzierten Agonistenaktivität sowie einer erhöhten Koaktivität von Agonist und Antagonist bei der Knieextension einherging. Die verstärkt wirksame Koaktivierung der das Gelenk umgebenden Muskeln wirkt sich einerseits negativ auf die Kraftleistung aus. Andererseits bewirkt die Koaktivierung agonistischer und antagonistischer Muskeln eine erhöhte „Gelenkstiffness“ und bietet daher Schutz vor Verletzungen des aktiven und passiven Bewegungsapparates. In diesem Zusammenhang wäre die Koaktivierung von Muskeln als kompensatorischer Mechanismus zur Stabilisation des Gelenkkomplexes zu interpretieren (51). Die reduzierte Agonistenaktivität kann durch eine geringere Anzahl rekrutierter motorischer Einheiten, eine verringerte Feuerungsrate motorischer Einheiten und eine verschlechterte Synchronisation motorischer Einheiten verursacht werden (51). Kamen, Sison, Du und Patten (52) berichten, dass sich im Alter die Entladungsrate motorischer Einheiten bei Kräfteinsätzen um über 50% des Maximalkraftniveaus verändert. Diese Autoren konnten feststellen, dass bei isometrischen Maximalkontraktionen des Musculus interosseus dorsales manus die Feuerungsrate älterer Versuchspersonen im Vergleich zu derjenigen junger Probanden um 64% reduziert war. Das mit dem Altern einhergehende verschlechterte Frequenzierungsverhalten motorischer Einheiten wird darauf zurückgeführt, dass Einheiten mit einem vergrößerten Innervationsverhältnis von kleinen Alpha-Motoneuronen innerviert werden (45). Das vergrößerte Innervationsverhältnis tonischer Einheiten im Vergleich zu demjenigen phasischer Einheiten ist

dafür verantwortlich, dass das Nerv-Muskel-System des älteren Menschen nicht mehr in der Lage ist, hohe Feuerungsraten zu Beginn schnellkräftiger Kontraktionen zu realisieren. Dies könnte ein möglicher Erklärungsansatz für die reduzierte Fähigkeit zur schnellen Kraftproduktion im Alter sein.

1.4. Posturale Kontrolle im Alter

Nicht nur in vielen Sportarten, sondern auch im Alltag wird vom Menschen ein Höchstmaß an Haltungskontrolle verlangt, um komplexe Bewegungshandlungen mit hoher Präzision ausführen zu können. Unter der Haltungs- oder posturalen Kontrolle versteht man allgemein das Vermögen, eine aufrechte Körperposition im Raum gegen den Einfluss der Schwerkraft einzunehmen (53). Spezifischer betrachtet kann die Haltungs- oder posturale Kontrolle in eine statische und eine dynamische Komponente unterteilt werden, wobei die statische posturale Kontrolle das Ausbalancieren der aufrechten Position während des Sitzens oder Stehens umfasst und die dynamische posturale Kontrolle das Ausbalancieren einer möglichst aufrechten Position während des Gehens oder Laufens (54). Biomechanisch betrachtet bedeutet dies, dass das Lot durch den Körperschwerpunkt innerhalb der Unterstützungsfläche (Füße) liegen muss, um eine stabile Gleichgewichtssituation zu gewährleisten (55).

Die Fähigkeit zur Gleichgewichtsregulation verändert sich im Lebensverlauf. Bei Kindern ist das somatosensorische System noch nicht vollständig entwickelt, weshalb Defizite in der Haltungskontrolle im Vergleich zu jungen gesunden Erwachsenen festgestellt werden können (56). Bei älteren Menschen tragen degenerative Prozesse des somatosensorischen Systems zu einer verschlechterten Haltungskontrolle bei (3). Im Lebensverlauf wird daher eine U-förmige Abhängigkeit zwischen posturaler Kontrolle und Alter postuliert (57). Era et al. (5) analysierten die statische posturale Kontrolle (Geschwindigkeit der Schwankungen des Kraftangriffspunktes (Centre of Pressure)) von Probanden im Alter von 30 bis 80 Jahren bei ruhigem bipedalen Stand auf einer Kraftmessplatte. Die Gruppe der

40- bis 49-Jährigen zeigte bereits eine verschlechterte Haltungskontrolle im Vergleich zur Gruppe der 30- bis 39-Jährigen. Ab dem 60. Lebensjahr vergrößerten sich die posturalen Schwankungen erheblich. Die Fähigkeit zur dynamischen posturalen Kontrolle wurde in einer Studie von Guimaraes und Isaacs (58) bei hospitalisierten und gestürzten älteren Menschen im Vergleich zu Personen ohne Sturzvergangenheit untersucht. Es konnten reduzierte Gehgeschwindigkeiten, kürzere Schrittlängen und eine größere Variabilität der Schrittlänge festgestellt werden (58). Weiterhin wurde die Fähigkeit zur Kompensation von Perturbationsreizen (Störreizen) während des Stehens auf einer Plattform bei jungen Probanden sowie bei haltungssicheren und haltungsunsicheren älteren Menschen analysiert (59). Es wurden längere Latenzzeiten (Zeit zwischen dem Reizeintritt und der ersten physiologischen Reizantwort), reduzierte posturale Reflexamplituden und eine länger andauernde Aktivierung posturaler Muskeln bei den älteren im Vergleich zu den jungen Probanden festgestellt. Während biologische Alterungsprozesse für die längeren Latenzzeiten und die verringerten Reflexamplituden verantwortlich sind, scheint die zeitlich verlängerte Muskelaktivierung einen Kompensationsmechanismus für die altersbedingten Veränderungen der Gleichgewichtsregulation darzustellen. Interessanterweise konnte dieser Kompensationsmechanismus lediglich bei den haltungssicheren älteren Probanden ermittelt werden, jedoch nicht bei den unsicheren. In einem funktionelleren Ansatz wurde bei jungen und alten Probanden die Fähigkeit zur Kompensation von beschleunigenden Perturbationsreizen während des Gehens auf einem Laufband untersucht (60). Tang und Woollacott (60) berichten, dass bei den älteren Versuchspersonen im Vergleich zu den jüngeren verlangsamte Latenzzeiten, reduzierte Reflexaktivitäten und eine erhöhte Koaktivität von Muskeln, die zur Kompensation des Störreizes beitragen, festgestellt werden konnten. Granacher, Strass und Gollhofer (61) bestätigen diese Ergebnisse für abstoppende Störreize während des Gehens auf einem Laufband. Die beschriebenen Defizite in der Gleichgewichtsregulation älterer Menschen bewirken, dass diese einem höheren Sturzrisiko unterliegen als junge und gesunde Menschen. In

der Tat konnten Pavol, Owings, Foley und Grabiner (62) bei der Applikation von Perturbationsreizen während des Gehens verlängerte Latenzzeiten (> 145 ms) bei älteren Menschen feststellen, die wiederum auf ein erhöhtes Sturzrisiko hinwiesen. Weiterhin fanden Fernie, Gryfe, Holliday und Llewellyn (63) bei gestürzten älteren Menschen größere posturale Schwankungen als bei nicht gestürzten älteren Probanden.

1.5. Ursachen der verschlechterten posturalen Kontrolle im Alter

Über viele Jahre hinweg hat man angenommen, dass die posturale Kontrolle hoch automatisiert ist und v.a. reflektorisch reguliert wird (64). Heute weiß man jedoch, dass Aufmerksamkeitsressourcen notwendig sind, um den Körperschwerpunkt über der Unterstützungsfläche zu stabilisieren (65). Daher ist für die erfolgreiche Kontrolle der Haltung die komplexe Prozessierung und Integration sensorischer Informationen, welche über das visuelle, das vestibuläre und das propriozeptive System bereitgestellt werden, auf spinaler und supraspinaler Ebene notwendig (66, 67).

Das visuelle System liefert sowohl Informationen über Fremdbjekte im Raum als auch über die eigene Körperposition und die Lage einzelner Körpersegmente zueinander im Raum. Das vestibuläre System befindet sich im Innenohr und übermittelt Informationen an das zentrale Nervensystem über die Stellung des Kopfes im Raum und über plötzliche Lageveränderungen bzw. Beschleunigungen des Kopfes (z.B. Kopfdrehungen, Translations-/Rotationsbeschleunigungen). Es ist damit maßgeblich an der Regulation und Aufrechterhaltung der posturalen Kontrolle beteiligt (68). Das propriozeptive System nimmt über spezielle Rezeptoren, die sich in der Muskulatur (Muskelspindeln), den Sehnen (Golgi-Sehnen-Organen), den Gelenkkapseln (Ruffini- und Pacini-Körperchen) und der Haut (freie Nervenendigungen, Meissner-, Ruffini- und Pacini-Körperchen) befinden, Veränderungen der Muskellänge, der Sehnenlänge, der Gelenkstellung sowie der Schmerzempfindung wahr und übermittelt diese an das Zentralnervensystem

(ZNS) (69). Diese Rezeptoren werden auch als Mechanorezeptoren bezeichnet, da sie mechanische Reize registrieren und in nervöse Erregungen umwandeln (70). Der Literatur ist zu entnehmen, dass die Bewegungswahrnehmung über Propriozeptoren von besonderer Bedeutung für die Regulation der posturalen Kontrolle ist (71–74). So bewirkt z.B. eine ischämische (Blockierung der Blutzufuhr), anästhetische oder durch Kühlung eingeleitete Blockade des afferenten oder sensorischen Inputs von Rezeptoren der unteren Extremitäten eine Zunahme der posturalen Schwankungen während des ruhigen Stehens (75–77). Die Regulation der dynamischen posturalen Kontrolle scheint insbesondere auf die afferente Information von Muskelspindeln und Hautrezeptoren angewiesen zu sein (73, 78, 79). Weiterhin wird berichtet, dass altersbedingte propriozeptive Defizite maßgeblich zur erhöhten Sturzgefahr von Senioren beitragen (80). Daher werden im Folgenden die Auswirkungen von Alterungsprozessen speziell auf die Propriozeption beschrieben, obwohl altersbedingte degenerative Prozesse auf allen Ebenen des somatosensorischen Systems stattfinden (81, 82).

Verschiedene degenerative Alterungsprozesse desensibilisieren die Muskelspindeln (83, 84). Aufgrund kollagener Einlagerungen verdickt sich die Bindegewebskapsel, welche die Muskelspindel umgibt (85, 86). Weiterhin verringert sich die Anzahl intrafusal Fasern (Fasern der Muskelspindel) im Alter, was zu Innervationsstörungen der Muskelspindel führt (83, 87). Durch diesen Verlust reduziert sich die Geschwindigkeit und verschlechtert sich die Genauigkeit, mit der die Muskelspindel auf durch Störreize induzierte Muskellängenänderungen reagieren kann (84). Die verschlechterte Dehnungsempfindlichkeit der Muskelspindeln bewirkt altersbedingte Modifikationen des Muskeldehnungsreflexes, wodurch posturale Unsicherheiten nicht mehr ausreichend über diesen Mechanismus kompensiert werden können (84).

Aufgrund der Desensibilisierung von Muskelspindeln wird das zentrale Nervensystem des alten Menschen mit einer reduzierten Menge an sensorischer Information aus der Peripherie versorgt. Dieses „sensorische Informationsdefizit“ äußert sich auf dem efferenten Schenkel des Reflexbogens in einer reduzierten Reflexaktivität

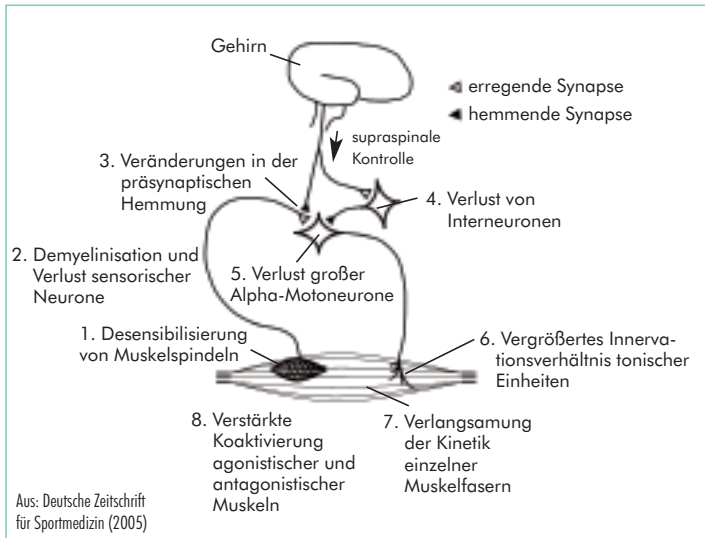


Abb. 2: Altersbedingte Veränderungen im somatosensorischen System, die sowohl afferent sensorische als auch efferent motorische Funktionsabläufe beeinträchtigen. Dargestellt sind die im Text beschriebenen und diskutierten degenerativen Prozesse im somatosensorischen System. Die synaptischen Übergänge sind farblich unterlegt. Weiße Dreiecke stellen erregende Synapsen dar, schwarze Dreiecke hemmende. In Anlehnung an Granacher und Gollhofer (149)

(60, 61). Der direkte afferente Input bedingt somit den efferenten Output.

Die Auswirkungen des Alterns auf Gelenkrezeptoren und Golgi-Sehnen-Organen wurden bislang nur marginal untersucht. Morisawa (88) konnte feststellen, dass sich die Anzahl von Ruffini- und Pacini-Körperchen, Golgi-Sehnen-Organen und freien Nervenendigungen im Alter verringert. Die numerische Reduktion der Gelenkrezeptoren wirkt sich vermutlich aufgrund verschlechterter Feedbackmechanismen negativ auf die Qualität der Gelenkkontrolle aus. Biologische Alterungsprozesse bewirken weiterhin eine Demyelinisation sensorischer Neurone (89), einen Verlust sensorischer Neurone (90), Veränderungen in der präsynaptischen Hemmung (91) sowie die numerische Reduktion von Inter- (41) sowie Gamma- und Alpha-Motoneuronen (92). Die genannten degenerativen Prozesse im somatosensorischen System (vgl. Abb. 2) stellen in ihrer Gesamtheit die Ursache für das verschlechterte Kraft- und Reflexverhalten sowie die erhöhte Sturzgefahr im Alter dar (93). In zahlreichen Studien (10, 94–97) kam man jedoch zu dem Ergebnis, dass neuromuskuläre Trainingsformen auch beim alten Menschen eine verbesserte posturale Kontrolle sowie einen Kraftzuwachs bewirken können.

1.6. Die Bedeutung von Krafttraining im Alter

In einer Vielzahl von Studien (97–100) wurden die Auswirkungen von Krafttraining im Alter auf die Maximal- und Explosivkraft sowie auf die posturale Kontrolle untersucht (vgl. Tab. 1). Ein gezieltes Krafttraining führt auch in dieser Altersgruppe zu Steigerungsraten der Maximal- und Explosivkraft, die in Abhängigkeit von den gewählten Belastungsnormativa (z.B. Trainingsintensität und -umfang), den Kontraktionsformen (z.B. isometrisch vs. isokinetisch), dem Fitness- (z.B. körperlich aktiv vs. inaktiv) und Gesundheitszustand (z.B. gesund vs. chronisch krank) sowie dem Alter der Versuchspersonen (z.B. betagt vs. hoch betagt) erheblich variieren können (97, 101). Entsprechend sind Tab. 1 trainingsbedingte Kraftgewinne in einem Bereich von 10% bis 174% zu entnehmen.

Von einem funktionellen Standpunkt aus betrachtet ist das Vermögen, schnell Kräfte zu entwickeln, sicherlich bedeutsamer für die Vermeidung von Stürzen als die Fähigkeit, maximale Kräfte zu produzieren (102). Dies lässt sich damit begründen, dass die Zeit bis zum Erreichen der Maximalkraft zu lang ist, um einen Sturz erfolgreich zu verhindern. Somit wirkt sich in Stolpsituationen die Fähigkeit, schnell Kraft zu ent-

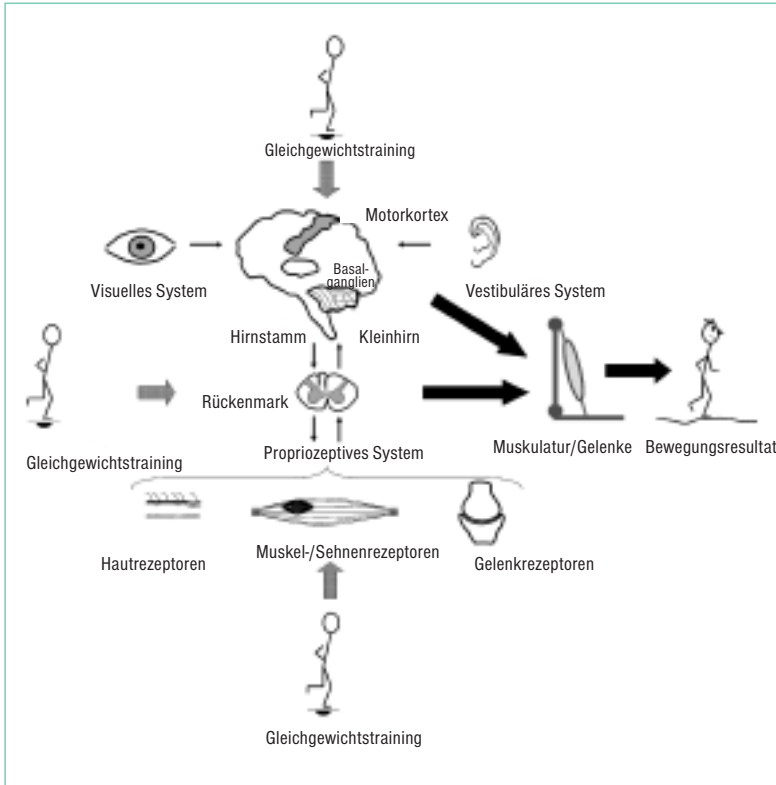


Abb. 3: Wirkweise unterschiedlicher Trainingsmethoden auf die Maximal- und Explosivkraft (in Anlehnung an (67))

wickeln, effektiver auf die Vermeidung von Stürzen aus als das Vermögen, möglichst hohe Kraftwerte zu erzielen. Vor diesem Hintergrund sollten Trainingsmaßnahmen angewandt werden, welche die Explosivkraft verbessern. Aktuellen Forschungsarbeiten ist zu entnehmen, dass Krafttraining mit explosiven Krafteinsätzen gegen mittlere Lasten (Schnellkrafttraining) größere Effekte auf die Explosivkraft und die Bewegungsqualität beim Vollzug von Alltagsaktivitäten hat als traditionelle Krafttrainingsmethoden (z.B. Maximalkrafttraining mit der Wirkweise Hypertrophie) (103–106) (vgl. Abb. 3). Konkrete Angaben über die Belastungsnormativa im Maximal- und Schnellkrafttraining mit älteren Menschen finden sich in den Tabellen 2 und 3.

Für die klinische und therapeutische Praxis ist die Nachhaltigkeit von trainingsbedingten Kraftzuwachsdaten bedeutsam. In einer Studie wurde die Last, welche einmal unter dynamischen Be-

dingungen zur Hochstreckung gebracht werden kann (Einerwiederholungsmaximum (EWM) oder engl. one repetition maximum (1RM) der Armflexoren/-extensoren und der Beinextensoren), bei drei Experimentalgruppen mit einem mittleren Alter von 72 Jahren erfasst (107). Gruppe I führte während 5 Jahren ein Krafttraining mit zwei Trainingseinheiten pro Woche durch. Während der ersten beiden Jahre lag die Trainingsintensität bei 80% des EWM, während der letzten drei Jahre bei 60% bis 70% des EWM. Gruppe II beendete das Krafttraining nach zwei Jahren mit zwei Trainingseinheiten pro Woche bei einer Trainingsintensität von 80% des EWM. Gruppe III diente als Kontrolle. Nach zwei Jahren Krafttraining zeigten Gruppe I und II statistisch signifikante Kraftzuwachsdaten aller analysierten Muskelgruppen im Vergleich zur Kontrollgruppe und zum jeweiligen Ausgangswert. Nach weiteren drei Trainings- (Gruppe I) bzw.

Autoren	Ge- schlecht	Alter (Jahre)	N	Trai- nings- form	Trai- nings- dauer	Trai- nings- intensität	Kraftzuwachs	Posturale Kontrolle
Fiatarone et al. (109)	m/w	≥ 80	10	MXT	8 W	80 %	Beinextension (EWM): +174 % EWM	höhere Gehgeschwindigkeit im Tandem-Gang: +48 %
Grimby et al. (151)	m	≥ 78	9	MXT	8 W	100 % isokinetisch	konzentrische Arbeitsweise Knieextension (30°/s): +10 % exzentrische Arbeitsweise Knieextension (30°/s): +19 %	
Lexell et al. (152)	m/w	≥ 70	35	MXT	11 W	85 % EWM	Ellbogenflexion (EWM): +49 % Knieextension (EWM): +163 %	
Häkkinen et al. (153)	m/w	≥ 67	42	SKT + MXT	24 W	50–80 % EWM	Knieextension (KMX): +36–57 % Beinextension (EKX): +28–40 % Knieflexion (KMX): +14–17 %	
Harridge, Kryger & Stensgaard (154)	m/w	≥ 85	11	MXT	12 W	80 % EWM	Knieextension (EWM): +134 % Knieextension (KMX): +17 %	
Yarasheski et al. (155)	m/w	≥ 76	17	MXT	12 W	65–75 % EWM	Knieextension (KMX): +6–22 % Knieextension (60°/s): +6–7 %	
Häkkinen, Alen, Newton & Kraemer (156)	m/w	≥ 62	36	SKT + MXT	24 W	50–80 % EWM	Beinextension (EWM): +23–29 % Beinextension (KMX): +23–32 %	höhere Gehgeschwindigkeit: +11 %
Schlitt, Camaione & Owen (110)	m/w	≥ 61	24	MXT	8 W	75 % EWM	Beinextension, Hüftadduktion, Plantarflexion (EWM): +20–48 %	höhere Gehgeschwindigkeit: +17 % Zeit vom Sitzen zum Stehen: –15 % kein Effekt auf Leistung im Einbeinstand ohne visuelle Kontrolle
Fielding et al. (157)	w	≥ 72	30	SKT vs. KAT	16 W	70 % EWM	SKT: Beinextension: +35 % (EWM) +97 % (Drehmoment) Knieextension: +45 % (EWM) +33 % (Drehmoment) KAT: Beinextension: +33 % (EWM) +45 % (Drehmoment) Knieextension: +41 % (EWM) +25 % (Drehmoment)	

Autoren	Ge- schlecht	Alter (Jahre)	N	Trai- nings- form	Trai- nings- dauer	Trai- nings- intensität	Kraftzuwachs	Posturale Kontrolle
Sacagnoli et al. (158)	m	≥ 65	14	KAT + MXT	16 W	50–80 % EWM	Plantarflexion (KMX): + 18 % Plantarflexion (EWM): + 24 %	keine Effekte des MXT auf die Reflexivität Plantarflexion (EWM): + 24 %
Hruda et al. (111)	m	≥ 75	25	SKT	10 W		konzentrische Arbeitsweise Knieextension (180°/s): + 60 %	Verbesserte Leistung in Geh- und Standtests: + 33–66 % exzentrische Arbeitsweise Knieextension (180°/s): + 44 %
Granacher et al. (10,97,135,159)	m	≥ 60	60	MXT	13 W	80 % EWM	Beinextension (KMX): + 27 % Beinextension (EKX): + 32–56 %	keine Effekte des MXT auf die Fähigkeit, Störreize während des Stehens/Gehens zu kompensieren
Holviala et al. (100)	w	≥ 60	48	SKT	21 W		Beinextension (EWM): + 27 % Beinextension (KMX): + 20 % Beinextension (EKX): + 18 %	verbesserte Leistung der Gehgeschwindigkeit und in Tests zur Überprüfung des Gleichgewichts (p < . 001)
Boitaro, Machado, Nogueira, Scales & Veloso (104)	w	≥ 60	24	SKT vs. KAT	10 W	60 % EWM	SKT: Beinextension: + 27 % (EWM) + 31 % (Drehmoment) Armextension: + 28 % (EWM) + 37 % (Drehmoment) KAT: Beinextension: + 27 % (EWM) + 8 % (Drehmoment) Armextension: + 25 % (EWM) + 13 % (Drehmoment)	SKT: verbesserte Leistung in Geh- und Standtests: + 15–43 % KAT: verbesserte Leistung in Geh- und Standtests: + 1–6 %
Casertiti, Aagaard, Buiftrup & Puggaard (160)	w	60–65; 80–89	65	SKT	12 W	75–80 % EWM	60–65 Jahre: Beinextension (KMX): + 18 % Beinextension (EKX): + 21 % CMJ (Sprunghöhe): + 10 % 80–89 Jahre: Beinextension (KMX): + 28 % Beinextension (EKX): + 51 % CMJ (Sprunghöhe): + 18 %	

Tab. 1: Auflistung verschiedener Studien zum Krafttraining im Alter

Legende: EWM = Energiewiederholungsmaximum, EKX = Explosivkraft, KAT = Kraftausdauertraining, KMX = Maximalkraft, MXT = Maximalkrafttraining, m = männlich, N = Anzahl der teilnehmenden Probanden, SKT = Schnellkrafttraining, w = weiblich, W = Wochen

Detrainingsjahren (Gruppe II) lagen die Kraftwerte für beide Gruppen signifikant über den jeweiligen Ausgangswerten. Die Werte der Kontrollgruppe verschlechterten sich über die Fünfjahresperiode. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass mit einem gezielten Krafttraining dem altersbedingten Kraftverlust entgegenge wirkt werden kann. Weiterhin zeigt sich, dass trainingsbedingte Kraftgewinne einen gewissen Zeitraum hinweg überdauern. Die regelmäßige Durchführung von Krafttraining erscheint jedoch vor dem Hintergrund des progressiv voranschreitenden Kraftverlustes ab dem 60. Lebensjahr notwendig zu sein.

Während die Literatur von einheitlichen Resultaten zu den Effekten von Krafttraining im Alter auf die Kraftleistung berichtet, sind Studienergebnisse zu den langfristigen Auswirkungen von Krafttraining auf die posturale Kontrolle älterer Menschen widersprüchlich (108). Fiatarone et al. (109) konnten eine verbesserte posturale Kontrolle infolge von Krafttraining mit älteren Menschen feststellen, wohingegen Schlicht, Camaione und Owen (110) keine Auswirkungen von Krafttraining auf die Haltungskontrolle ermittelten. Aus der Studie von Fiatarone et al. (109) geht hervor, dass ein zehnwöchiges (drei Trainingseinheiten pro Woche) Maximalkrafttraining (80% des EWM) für die Muskulatur der unteren Extremitäten die Gehgeschwindigkeit älterer Frauen und Männer ($87,1 \pm 0,6$ Jahre) um 11,8% erhöht. Granacher, Gruber und Gollhofer (97) ermittelten eine bessere Leistung im Tandem-Walk-Test (Gehen auf einer Linie im Tandem-Gang) nach einem dreizehnwöchigen Maximalkrafttraining (80% des EWM) mit drei Trainingseinheiten pro Woche bei Männern im Alter von 60 bis 80 Jahren. Weiterhin konnte nach einem zehnwöchigen Schnellkrafttraining mit dem eigenen Körpergewicht und Gummibändern eine 33%ige Verbesserung der Leistung im 6-Minuten-Gehtest bei institutionalisierten Menschen im Alter von 75 bis 94 Jahren festgestellt werden (111). Schlicht, Camaione und Owen (110) berichten indes, dass ein achtwöchiges Krafttraining mit drei Trainingseinheiten pro Woche bei einer Trainingsintensität von 80% des EWM die Gehgeschwindigkeit von 61- bis 87-jährigen Probanden statistisch signifikant verbesserte, jedoch weder die Leistung im Einbeinstandtest noch im Test „Zeit

die benötigt wird, um fünfmal hintereinander vom Sitzen zum Stehen zu kommen“. Den Studien von Granacher et al. (10, 97) ist zu entnehmen, dass krafttrainingsbedingte Anpassungen in der posturalen Kontrolle älterer Männer aufgabenspezifisch sind. So konnten die Autoren Verbesserungen in klinischen Tests (z.B. Functional-Reach-Test), jedoch nicht in biomechanischen Verfahren feststellen (z.B. Perturbationsreize während des Stehens und Gehens). In einer Metaanalyse zu den langfristigen Effekten von Krafttraining im Alter auf die posturale Kontrolle konnte eine Effektgröße von $f = .11$ ermittelt werden (108). Ein f -Wert von $.10$ kennzeichnet schwache, von $.25$ mittlere und von $.40$ starke Effekte (112).

Für die Trainingspraxis ist von Bedeutung, dass die Ausführung einzelner Krafttrainingsübungen bereits posturale Instabilitäten bei Senioren provozieren kann (113). Somit muss bei der Betreuung eines Krafttrainings mit Senioren darauf geachtet werden, dass sie unmittelbar nach Beendigung ihrer Übung am Gerät gestützt werden, um ermüdungsbedingte Stürze zu vermeiden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass man bei der Beurteilung der Auswirkungen von Krafttraining im Alter zwischen langfristigen und akuten Effekten unterscheiden muss. In Bezug auf langfristige Effekte scheint der Grad der Anpassung von der getesteten Aufgabe abhängig zu sein (97).

1.7. Anpassungsprozesse infolge von Krafttraining im Alter

Während der vergangenen Jahre konnte in einer Vielzahl von Studien die Plastizität des neuromuskulären Systems im Alter bei geeigneter Reizsetzung nachgewiesen werden (7). In Abhängigkeit von Trainingsintensität und -dauer sind unterschiedliche Mechanismen für den Kraftzuwachs verantwortlich. Während der ersten beiden Krafttrainingswochen verbesserte sich die Bewegungskoordination am Krafttrainingsgerät, was auf Lerneffekte zurückgeführt werden kann. Nach drei bis vier Wochen Krafttraining setzen neuronale Anpassungsmecha-

nismen ein, die Kraftgewinne zur Folge haben (114). Es handelt sich dabei um eine optimierte neuronale Ansteuerung der agonistisch wirkenden Muskulatur aufgrund verbesserter Rekrutierungs-, Frequenzierungs- und Synchronisationsprozesse motorischer Einheiten. Weiterhin wird die Koaktivierung synergistischer Muskeln und die reduzierte Koaktivität antagonistischer Muskeln für den trainingsbedingten Kraftzuwachs verantwortlich gemacht (115). Nach sechs Wochen Training sind bei geeigneter Reizsetzung muskuläre Anpassungsmechanismen an das Krafttraining festzustellen. Mittels bildgebender Verfahren wie z.B. der Computertomographie oder der Magnetresonanztomographie konnten nach einem dreimonatigen Krafttraining mit älteren Menschen Vergrößerungen des Muskelquerschnitts um 5% bis 17% festgestellt werden (22, 116). Es wird berichtet, dass alle Fasertypen (Typ I, IIa, IIb) infolge von Krafttraining hypertrophieren (117, 118). Neben der Faserhypertrophie scheint sich auch eine Fasertransformation von Typ IIb zu IIab zu IIa einzustellen (119). Diese Ergebnisse wurden von Shar-

man et al. (120) bestätigt, die eine Veränderung der schweren Myosinketten-Isoformen im Musculus vastus lateralis vom Typ IIb zum Typ IIa nach einem sechswöchigen Maximalkrafttraining für die unteren Extremitäten bei Senioren im Alter von 65 Jahren feststellen konnten. Welche Mechanismen sind für die trainingsbedingte Muskelhypertrophie im Alter verantwortlich? Muskelfasern sind postmitotische Zellen und können sich daher nach der Geburt eines Individuums nicht mehr teilen. Aufgrund dessen kommt die trainingsbedingte Vergrößerung des Muskelquerschnitts höchstwahrscheinlich durch die Einbindung neuer Zellkerne in bereits bestehende Muskelfasern zustande. Die Satellitenzellen, welche auch als „Reservezellen“ bezeichnet werden, liefern bei mechanischem Stress oder Verletzung/Schädigung der Muskelzelle neue, zusätzliche Zellkerne und ermöglichen auf diese Art neues Zellwachstum, ohne dabei eine Hyperplasie, also eine Zellvermehrung, zu induzieren (121). Bei jungen und gesunden Männern konnte eine mitotische Aktivierung der Satellitenzellen bereits vier bis acht Tage nach einer

Belastungsumfang	8–12 Wochen ca. 45–60 min pro Trainingseinheit 6–8 Übungen pro Trainingseinheit 3 Serien mit 8–12 Wiederholungen
Serienpause	Serienpause bzw. Pause zwischen den Übungen von 2–3 min
Belastungsfrequenz	2–3 Trainingseinheiten pro Woche
Belastungsintensität	7–80 % des Einerwiederholungsmaximums (EWM) Regulierung über die maximale Wiederholungszahl (8–12 EWM) (161) oder: Regulierung über das subjektive Belastungsempfinden. Nach Faigenbaum et al. (162, 163) sollte der Trainierende auf einer Skala von 1–20 Belastungswerte zwischen 12–16 angeben. Prinzip der Progression über Wiederholungszahl- (8–12 Wdh.) und Lasterhöhung
Kontraktionsgeschwindigkeit	langsame bis moderate Kontraktionsgeschwindigkeiten

Tab. 2: Empfehlungen für die Gestaltung der Belastungsnormativa für das Maximalkrafttraining im Alter

Belastungsumfang	6–12 Wochen ca. 45 bis 60 min pro Trainingseinheit 6–8 Übungen pro Trainingseinheit 3 Serien mit 8–10 Wiederholungen (104)
Serienpause	Serienpause bzw. Pause zwischen den Übungen von 1–2 min
Belastungsfrequenz	2–3 Trainingseinheiten pro Woche
Belastungsintensität	40–70 % des Einerwiederholungsmaximums (EWM), am wirksamsten 70 % (106) Regulierung über die maximale Wiederholungszahl (8 – 10 EWM) (161) oder: Regulierung über das sub- jektive Belastungsempfinden. Nach Faigenbaum et al. (162, 163) sollte der Trainierende auf einer Skala von 1–20 Belastungswerte zwischen 10–13 angeben. Prinzip der Progression über Wiederholungszahl- (8–10 Wdh.) und Lasterhöhung
Kontraktionsgeschwindigkeit	schnelle und explosive Kontraktionsgeschwindigkeiten

Tab. 3: Empfehlungen für die Gestaltung der Belastungsnormativa für das Schnellkrafttraining im Alter

maximalen Belastung festgestellt werden (122). Die Anzahl der Satellitenzellen vergrößerte sich nach 30 Krafttrainingstagen bei jungen Menschen um 19% und nach 90 Tagen um 31%. Im Vergleich zu den Ausgangswerten war die Anzahl der Satellitenzellen auch nach 3, 10 und 60 Tage nach Beendigung des Krafttrainings statistisch signifikant erhöht, jedoch nicht mehr nach 90 Tagen (123). In einer weiteren Studie konnte eine Assoziation zwischen der trainingsbedingten Querschnittsvergrößerung einzelner Muskelfasern und dem numerischen Zuwachs an Zellkernen in diesen Fasern festgestellt werden. Dies impliziert wiederum, dass die Vermehrung der Satellitenzellen für den Zuwachs an Muskelmasse verantwortlich ist (124). Eine Erhöhung der Anzahl an Satellitenzellen konnte auch nach einem Krafttraining für die unteren Extremitäten bei Frauen und Männern im Alter von 76 Jahren ermittelt werden. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein langfristig durchgeführtes Krafttraining die Proliferation (Zellvermehrung) der Satellitenzellen von jungen und älteren Menschen in vergleichbarem Maße anregt.

1.8. Die Bedeutung von Gleichgewichtstraining im Alter

In der Literatur wird keine einheitliche Nomenklatur für Trainingsformen zur Verbesserung der Standstabilität und des Gleichgewichtsvermögens verwendet. Wulker und Rudert (125) sowie Chong, Ambrose, Carzoli, Hardison und Jacobson (126) sprechen in diesem Zusammenhang von propriozeptivem Training, Gruber und Gollhofer (127) sowie Banaschewski, Besmens, Zieger und Rothenberger (128) von sensomotorischem Training, Paterno, Myer, Ford und Hewett (129) von neuromuskulärem Training und schließlich Bernier und Perrin (130) sowie Heitkamp, Horstmann, Mayer, Weller und Dickhuth (131) von Gleichgewichtstraining. Der Begriff propriozeptives Training erscheint irreführend, da er nur die sensorische Reizaufnahme einschließt, jedoch nicht deren Umsetzung in eine Bewegungshandlung (132). Die Bezeichnungen neuromuskuläres oder sensomotorisches Training sind zu weit gefasst, da eine Vielzahl von Trainingsformen (z.B. Krafttraining) unter

diesen Begriffen subsumiert werden können. Gleichgewichtstraining scheint eine angemessene Bezeichnung zu sein, da sich dieser Terminus konkret an den Inhalten (gleichgewichtsschulende Übungen) und Zielen (Verbesserung des Gleichgewichts) der zugrundeliegenden Trainingsform orientiert (133). Vor diesem Hintergrund wird in den nun folgenden Ausführungen der Begriff Gleichgewichtstraining verwendet. Um Missverständnisse zu vermeiden, sei der Leser darauf hingewiesen, dass die oben aufgeführten und in der Literatur verwandten Termini inhaltlich sehr ähnliche Trainingsformen beschreiben. In der Tat werden die Begriffe propriozeptives Training, sensomotorisches Training und Gleichgewichtstraining sogar synonym verwendet.

In unterschiedlichen Studien wurden die Effekte von Gleichgewichtstraining auf die posturale Kontrolle und die Kraft der unteren Extremitäten bei älteren Menschen untersucht (vgl. Tab. 4). Steadman, Donaldson und Kalra (9) berichten, dass sich ein sechswöchiges Gleichgewichtstraining positiv auf die Leistung in verschiedenen klinischen Tests zur Erfassung des Gleichgewichts und der Alltagsmobilität (z.B. 10-m-Gehtest, Berg-Balance-Scale) auswirkte. Diese Ergebnisse wurden in kürzlich durchgeführten Studien von Silsupadol et al. (134) und Granacher, Gruber und Gollhofer (135) bestätigt. Weiterhin führte ein dreizehnwöchiges Gleichgewichtstraining mit älteren Menschen zwischen dem 60. und 80. Lebensjahr zu statistisch signifikant erhöhten Maximal- und Explosivkraftwerten der Beinstrecker (96) (vgl. Abb. 3). Vor dem Hintergrund der Sturzprävention scheint die Erforschung der Wirkweisen von Gleichgewichtstraining im Alter auf die Reflexaktivitäten von hoher funktioneller Relevanz zu sein. Der Literatur ist jedoch zu entnehmen, dass sich nur wenige Studien mit dieser Thematik auseinandergesetzt haben. So untersuchten Hu und Woollacott (136) die Effekte eines zweiwöchigen Gleichgewichtstrainings auf die zeitliche und muskelspezifische Aktivierungsabfolge posturaler Reflexantworten. Mynark und Koceja (137) ermittelten die akuten Auswirkungen eines Perturbationstrainings auf das Vermögen älterer Menschen, den Hoffmann-Reflex (H-Reflex) im Musculus soleus während der Applikation eines Störreizes zu modulieren. Williams

et al. (94) analysierten die Effekte von Gleichgewichtstraining auf den Achillessehnenreflex älterer Probanden. Aus diesen Studien geht hervor, dass sich infolge von Gleichgewichtstraining die Fähigkeit zur Kompensation von Störreizen in Form von

1. verkürzten Latenzzeiten (136) sowie
2. modulierten H-Reflex- und
3. Achillessehnenreflex-Antworten verbessern lässt (94, 137).

In einem funktionelleren Ansatz untersuchten Granacher et al. (10) die Effekte eines 13-wöchigen Gleichgewichts- oder Krafttrainings mit Männern im Alter von 60 bis 80 Jahren auf das Vermögen, Störreize während des Gehens auf einem Laufband zu kompensieren. Gleichgewichtstraining induzierte verkürzte Latenzzeiten und erhöhte Reflexaktivitäten in den Muskeln, welche maßgeblich zur Kompensation der Gangperturbationen (Störreize) beitrugen. Krafttraining hingegen hatte keinerlei Auswirkungen auf die funktionellen Reflexaktivitäten. Dieses Ergebnis könnte darauf hinweisen, dass Gleichgewichtstraining sturzpräventiven Charakter besitzt (vgl. Kap. „Stürze“).

Neue Forschungsarbeiten beziehen in das Gleichgewichtstraining mit älteren Menschen die Applikation von Störreizen mit ein (138). Dieser Ansatz orientiert sich an der Annahme, dass sich die neuronale Kontrolle willkürlicher Extremitätenbewegungen maßgeblich von derjenigen unterscheidet, welche durch posturale Störreize hervorgerufen wird (139). Vor diesem Hintergrund argumentieren Maki et al. (140), dass die Applikation von Störreizen in das Training mit Senioren eingebunden werden sollte, um eine spezifische und präventive Vorbereitung auf sturzgefährdende Situationen zu gewährleisten. In einer kürzlich erschienenen Studie von Sakai, Shiba, Sato und Takahira (141) wurden die spontanen neuromuskulären Anpassungen von Senioren an wiederholt applizierte dezelerierende (abstoppende) Perturbationsreize auf dem Laufband untersucht. Es wird berichtet, dass sich im Verlaufe eines Perturbationstrainings mit zunehmender Wiederholungszahl eine Reflexmodulation im Musculus gastrocnemius und im Musculus vastus medialis erzielen ließ. Weitere Studien sind notwendig, die die Langzeiteffekte von Perturbationstraining im Vergleich zum traditionellen

Autoren	Ge- schlecht	Alter (Jahre)	N	Trai- nings- form	Trai- nings- dauer	Trai- nings- einheiten/ Woche	Kraftzuwachs	Posturale Kontrolle
Judge, Lindsey, Underwood & Winsemius (164)	w	≥62	21	GGT +	24 W	3	Knieextension: p < .001 (EWM), Beinextension: p < .001 (EWM)	verbesserte Leistung im EBS: p = .023 VNT: p < .05
Wolfson et al. (165)	m/w	≥65	110	GT vs. MXT vs. GT + MXT	12 W	3	Summenwert der Kraft (isokinetisch): GT: n.s. MXT: p < .02 GT + MXT: p < .02	Leistung im EBS: GT: p < .02 MXT: n.s. GT + MXT: p < .02 Leistung im SOT: GT: p < .02 MXT: n.s. GT + MXT: n.s.
Wolf et al. (166)	m/w	≥70	72	GT vs. TCT	15 W	1		GT: verbesserte Leistung bei Störreizen: p < .0001, PS: p < .007 TCT: Leistung bei Störreizen: n.s. PS: n.s.
Williams et al. (94)	m/w	≥64	16	GT	10 W	2	resultierende Kraft der Plantarflexoren während des Achillessehnen- reflexes: p < .05	reduzierte Reflexaktivität im Musculus gastrocnemius: p < .05
Mynark & Koroja (137)	m/w	≥65	20	PTT	2 T			verbesserte Leistung: PS: p < .05, Reflexaktivität: p < .05
Wu, Zhao, Zhou & Wei (167)	m/w	≥55	39	TCT	3 J	3	konzentrische Arbeitsweise Knieextension: (60°/s), p < .013 exzentrische Arbeitsweise Knieextension: (60°/s; 120°/s), p < .013 konzentrische Arbeitsweise Knieflexion: (60°/s), p < .71 exzentrische Arbeitsweise Knieflexion: (60°/s; 120°/s), p < .713	reduzierte posturale Schwankungen mit offenen/geschlossenen Augen in ap- und ml- Richtung (p < .05)
Steadman, Donaldson & Kalra (9)	m/w	≥60	199	GT	24 W	2		Leistung: PS: p < .22 BBS: p < .0001 GET: p < .001
Tsang & Hui-Chan (168)	m/w	≥63	49	TCT	8 W	6		verbesserte Leistung: SOT: p < .001 LOS: p < .013

Autoren	Ge- schlecht	Alter (Jahre)	N	Trai- nings- form	Trai- nings- dauer	Trai- nings- einheiten/ Woche	Kraftzuwachs	Posturale Kontrolle
Tsang & Hui-Chan (169)	m/w	≥ 60	48	TCT	3 J	1	konzentrische Arbeitsweise Knieextension: (30°/s), p < .004 exzentrische Arbeitsweise Knieextension: (30°/s), p < .049 konzentrische Arbeitsweise Knieflexion: (30°/s), p < .021 exzentrische Arbeitsweise Knieflexion: (30°/s), p < .007	Leistung: PS: ap: p < .411, ml: p < .235 PEBS: ap: p < .000
Granacher et al. (10, 135)	m	≥ 60	60	GT	13 W	3		verbesserte Fähigkeit, Stand- und Gehstörze zu kompensieren: p < .05
Gatts & Woollacott (170, 171)	m/w	≥ 68	22	TCT	3 W	5		verbesserte Fähigkeit, Gehstörze zu kompensieren: p < .004 FRT: p ≤ .0001 RES: p ≤ .0007 LES: p ≤ .0001 TUG: p ≤ .0001
Granacher et al. (10, 95, 135)	m	≥ 60	60	GT	13 W	3	Beinextension: p < .01 (KMX) p < .01 (EXK)	verbesserte Leistung: FRT: p ≤ .01 TWTv: p ≤ .01 TWTf: p ≤ .01
Li, Devault, & Van Oreghen (172)	m/w	> 65	47	TCT	48 W	1	Plantarflexion: n.s.	Leistung: RZ: n.s. EBS: n.s. TWT: n.s.
Madureira et al. (173)	w	> 65	66	GT	48 W	1		verbesserte Leistung: TUG: p < .001 BBS: p < .001
Nagy et al. (174)	m/w	≥ 77	19	GT	8 W	2		PS: längerer Schwankungsweg in ml Richtung: p < .05; verbesserte Leistung: TUG: p < .05
Rochat et al. (175)	m/w	≥ 69	47	G6T	10 W	1		erhöhte Gehgeschwindigkeit: p < .03; Schrittlänge: p < .56

Tab. 4: Auflistung verschiedener Studien zum Gleichgewichtstraining im Alter.

Legende: ap = antero-posterior, BBS = Berg Balance Scale, EBS = Einbeinstand, EWM = Einbeinstand, EWM = Einbeinstand, EWM = Einbeinstand, EWM = Einbeinstand, GET = 10-minütiger Gehstest, GGT = Gang- und Gleichgewichtstraining, GT = Gleichgewichtstraining, J = Jahr, KMX = Maximalkraft, m = männlich, MXI = Maximalkrafttraining, ml = medio-lateral, LES = Linker Einbeinstand, LOS = Limits of Stability, N = Anzahl der teilnehmenden Probanden, n.s. = nicht signifikant, PEBS = Perturbierter Einbeinstand, PS = Postural Sway, PTT = Perturbationstraining, RES = Rechter Einbeinstand, RZ = Reaktionszeit, SOT = Sensory Organization test, T = Tag, TCT = Tai-Chi-Training, TUG = Timed Up and Go Test, TWT = Tandem Walk test, TWTv/TWTf = Tandem Walk Test vorwärts/rückwärts, VND = Vorneigungstest, w = weiblich, W = Woche

Gleichgewichtstraining auf die posturale Kontrolle älterer Menschen untersuchen.

Im Gegensatz zum inhaltlich klar dimensionsanalytisch strukturierten Krafttraining (142) gibt es für Trainingsformen zur Verbesserung des Gleichgewichtsvermögens keine Belastungsvorgaben auf der Grundlage morphologisch-physiologischer Wirkweisen. Allgemeine Empfehlungen zur inhaltlichen Gestaltung von Gleichgewichtstraining wurden vom American College of Sports Medicine (ACSM) gemacht. Daraus geht hervor, dass die Trainingsintensität über die Verkleinerung der Unterstützungsfläche (z.B. bipedal vs. monopodal), über die Hinzunahme instabiler Unterlagen (z.B. Therapiekreisel, Kippbrett), über den Entzug sensorischer Informationen (z.B. Übungsausführung mit geschlossenen Augen) und über die Applikation von Störreizen reguliert werden sollte (143). Konkrete Angaben zu den Belastungsnormativa im Gleichgewichtstraining können Tabelle 5 entnommen werden. Übungsvorschläge finden sich bei Granacher, Bergmann und Gollhofer (144).

1.9. Anpassungsprozesse infolge von Gleichgewichtstraining im Alter

Die Frage nach den exakten neuromuskulären Mechanismen und Strukturen, die sich infolge von Gleichgewichtstraining verändern, kann aufgrund fehlender grundlagenorientierter Daten zu den Wirkweisen von Gleichgewichtstraining auf das neuromuskuläre System älterer Menschen nicht abschließend beantwortet werden. Auf der Basis von Untersuchungen zu den Anpassungserscheinungen an Gleichgewichtstraining bei jungen Menschen kann vermutet werden, dass spinale und v.a. supraspinale Mechanismen die beschriebenen Veränderungen in der Haltungskontrolle verursachen (vgl. Abb. 4). In diesem Zusammenhang ermittelten Taube et al. (145) mit Hilfe von transkranieller Magnet- und H-Reflex-Stimulation bei jungen Probanden, dass die kortikale Erregbarkeit bei Applikation eines Störreizes während des Stehens auf einem Laufband vor einem vierwöchigen Gleichgewichtstraining hoch war und sich nach dem Training reduzierte. Die Autoren vermuten, dass

infolge von Gleichgewichtstraining eine Verlagerung der posturalen Kontrollmechanismen von kortikalen (Motorkortex) zu subkortikalen Arealen (z.B. Basalganglien und Kleinhirn) stattfinden könnte (vgl. Abb. 4).

Spinale Mechanismen könnten v.a. für die trainingsbedingt verbesserte Fähigkeit zur Kompensation von Störreizen verantwortlich sein. Der Literatur ist zu entnehmen, dass insbesondere das propriozeptive System zur Kompensation von Gangperturbationen beiträgt (73). Eine erhöhte Wahrnehmungssensibilität von Muskelspindeln wäre daher als mögliche Ursache für die trainingsbedingt verbesserte dynamische posturale Kontrolle denkbar (10). Eine Sensibilisierung dieser Strukturen über die zentral gesteuerte Regulation des fusimotorischen Systems würde bedeuten, dass mehr sensorische Information aus der Peripherie aufgenommen und im zentralen Nervensystem verarbeitet werden kann. Dadurch könnte sich die Übertragungsrate neurologischer Signale auf die Motoneurone erhöhen, was wiederum eine verstärkte reflektorische Ansteuerung der Muskulatur zur Folge hätte. In der Tat konnte in einer Studie gezeigt werden, dass eine verbesserte Sensibilisierung von Muskelspindeln über das fusimotorische System möglich ist (137).

Wie bereits beschrieben bewirkt Gleichgewichtstraining neben den positiven Auswirkungen auf die posturale Kontrolle auch Zuwachsraten der Maximal- und Explosivkraft älterer Männer (96). Primär neuronale Mechanismen im Sinne einer verbesserten intra- und intermuskulären Koordination scheinen für das erhöhte Kraftniveau verantwortlich zu sein (127, 146). Auf der Grundlage der Studien von Meunier und Pierrot-Deseilligny (147) und Macefield, Gandevia, Bigland-Richie, Gorman und Burke (148) vermuten Gruber und Gollhofer (127), dass Gleichgewichtstraining eine Reduktion der präsynaptischen Hemmung zu Beginn der Kraftentwicklung bewirkt. Aufgrund der reduzierten präsynaptischen Hemmung bei Kontraktionsbeginn entsteht eine reflektorisch generierte neuromuskuläre Antwort im Muskel, die sich auf die Kraftproduktion auswirkt. Die Autoren Gruber und Gollhofer (127) führen den trainingsinduzierten steileren Kraftanstieg und die erhöhte neuronale Aktivierung von Muskeln der Beinextensoren auf diesen abgeschwächten

Inhibitionsmechanismus zurück. Weiterhin vermuten Granacher et al. (96), dass die Verbesserung der intermuskulären Koordination (erhöhte synergistische Aktivität und reduzierte antagonistische Aktivität) wesentlich zur schnelleren Kraftentwicklung nach Gleichgewichtstraining beim älteren Menschen beiträgt.

Weitere grundlagenorientierte Untersuchungen sind jedoch notwendig, um die exakten neuronalen Anpassungsmechanismen an das Gleichgewichtstraining im Alter herauszufinden.

1.10. Schlußbetrachtung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die rege Forschungstätigkeit der letzten Jahre neue Erkenntnisse zu den neuromuskulären Mechanismen, welche ursächlich für den Kraftverlust und die Defizite in der posturalen Kontrolle im Alter verantwortlich sind, geliefert hat. In diesem Zusammenhang gibt es Hinweise, dass die numerische Reduktion der Satellitenzellen für die Sarkopenie verantwortlich ist und eine Desensibilisierung von Muskelspindeln für Einschränkungen der Haltungskontrolle. Der Einsatz von gezieltem Krafttraining bewirkt einen Zuwachs der Anzahl an Satellitenzellen, wodurch auch in der Muskulatur des älteren

Menschen Hypertrophie induziert werden kann. Gleichgewichtstraining scheint die Wahrnehmungssensibilität von Muskelspindeln zu erhöhen. Hierdurch könnte sich die Übertragungsrate neurologischer Signale auf die Motoneurone erhöhen, was wiederum eine verstärkte reflektorische Ansteuerung der Muskulatur in sturzgefährdeten Situationen zur Folge hätte. Kraft- und Gleichgewichtstraining haben daher das Potenzial, biologische Alterungsprozesse zu verlangsamen und diesen entgegenzuwirken. Interessanterweise entwickelte sich während der letzten Jahre in der Forschung eine neue Tendenz zu spezifisch zugeschnittenen Trainingsprogrammen mit älteren Menschen. Um den Auswirkungen des Alterns erfolgreich entgegenwirken zu können und um Stürzen effektiv vorzubeugen, sollten daher Maximal- mit Schnellkrafttraining und Gleichgewichts- mit Perturbationstraining kombiniert werden. Die Umsetzung dieser Hinweise in die Trainingspraxis könnte einen großen Beitrag zur Aufrechterhaltung der Lebensqualität und der Autonomie älterer Menschen leisten. Weitere Studien sind jedoch erforderlich, welche die Effekte dieser spezifischen Trainingsmaßnahmen auf das neuromuskuläre System und die Sturzhäufigkeit älterer Menschen überprüfen.

Literatur

- (1) Eisenmenger, M.; Pöttsch, O.; Sommer, B. (2006). 11. koordinierte Bevölkerungsvoraberechnung: Annahmen und Ergebnisse. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2006.
- (2) Rubenstein, L.Z. (2006). Falls in older people: epidemiology, risk factors and strategies for prevention. *Age and ageing*, 35(2); ii37-ii41.
- (3) Granacher, U.; Zahner, L.; Gollhofer, A. (2008). Strength, power, and postural control in seniors: considerations for functional adaptations and for fall prevention. *European Journal of Sport Science*, 8(6), 325–340.
- (4) Pijnappels, M.; van der Burg, P.J.; Reeves, N.D.; van Dieen, J.H. (2008). Identification of elderly fallers by muscle strength measures. *European journal of applied physiology*, 102(5), 585–592.
- (5) Era, P.; Sainio, P.; Koskinen, S.; Haavisto, P.; Vaara, M.; Aromaa, A. (2006). Postural balance in a random sample of 7,979 subjects aged 30 years and over. *Gerontology*, 52(4), 204–213.
- (6) Hausdorff, J.M.; Rios, D.A.; Edelberg, H.K. (2001). Gait variability and fall risk in community-living older adults: a 1-year prospective study. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 82(8), 1050–1056.
- (7) Vandervoort, A.A. (2002). Aging of the human neuromuscular system. *Muscle & nerve*, 25(1), 17–25.
- (8) Macaluso, A.; De Vito, G. (2004). Muscle strength, power and adaptations to resistance training in older people. *European journal of applied physiology*, 91(4), 450–472.
- (9) Steadman, J.; Donaldson, N.; Kalra, L. (2003). A randomized controlled trial of an enhanced balance training program to improve mobility and reduce falls in elderly patients. *J Am Geriatr Soc*, 51(6), 847–852.
- (10) Granacher, U.; Gollhofer, A.; Strass, D. (2006). Training induced adaptations in characteristics of postural reflexes in elderly men. *Gait & Posture*, 24(4), 459–466.
- (11) Skelton, D.A.; Greig, C.A.; Davies, J.M.; Young, A. (1994). Strength, power and related functional ability of healthy people aged 65–89 years. *Age and ageing*, 23(5), 371–377.
- (12) Metter, E.J.; Lynch, N.; Conwit, R.; Lindle, R.; Tobin, J.; Hurley, B. (1999). Muscle quality and age: cross-sectional and longitudinal comparisons. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 54(5), B207-B218.
- (13) Akima, H.; Kano, Y.; Enomoto, Y.; Ishizu, M.; Okada, M.; Oishi, Y.; et al. (2001). Muscle function in 164 men and women aged 20–84 yr. *Med Sci Sports Exerc*, 33(2), 220–226.
- (14) Lynch, N.A.; Metter, E.J.; Lindle, R.S.; Fozard, J.L.; Tobin, J.D.; Roy, T.A.; et al. (1999). Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. *J Appl Physiol*, 86(1), 188–194.
- (15) McNeil, C.J.; Vandervoort, A.A.; Rice, C.L. (2007). Peripheral impairments cause a progressive age-related loss of strength and velocity-dependent power in the dorsiflexors. *Journal of applied physiology*, 102(5), 1962–1968.
- (16) Muller, F.; Dehail, P.; Bestaven, E.; Petit, J.; Joseph, P.A.; Barat, M.; et al. (2007). Maximal and sustained isokinetic lower-limb muscle strength in hospitalized older people. *Muscle & nerve*, 35(6), 739–744.
- (17) Klitgaard, H.; Mantoni, M.; Schiaffino, S.; Ausoni, S.; Gorza, L.; Laurent-Winter, C.; et al. (1990). Function, morphology and protein expression of ageing skeletal muscle: a cross-sectional study of elderly men with different training backgrounds. *Acta physiologica Scandinavica*, 140(1), 41–54.
- (18) Frontera, W.R.; Hughes, V.A.; Lutz, K.J.; Evans, W.J. (1991). A cross-sectional study of muscle strength and mass in 45- to 78-yr-old men and women. *J Appl Physiol*, 71(2), 644–650.
- (19) Larsson, L.; Grimby, G.; Karlsson, J. (1979). Muscle strength and speed of movement in relation to age and muscle morphology. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 46(3), 451–456.
- (20) Bosco, C.; Komi, P.V. (1980). Influence of aging on the mechanical behavior of leg extensor muscles. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 45(2–3), 209–219.
- (21) Vandervoort, A.A.; McComas, A.J. (1986). Contractile changes in opposing muscles of the human ankle joint with aging. *J Appl Physiol*, 61(1), 361–367.
- (22) Häkkinen, K.; Häkkinen, A. (1995). Neuromuscular adaptations during intensive strength training in middle-aged and elderly males and females. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 35, 137–147.
- (23) Bean, J.F.; Kiely, D.K.; Herman, S.; Leveille, S.G.; Mizer, K.; Frontera, W.R.; et al. (2002). The relationship between leg power and physical performance in mobility-limited older people. *J Am Geriatr Soc*, 50(3), 461–467.
- (24) Puthoff, M.L.; Nielsen, D.H. (2007). Relationships among impairments in lower-extremity strength and power, functional limitations, and disability in older adults. *Physical therapy*, 87(10), 1334–1347.
- (25) Manini, T.M.; Visser, M.; Won-Park, S.; Patel, K.V.; Strotmeyer, E.S.; Chen, H.; et al. (2007). Knee extension strength cutpoints for maintaining mobility. *J Am Geriatr Soc*, 55(3), 451–457.
- (26) Izquierdo, M.; Aguado, X.; Gonzalez, R.; Lopez, J.L.; Häkkinen, K. (1999). Maximal and explosive force production capacity and balance performance in men of different ages. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 79(3), 260–267.
- (27) Skelton, D.A.; Kennedy, J.; Rutherford, O.M. (2002). Explosive power and asymmetry in leg muscle function in frequent fallers and non-fallers aged over 65. *Age and ageing*, 31(2), 119–125.
- (28) Portegijs, E.; Sipila, S.; Pajala, S.; Lamb, S.E.; Alen, M.; Kaprio, J.; et al. (2006). Asymmetrical lower extremity power deficit as a risk factor for injurious falls in healthy older women. *J Am Geriatr Soc*, 54(3), 551–553.
- (29) Kirkendall, D.T.; Garrett, W.E. (1998). The effects of aging and training on skeletal muscle. *The American journal of sports medicine*, 26(4), 598–602.
- (30) Roubenoff, R. (2000). Sarcopenia and its implications for the elderly. *Eur J Clin Nutr*, 54(3), S40-S47.
- (31) Lexell, J.; Taylor, C.C.; Sjostrom, M. (1988). What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. *J Neurol Sci*, 84(2–3), 275–294.
- (32) Janssen, I.; Heymsfield, S.B.; Wang, Z.M.; Ross, R. (2000). Skeletal muscle mass and distribution in 468 men and women aged 18–88 yr. *J Appl Physiol*, 89(1), 81–88.
- (33) Faulkner, J.A.; Larkin, L.M.; Clafflin, D.R.; Brooks, S.V. (2007). Age-related changes in the structure and function of skeletal muscles. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 34(11), 1091–1096.
- (34) Narici, M.V.; Maganaris, C.N.; Reeves, N.D.; Capodaglio, P. (2003). Effect of aging on human muscle architecture. *J Appl Physiol*, 95(6), 2229–2234.
- (35) Lexell, J.; Taylor, C.C. (1991). Variability in muscle fibre areas in whole human quadriceps muscle: effects of increasing age. *J Anat*, 174, 239–249.
- (36) Edstrom, E.; Ulfhake, B. (2005). Sarcopenia is not due to lack of regenerative drive in senescent skeletal muscle. *Aging Cell*, 4(2), 65–77.
- (37) Renault, V.; Thornell, L.E.; Eriksson, P.O.; Butler-Browne, G.; Mouly, V. (2002). Regenerative potential of human skeletal muscle during aging. *Aging Cell*, 1(2), 132–139.
- (38) Alway, S.E.; Siu, P.M. (2008). Nuclear Apoptosis Contributes to Sarcopenia. *Exerc Sport Sci Rev*, 36(2), 51–57.
- (39) Coggan, A.R.; Spina, R.J.; King, D.S.; Rogers, M.A.; Brown, M.; Nemeth, P.M.; et al. (1992). Histochemical and enzymatic comparison of the gastrocnemius muscle of young and elderly men and women. *J Gerontol*, 47(3), B71-B76.
- (40) Doherty, T.J. (2003). Invited review: aging and sarcopenia. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 95(4), 1717–1727.
- (41) Terao, S.; Sobue, G.; Hashizume, Y.; Li, M.; Inagaki, T.; Mitsuma, T. (1996). Age-related changes in human spinal ventral horn cells with special reference to the loss of small neurons in the intermediate zone: a quantitative analysis. *Acta Neuropathol (Berl)*, 92(2), 109–114.
- (42) Kawamura, Y.; O'Brien, P.; Okazaki, H.; Dyck, P.J. (1977). Lumbar motoneurons of man II: the number and diameter distribution of large- and intermediate-diameter cytons in

- „motoneuron columns“ of spinal cord of man. *J Neuro-pathol Exp Neurol*, 36(5), 861–870.
- (43) Wang, F.C.; De, P.V.; Delvaide, P.J. (1999). Age-related changes in fastest and slowest conducting axons of thenar motor units. *Muscle & nerve*, 22(8), 1022–1029.
- (44) Rogers, M.A.; Evans, W.J.; Holloszy, J.O. (1993). Changes in skeletal muscle with aging: effects of exercise training. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1993.
- (45) Roos, M.R.; Rice, C.L.; Vandervoort, A.A. (1997). Age-related changes in motor unit function. *Muscle & nerve*, 20(6), 679–690.
- (46) Larsson, L.; Ansved, T.; Edstrom, L.; Gorza, L.; Schiaffino, S. (1991). Effects of age on physiological, immunohistochemical and biochemical properties of fast-twitch single motor units in the rat. *J Physiol*, 443, 257–275.
- (47) Galganski, M.E.; Fuglevand, A.J.; Enoka, R.M. (1993). Reduced control of motor output in a human hand muscle of elderly subjects during submaximal contractions. *J Neurophysiol*, 69(6), 2108–2115.
- (48) Edstrom, E.; Altun, M.; Bergman, E.; Johnson, H.; Kullberg, S.; Ramirez-Leon, V.; et al. (2007). Factors contributing to neuromuscular impairment and sarcopenia during aging. *Physiol Behav*, 92(1–2), 129–135.
- (49) Ulfhake, B.; Bergman, E.; Edstrom, E.; Fundin, B.T.; Johnson, H.; Kullberg, S.; et al. (2000). Regulation of neurotrophin signaling in aging sensory and motoneurons: dissipation of target support? *Mol Neurobiol*, 21(3), 109–135.
- (50) Carlson, B.M.; Faulkner, J.A. (1998). Muscle regeneration in young and old rats: effects of motor nerve transection with and without marcamine treatment. *The journals of gerontology*, 53(1), B52–B57.
- (51) Macaluso, A.; Nimmo, M.A.; Foster, J.E.; Cockburn, M.; McMillan, N.C.; De Vito, G. (2002). Contractile muscle volume and agonist-antagonist coactivation account for differences in torque between young and older women. *Muscle & nerve*, 25(6), 858–863.
- (52) Kamen, G.; Sison, S.V.; Du, C.C.; Patten, C. (1995). Motor unit discharge behavior in older adults during maximal-effort contractions. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 79(6), 1908–1913.
- (53) Shumway-Cook, A.; Woollacott, M. (2001). *Motor Control: Theory and practical applications*. Philadelphia: Lippincott, Williams & Wilkins.
- (54) Lajoie, Y.; Teasdale, N.; Bard, C.; Fleury, M. (1993). Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental brain research*, 97(1), 139–144.
- (55) Minetti, A.E. (2000). The three modes of terrestrial locomotion. In: Nigg B.M.; MacIntosh B.R.; Messter, J. (Hrsg.). *Biomechanics and Biology of Movement*. Champaign: Human Kinetics, 67–78.
- (56) Cumberworth, V.L.; Patel, N.N.; Rogers, W.; Kenyon, G.S. (2007). The maturation of balance in children. *J Laryngol Otol*, 121(5), 449–454.
- (57) Hytonen, M.; Pyykko, I.; Aalto, H.; Starck, J. (1993). Postural control and age. *Acta Otolaryngol*, 113(2), 119–122.
- (58) Guimaraes, R.M.; Isaacs, B. (1980). Characteristics of the gait in old people who fall. *Int Rehabil Med*, 2(4), 177–180.
- (59) Lin, S.I.; Woollacott, M.H. (2002). Postural muscle responses following changing balance threats in young, stable older, and unstable older adults. *Journal of motor behavior*, 34(1), 37–44.
- (60) Tang, P.F.; Woollacott, M.H. (1998). Inefficient postural responses to unexpected slips during walking in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 53(6), M471–M480.
- (61) Granacher, U.; Strass, D.; Gollhofer, A. (2008). Effect of aging on power output and functional reflex activity. *Med Sci Sports Exerc*, 40(5), 87–88.
- (62) Pavol, M.J.; Owings, T.M.; Foley, K.T.; Grabiner, M.D. (2001). Mechanisms leading to a fall from an induced trip in healthy older adults. *The journals of gerontology*, 56(7), M428–M437.
- (63) Fernie, G.R.; Gryfe, C.I.; Holliday, P.J.; Llewellyn, A. (1982). The relationship of postural sway in standing to the incidence of falls in geriatric subjects. *Age and ageing*, 11(1), 11–16.
- (64) Horak, F.B.; Macpherson, J.M. (1996). Postural orientation and equilibrium. In: Rowell, L.B.; Shepherd, J.T. (Hrsg.). *Handbook of Physiology*, Section 12. New York: Oxford University Press, 255–292.
- (65) Woollacott, M.; Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait Posture*, 16(1), 1–14.
- (66) Lephart, S.M.; Fu, F.H. (2000). Proprioception and neuromuscular control in joint stability. Champaign: Human Kinetics.
- (67) Granacher, U.; Gollhofer, A. (2009). Grundlagen der Bewegungskontrolle und deren funktionelle Bedeutung. *Medizinische Orthopädieschuhtechnik - Zeitschrift für Prävention und Rehabilitation*, Sonderheft, 6–11.
- (68) Goldberg, M.E.; Hudspeth, A.J. (2000). The vestibular system. In: Kandel, E.R.; Schwartz, J.H.; Jessell, T.M. (Hrsg.). *Principles of neural science*. New York: McGraw Hill, 801–815.
- (69) Johansson, H.; Pedersen, J.; Bergenheim, M.; Djupsjöbacka, M. (2000). Peripheral afferents of the knee: their effects on central mechanisms regulating muscle stiffness, joint stability, and proprioception and coordination. In: Lephart, S.M.; Fu, F.H. (Hrsg.). *Proprioception and neuromuscular control in joint stability*. Champaign: Human Kinetics, 5–22.
- (70) ten Bruggencate, G.; Deetjen, P.; Speckmann, E.J. (1999). *Sensorisches System*. Physiologie. München: Urban & Fischer, 47–82.
- (71) Lord, S.R.; Clark, R.D.; Webster, I.W. (1991). Postural stability and associated physiological factors in a population of aged persons. *J Gerontol*, 46(3), M69–M76.
- (72) Bruhn, S.; Gollhofer, A. (2001). *Neurophysiologische Grundlagen der Propriozeption und Sensorimotorik*. *Med Orth Tech*, 121, 66–71.
- (73) Grey, M.J.; Ladouceur, M.; Andersen, J.B.; Nielsen, J.B.; Sinkjaer, T. (2001). Group II muscle afferents probably contribute to the medium latency soleus stretch reflex during walking in humans. *J Physiol*, 534(3), 925–933.
- (74) Riemann, B.L.; Lephart, S.M. (2002). The sensorimotor system, Part II: the role of proprioception in motor control and functional joint stability. *J Athl Train*, 37(1), 80–84.
- (75) Diener, H.C.; Dichgans, J.; Guschlbauer, B.; Mau H. (1984). The significance of proprioception on postural stabilization as assessed by ischemia. *Brain Res*, 296(1), 103–109.
- (76) Magnusson, M.; Enbom, H.; Johansson, R.; Wiklund, J. (1990). Significance of pressor input from the human feet in lateral postural control. The effect of hypothermia on galvanically induced body-sway. *Acta Otolaryngol*, 110(5–6), 321–327.
- (77) Magnusson, M.; Enbom, H.; Johansson, R.; Pyykko, I. (1990). Significance of pressor input from the human feet in anterior-posterior postural control. The effect of hypothermia on vibration-induced body-sway. *Acta Otolaryngol*, 110(3–4), 182–188.
- (78) Kennedy, P.M.; Inglis, J.T. (2002). Distribution and behaviour of glabrous cutaneous receptors in the human foot sole. *The Journal of Physiology*, 538(3), 995–1002.
- (79) Inglis, J.T.; Kennedy, P.M.; Wells, C.; Chua, R. (2002). The role of cutaneous receptors in the foot. *Adv Exp Med Biol*, 508, 111–117.
- (80) Mion, L.C.; Gregor, S.; Buettner, M.; Chwirchak, D.; Lee, O.; Paras, W. (1989). Falls in the rehabilitation setting: incidence and characteristics. *Rehabil Nurs*, 14(1), 17–22.
- (81) Marchetti, G.F.; Whitney, S.L. (2005). Older adults and balance dysfunction. *Neurol Clin*, 23(3), 785–805.
- (82) Shaffer, S.W.; Harrison, A.L. (2007). Aging of the somatosensory system: a translational perspective. *Physical therapy*, 87(2), 193–207.
- (83) Swash, M.; Fox, K.P. (1972). The effect of age on human skeletal muscle. *Studies of the morphology and innervation of muscle spindles*. *J Neurol Sci*, 16(4), 417–432.
- (84) Mynark, R.G.; Kocaja, D.M. (2001). Effects of age on the spinal stretch reflex. *Journal of Applied Biomechanics*, 17, 188–203.
- (85) Miwa, T.; Miwa, Y.; Kanda, K. (1995). Dynamic and static sensitivities of muscle spindle primary endings in aged rats to ramp stretch. *Neurosci Lett*, 201(2), 179–182.
- (86) Corden, D.M.; Lippold, O.C. (1996). Age-related impaired reflex sensitivity in a human hand muscle. *J Neurophysiol*, 76(4), 2701–2706.

- (87) Liu, J.X.; Eriksson, P.O.; Thornell, L.E.; Pedrosa-Domellof, F. (2005). Fiber content and myosin heavy chain composition of muscle spindles in aged human biceps brachii. *J Histochem Cytochem*, 53(4), 445–454.
- (88) Morisawa, Y. (1998). Morphological study of mechanoreceptors on the coracocrumial ligament. *J Orthop Sci*, 3(2), 102–110.
- (89) Scaglioni, G.; Narici, M.V.; Maffiuletti, N.A.; Pensini, M.; Martin, A. (2003). Effect of ageing on the electrical and mechanical properties of human soleus motor units activated by the H reflex and M wave. *J Physiol*, 548(2), 649–661.
- (90) Maisonobe, T.; Hauw, J.J.; Dani, S.U.; Hori, A.; Walter, G.F. (1997). Changes in the peripheral nervous system. In: Dani, S.U.; Hori, A.; Walter, G.F. (Hrsg.). *Principles of neural aging*. Amsterdam: Elsevier, 304–316.
- (91) Earles, D.; Vardaxis, V.; Kocejka, D. (2001). Regulation of motor output between young and elderly subjects. *Clin Neurophysiol*, 112(7), 1273–1279.
- (92) McNeil, C.J.; Doherty, T.J.; Stashuk, D.W.; Rice, C.L. (2005). Motor unit number estimates in the tibialis anterior muscle of young, old, and very old men. *Muscle & nerve*, 31(4), 461–467.
- (93) Tinetti, M.E.; Speechley, M.; Ginter, S.F. (1988). Risk factors for falls among elderly persons living in the community. *N Engl J Med*, 319(26), 1701–1707.
- (94) Williams, H.G.; Burke, J.R.; McClenaghan, B.A.; Hirth, V.; Huber, G. (1997). Balance control: mechanisms of adaptation to sensorymotor integration training in the elderly. *Proceedings of the IV International Conference on Physical Activity and Aging*. Heidelberg: Health Promotion Publications, 118–130.
- (95) Granacher, U.; Gollhofer, A. (2007). Die Auswirkungen von sensorimotorischem Training im Alter unter besonderer Berücksichtigung alltagsmotorischer Aufgaben. *Orthopädie-schuhtechnik - Zeitschrift für Prävention und Rehabilitation*, 1, 36–43.
- (96) Granacher, U.; Gruber, M.; Strass, D.; Gollhofer, A. (2007). The impact of sensorimotor training in elderly men on maximal and explosive force production capacity. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 58(12), 446–451.
- (97) Granacher, U.; Gruber, M.; Gollhofer, A. (2009). Resistance training and neuromuscular performance in seniors. *International journal of sports medicine*, 30(9), 652–657.
- (98) Brochu, M.; Savage, P.; Lee, M.; Dee, J.; Cress, M.E.; Poehlman, E.T.; et al. (2002). Effects of resistance training on physical function in older disabled women with coronary heart disease. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 92(2), 672–678.
- (99) Izquierdo, M.; Häkkinen, K.; Ibanez, J.; Anton, A.; Garrues, M.; Ruesta, M.; et al. (2003). Effects of strength training on submaximal and maximal endurance performance capacity in middle-aged and older men. *J Strength Cond Res*, 17(1), 129–139.
- (100) Holviala, J.H.; Sallinen, J.M.; Kraemer, W.J.; Alen, M.J.; Häkkinen, K.K. (2006). Effects of strength training on muscle strength characteristics, functional capabilities, and balance in middle-aged and older women. *Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association*, 20(2), 336–344.
- (101) Newton, R.U.; Häkkinen, K.; Häkkinen, A.; McCormick, M.; Volek, J.; Kraemer, W.J. (2002). Mixed-methods resistance training increases power and strength of young and older men. *Med Sci Sports Exerc*, 34(8), 1367–1375.
- (102) Suetta, C.; Magnusson, S.P.; Beyrer, N.; Kjaer, M. (2007). Effect of strength training on muscle function in elderly hospitalized patients. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 17(5), 464–472.
- (103) Miszko, T.A.; Cress, M.E.; Slade, J.M.; Covey, C.J.; Agrawal, S.K.; Doerr, C.E. (2003). Effect of strength and power training on physical function in community-dwelling older adults. *The journals of gerontology*, 58(2), 171–175.
- (104) Bottaro, M.; Machado, S.N.; Nogueira, W.; Scales, R.; Veloso, J. (2007). Effect of high versus low-velocity resistance training on muscular fitness and functional performance in older men. *European journal of applied physiology*, 99(3), 257–264.
- (105) Hazell, T.; Kenno, K.; Jakobi, J. (2007). Functional benefit of power training for older adults. *J Aging Phys Act*, 15(3), 349–359.
- (106) Sayers, S.P. (2007). High-speed power training: a novel approach to resistance training in older men and women. A brief review and pilot study. *Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association*, 21(2), 518–526.
- (107) Smith, K.; Winegard, K.; Hicks, A.L.; McCartney, N. (2003). Two years of resistance training in older men and women: the effects of three years of detraining on the retention of dynamic strength. *Can J Appl Physiol*, 28(3), 462–474.
- (108) Latham, N.K.; Bennett, D.A.; Stretton, C.M.; Anderson, C.S. (2004). Systematic review of progressive resistance strength training in older adults. *The journals of gerontology*, 59(1), 48–61.
- (109) Fiatarone, M.A.; O'Neill, E.F.; Ryan, N.D.; Clements, K.M.; Solares, G.R.; Nelson M.E.; et al. (1994). Exercise training and nutritional supplementation for physical frailty in very elderly people. *N Engl J Med*, 330(25), 1769–1775.
- (110) Schlicht, J.; Camaione, D.N.; Owen, S.V. (2001). Effect of intense strength training on standing balance, walking speed, and sit-to-stand performance in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 56(5), M281–M286.
- (111) Hruda, K.V.; Hicks, A.L.; McCartney, N. (2003). Training for muscle power in older adults: effects on functional abilities. *Can J Appl Physiol*, 28(2), 178–189.
- (112) Bortz, J. (1999). *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer Verlag.
- (113) Moore, J.B.; Korff, T.; Kinzey, S.J. (2005). Acute effects of a single bout of resistance exercise on postural control in elderly persons. *Percept Mot Skills*, 100(3), 725–733.
- (114) Sale, D.G. (2003). Neural adaptation to strength training. In: Komi P.V. (Hrsg.). *Strength and Power in Sport*. Oxford: Blackwell Publishing, 281–314.
- (115) Häkkinen, K. (2003). Ageing and neuromuscular adaptation to strength training. In: Komi P.V. (Hrsg.). *Strength and Power in Sport*. Oxford: Blackwell Publishing, 409–425.
- (116) Ferri, A.; Scaglioni, G.; Pousson, M.; Capodaglio, P.; Van Hoecke, J.; Narici, M.V. (2003). Strength and power changes of the human plantar flexors and knee extensors in response to resistance training in old age. *Acta Physiol Scand*, 177(1), 69–78.
- (117) Trappe, S.; Williamson, D.; Godard, M.; Porter, D.; Rowden, G.; Costill, D. (2000). Effect of resistance training on single muscle fiber contractile function in older men. *Journal of applied physiology: respiratory, environmental and exercise physiology*, 89(1), 143–152.
- (118) Widrick, J.J.; Stelzer, J.E.; Shoenke, T.C.; Garner, D.P. (2002). Functional properties of human muscle fibers after short-term resistance exercise training. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 283(2), R408–R416.
- (119) Häkkinen, K.; Newton, R.U.; Gordon, S.E.; McCormick, M.; Volek, J.S.; Nindl, B.C.; et al. (1998). Changes in muscle morphology, electromyographic activity, and force production characteristics during progressive strength training in young and older men. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 53(6), B415–B423.
- (120) Sharman, M.J.; Newton, R.U.; Triplett-McBride, T.; McGuigan, M.R.; McBride, J.M.; Häkkinen, A.; et al. (2001). Changes in myosin heavy chain composition with heavy resistance training in 60- to 75-year-old men and women. *Eur J Appl Physiol*, 84(1–2), 127–132.
- (121) Goldspeek, G.; Harridge, S. (2003). Cellular and molecular aspects of adaptation in skeletal muscle. In: Komi P.V. (Hrsg.). *Strength and Power in Sport*. Oxford: Blackwell Publishing, 231–251.
- (122) Crameri, R.M.; Langberg, H.; Magnusson, P.; Jensen, C.H.; Schroder, H.D.; Olesen, J.L.; et al. (2004). Changes in satellite cells in human skeletal muscle after a single bout of high intensity exercise. *The Journal of physiology*, 558(1), 333–340.
- (123) Kadi, F.; Schjerling, P.; Andersen, L.L.; Charifi, N.; Madsen, J.L.; Christensen, L.R.; et al. (2004). The effects of heavy resistance training and detraining on satellite cells in human skeletal muscles. *The Journal of physiology*, 558(3), 1005–1012.

- (124) Kadi, F.; Thornell, L.E. (2000). Concomitant increases in myonuclear and satellite cell content in female trapezius muscle following strength training. *Histochem Cell Biol*, 113(2), 99–103.
- (125) Wulker, N.; Rudert, M. (1999). Lateral ankle ligament rupture. When is surgical management indicated and when conservative therapy preferred? *Der Orthopäde*, 28(6), 476–482.
- (126) Chong, R.K.; Ambrose, A.; Carzoli, J.; Hardison, L.; Jacobson, B. (2001). Source of improvement in balance control after a training program for ankle proprioception. *Percept Mot Skills*, 92(1), 265–272.
- (127) Gruber, M.; Gollhofer, A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *European journal of applied physiology*, 92(1–2), 98–105.
- (128) Banaschewski, T.; Besmens, F.; Zieger, H.; Rothenberger, A. (2001). Evaluation of sensorimotor training in children with ADHD. *Percept Mot Skills*, 92(1), 137–149.
- (129) Paterno, M.V.; Myer, G.D.; Ford, K.R.; Hewett, T.E. (2004). Neuromuscular training improves single-limb stability in young female athletes. *J Orthop Sports Phys Ther*, 34(6), 305–316.
- (130) Bernier, J.N.; Perrin, D.H. (1998). Effect of coordination training on proprioception of the functionally unstable ankle. *J Orthop Sports Phys Ther*, 27(4), 264–275.
- (131) Heitkamp, H.C.; Horstmann, T.; Mayer, F.; Weller, J.; Dickhuth, H.H. (2001). Gain in strength and muscular balance after balance training. *Int J Sports Med*, 22(4), 285–290.
- (132) Ashton-Miller, J.A.; Wojtyś, E.M.; Huston, L.J.; Fry-Welch, D. (2001). Can proprioception really be improved by exercises? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 9(3), 128–136.
- (133) Taube, W.; Gruber, M.; Gollhofer, A. (2008). Spinal and supraspinal adaptations associated with balance training and their functional relevance. *Acta Physiologica (Oxf)*, 193(2), 101–116.
- (134) Silsupadol, P.; Shumway-Cook, A.; Lugade, V.; van Donkelaar, P.; Chou, L.S.; Mayr, U.; et al. (2009). Effects of single-task versus dual-task training on balance performance in older adults: a double-blind, randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil*, 90(3), 381–387.
- (135) Granacher, U.; Gruber, M.; Gollhofer, A. (2009). The impact of sensorimotor training on postural control in elderly men. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 60(12), 16–22.
- (136) Hu, M.H.; Woollacott, M.H. (1994). Multisensory training of standing balance in older adults: II. Kinematic and electromyographic postural responses. *J Gerontol*, 49(2), M62–M71.
- (137) Mynark, R.G.; Koceja, D.M. (2002). Down training of the elderly soleus H reflex with the use of a spinally induced balance perturbation. *J Appl Physiol*, 93(1), 127–133.
- (138) Maki, B.E.; McLroy, W.E. (2005). Change-in-support balance reactions in older persons: an emerging research area of clinical importance. *Neurol Clin*, 23(3), 751–vii.
- (139) Maki, B.E.; McLroy, W.E. (1997). The role of limb movements in maintaining upright stance: the „change-in-support“ strategy. *Physical therapy*, 77(5), 488–507.
- (140) Maki, B.E.; Cheng, K.C.; Mansfield, A.; Scovil, C.Y.; Perry, S.D.; Peters, A.L.; et al. (2008). Preventing falls in older adults: new interventions to promote more effective change-in-support balance reactions. *J Electromyogr Kinesiol*, 18(2), 243–254.
- (141) Sakai, M.; Shiba, Y.; Sato, H.; Takahira, N. (2008). Motor adaptations during slip-perturbed gait in older adults. *Journal of Physical Therapy Science*, 20, 109–115.
- (142) Güllich, A.; Schmidtbleicher, D. (1999). Struktur der Kraftfähigkeiten und ihrer Trainingsmethoden. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 7/8, 223–234.
- (143) Chodzko-Zajko, W.J.; Proctor, D.N.; Fiatarone Singh, M.A.; Minson, C.T.; Nigg, C.R.; Salem G.J.; et al. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults. *Medicine and science in sports and exercise*, 41(7), 1510–1530.
- (144) Granacher, U.; Bergmann, S.; Gollhofer, A. (2007). Allgemeine Richtlinien für den Einsatz von sensomotorischem Training im Schulsport. *Sportunterricht*, 9, 259–265.
- (145) Taube, W.; Gruber, M.; Beck, S.; Faist, M.; Gollhofer, A.; Schubert, M. (2007). Cortical and spinal adaptations induced by balance training: correlation between stance stability and corticospinal activation. *Acta Physiologica (Oxf)*, 189(4), 347–358.
- (146) Gruber, M.; Gruber, S.B.; Taube, W.; Schubert, M.; Beck, S.C.; Gollhofer, A. (2007). Differential effects of ballistic versus sensorimotor training on rate of force development and neural activation in humans. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(1), 274–282.
- (147) Meunier, S.; Pierrot-Deseilligny, E. (1989). Gating of the afferent volley of the monosynaptic stretch reflex during movement in man. *J Physiol*, 419, 753–763.
- (148) Macefield, V.G.; Gandevia, S.C.; Bigland-Ritchie, B.; Gorman, R.B.; Burke, D. (1993). The firing rates of human motoneurons voluntarily activated in the absence of muscle afferent feedback. *J Physiol*, 471, 429–443.
- (149) Granacher, U.; Gollhofer, A. (2005). The impact of aging on explosive force production and on postural reflexes. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 56(3), 68–72.
- (150) Fiatarone, M.A.; Marks, E.C.; Ryan, N.D.; Meredith, C.N.; Lipsitz, L.A.; Evans, W.J. (1990). High-intensity strength training in nonagenarians. Effects on skeletal muscle. *Jama*, 263(22), 3029–3034.
- (151) Grimby, G.; Aniansson, A.; Hedberg, M.; Henning, G.B.; Grangard, U.; Kvist, H. (1992). Training can improve muscle strength and endurance in 78- to 84-year-old men. *J Appl Physiol*, 73(6), 2517–2523.
- (152) Lexell, J.; Downham, D.Y.; Larsson, Y.; Bruhn, E.; Morsing, B. (1995). Heavy-resistance training in older Scandinavian men and women: short- and long-term effects on arm and leg muscles. *Scand J Med Sci Sports*, 5(6), 329–341.
- (153) Häkkinen, K.; Kallinen, M.; Izquierdo, M.; Jokelainen, K.; Lassila, H.; Malkia E.; et al. (1998). Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol*, 84(4), 1341–1349.
- (154) Harridge, S.D.; Kryger, A.; Stensgaard, A. (1999). Knee extensor strength, activation, and size in very elderly people following strength training. *Muscle & nerve*, 22(7), 831–839.
- (155) Yarasheski, K.E.; Pak-Loduca, J.; Hatten, D.L.; Obert, K.A.; Brown, M.B.; Sinacore, D.R. (1999). Resistance exercise training increases mixed muscle protein synthesis rate in frail women and men >=76 yr old. *Am J Physiol*, 277(1.1), E118-E125.
- (156) Häkkinen, K.; Alen, M.; Kallinen, M.; Newton, R.U.; Kraemer, W.J. (2000). Neuromuscular adaptation during prolonged strength training, detraining and re-strength-training in middle-aged and elderly people. *Eur J Appl Physiol*, 83(1), 51–62.
- (157) Fielding, R.A.; LeBrasseur, N.K.; Cuoco, A.; Bean, J.; Mizer, K.; Fiatarone Singh, M.A. (2002). High-velocity resistance training increases skeletal muscle peak power in older women. *J Am Geriatr Soc*, 50(4), 655–662.
- (158) Scaglioni, G.; Ferri, A.; Minetti, A.E.; Martin, A.; Van Hoescke, J.; Capodaglio, P.; et al. (2002). Plantar flexor activation capacity and H reflex in older adults: adaptations to strength training. *J Appl Physiol*, 92(6), 2292–2302.
- (159) Granacher, U.; Strass, D.; Gollhofer, A. (2004). Maximal and Explosive Force Production Capacity in Elderly Men: Implications for Exercise. *Isokinetics and Exercise Science*, 12(1), 43–44.
- (160) Caserotti, P.; Aagaard, P.; Buttputr, L.J.; Puggaard, L. (2008). Explosive heavy-resistance training in old and very old adults: changes in rapid muscle force, strength and power. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 2008.
- (161) Baechle, T.R.; Earle, R.W.; Wathen, D. (2000). Resistance training. In: Baechle, T.R.; Earle, R.W. (Hrsg.). *Essentials of strength training and conditioning*. Champaign: Human Kinetics, 395–425.
- (162) Faigenbaum, A.D.; Westcott, W.L.; Loud, R.L.; Long, C. (1999). The effects of different resistance training protocols on muscular strength and endurance development in children. *Pediatrics*, 104(1), e5.
- (163) Faigenbaum, A.D.; Milliken, L.A.; Cloutier, G.; Westcott, W.L. (2004). Perceived exertion during resistance exercise by children. *Percept Mot Skills*, 98(2), 627–637.

- (164) Judge, J.O.; Lindsey, C.; Underwood, M.; Winsemius, D. (1993). Balance improvements in older women: effects of exercise training. *Phys Ther*, 73(4), 254–262.
- (165) Wolfson, L.; Whipple, R.; Derby, C.; Judge, J.; King, M.; Amerman, P.; et al. (1996). Balance and strength training in older adults: intervention gains and Tai Chi maintenance. *J Am Geriatr Soc*, 44(5), 498–506.
- (166) Wolf, S.L.; Barnhart, H.X.; Ellison, G.L.; Coogler, C.E. (1997). The effect of Tai Chi Quan and computerized balance training on postural stability in older subjects. Atlanta FICSIT Group. Frailty and Injuries: Cooperative Studies on Intervention Techniques. *Phys Ther*, 77(4), 371–381.
- (167) Wu, G.; Zhao, F.; Zhou, X.; Wei, L. (2002). Improvement of isokinetic knee extensor strength and reduction of postural sway in the elderly from long-term Tai Chi exercise. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 83(10), 1364–1369.
- (168) Tsang, W.W.; Hui-Chan, C.W. (2004). Effect of 4- and 8-wk intensive Tai Chi Training on balance control in the elderly. *Medicine and science in sports and exercise*, 36(4), 648–657.
- (169) Tsang, W.W.; Hui-Chan, C.W. (2005). Comparison of muscle torque, balance, and confidence in older tai chi and healthy adults. *Medicine and science in sports and exercise*, 37(2), 280–289.
- (170) Gatts, S.K.; Woollacott, M.H. (2006). Neural mechanisms underlying balance improvement with short term Tai Chi training. *Aging Clin Exp Res*, 18(1), 7–19.
- (171) Gatts, S.K.; Woollacott, M.H. (2007). How Tai Chi improves balance: biomechanics of recovery to a walking slip in impaired seniors. *Gait Posture*, 25(2), 205–214.
- (172) Li, Y.; Devault, C.N.; Van Oteghen, S. (2007). Effects of extended Tai Chi intervention on balance and selected motor functions of the elderly. *Am J Chin Med*, 35(3), 383–391.
- (173) Madureira, M.M.; Takayama, L.; Gallinaro, A.L.; Caparbo, V.F.; Costa, R.A.; Pereira, R.M. (2007). Balance training program is highly effective in improving functional status and reducing the risk of falls in elderly women with osteoporosis: a randomized controlled trial. *Osteoporos Int*, 18(4), 419–425.
- (174) Nagy, E.; Feher-Kiss, A.; Barnai, M.; Domjan-Preszner, A.; Angyan, L.; Horvath, G. (2007). Postural control in elderly subjects participating in balance training. *European journal of applied physiology*, 100(1), 97–104.
- (175) Rochat, S.; Martin, E.; Piot-Ziegler, C.; Najafi, B.; Aminian, K.; Bula, C.J. (2008). Falls self-efficacy and gait performance after gait and balance training in older people. *J Am Geriatr Soc*, 56(6), 1154–1156.