

Dosis-Wirkungs-Beziehungen beim Krafttraining im Alter

URS GRANACHER*, RON BORDE*



Urs Granacher



Ron Borde

Das Altern kann als zeitbedingte Modifikation von Struktur und Funktion definiert werden. Strukturelle Veränderungen (z.B. Muskelatrophie, Verlust von Motoneuronen) im neuromuskulären System zeichnen sich insbesondere ab dem 60. Lebensjahr ab. Diese führen zu Funktionseinschränkungen der Kraft, des Gleichgewichts sowie der Mobilität und bedingen damit eine erhöhte Sturzprävalenz. Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels zu einer immer älter werdenden Gesellschaft sind effektive Interventionsmassnahmen notwendig, die den altersbedingten Modifikationen von Struktur und Funktion entgegenwirken. In der Vergangenheit wurde insbesondere Krafttraining als Massnahme zur Verbesserung der Kraft, zum Muskelaufbau sowie zur Prävention und Therapie von Gleichgewichtsdefiziten und Mobilitätseinschränkungen eingesetzt. Die vorliegende narrative Literaturübersicht beschreibt die Effekte unterschiedlicher Krafttrainingsmethoden (z.B. Maximalkraft, Schnellkraft) auf Messgrössen der Kraft, des Muskelquerschnitts, des Gleichgewichts und der Mobilität und leitet daraus Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Trainingspraxis ab. Die Einnahme von Nahrungsergänzungsmitteln (Molkeproteine, Vitamin D) während der Durchführung von Krafttraining wird diskutiert.

Während der letzten drei Jahrzehnte konnte in den westlichen Industrienationen ein demografischer Wandel hin zu einer immer älter werdenden Gesellschaft festgestellt werden. In Europa weisen Deutschland, Italien und Griechenland mit 20,6, 20,3 und 19,3 Prozent den grössten Anteil der über 65-Jährigen an der Gesamtbevölkerung des jeweiligen Landes auf (1). In der Schweiz ist eine ähnliche Tendenz feststellbar: Im Jahr 2010 betrug der Anteil der über 65-Jährigen an der Gesamtbevölkerung 16,9 Prozent. Berechnungen des Schweizerischen Bundesamts für Statistik besagen, dass im Jahr 2060 28 Prozent der Bevölkerung 65 Jahre und älter sein werden (2). Die Überalte-

rung der Gesellschaft stellt eine grosse Herausforderung für die Zukunftsfähigkeit des Gesundheitssystems dar, da die Pro-Kopf-Ausgaben für die medizinische Behandlung älterer Menschen deutlich höher liegen als für Menschen jungen und mittleren Erwachsenenalters (3). Ein bedeutsamer Grund für die ansteigenden finanziellen Belastungen des Gesundheitssystems sind altersbedingte strukturelle Veränderungen im neuromuskulären System, die funktionelle Modifikationen im Sinne von Kraft- und Gleichgewichtsdefiziten sowie Mobilitätseinschränkungen bewirken und damit eine erhöhte Sturzrate verursachen (4, 5). Aus einer epidemiologischen Analyse von Stürzen bei Betagten in Zürich und Genf geht hervor, dass 23,8 Prozent der 65- bis 74-Jährigen einmal pro Jahr stürzen, wobei die Sturzrate bei den Frau-

en (27,7%) höher lag als bei den Männern (18,3%) (6). In der Gruppe der 75- bis 84-Jährigen (Frauen 32,5%, Männer 24,8%) stürzten 29,9 Prozent, bei den über 85-Jährigen (Frauen 36,5%, Männer 38,5%) lag die Sturzrate bei 37,0 Prozent. Rubenstein und Josephson (7) berichten, dass 6 Prozent aller Stürze bei selbstständig lebenden älteren Personen (≥ 60 Jahre) zu Frakturen führen. Oberschenkelhalsfrakturen treten bei zu Hause lebenden älteren Personen in 1 bis 2 Prozent und bei Pflegeheimbewohnern in 12 Prozent aller Ereignisse auf (8, 9). Die Ätiologie von Stürzen ist vielfältig und reicht von extrinsischen (umweltbezogenen) zu intrinsischen (personenbezogenen) Faktoren. In einem systematischen Literaturüberblick fassten Rubenstein und Josephson (7) die wichtigsten Sturzrisikofaktoren aus zwölf epidemiologischen Studien zusammen.

*Universität Potsdam, Humanwissenschaftliche Fakultät, Exzellenzbereich Kognitionswissenschaften, Lehrstuhl für Trainings- und Bewegungswissenschaft.

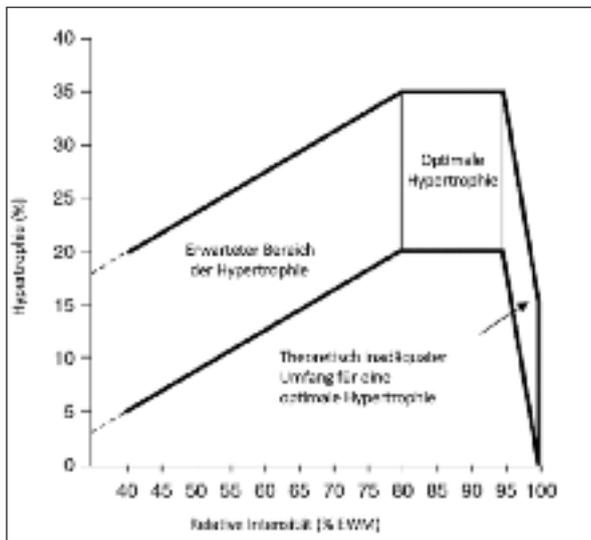


Abbildung 1: Modellhafte Darstellung zum Zusammenhang von Trainingsintensität (% des Einer-Wiederholungs-Maximums) und dem zu erwartenden Ausmass an muskulärer Hypertrophie (in Anlehnung an Fry [37]).



Abbildung 2: Dosis-Wirkungs-Beziehungen von Krafttraining im Alter. EWM = Einer-Wiederholungs-Maximum; *unzureichende Studienlage und damit geringe Evidenz der Dosis-Wirkungs-Beziehung.

Der Analyse ist zu entnehmen, dass die intrinsischen Sturzrisikofaktoren (Gangunsicherheiten, Gleichgewichtsdefizite, nachlassende Muskelkraft) bereits an zweiter Stelle nach den umweltbezogenen Faktoren (z.B. schlechte Lichtverhältnisse, rutschige Oberflächen etc.) genannt werden. Sowohl Gangunsicherheiten als auch Gleichgewichtsdefizite erhöhen das Sturzrisiko um jeweils das Dreifache, die nachlassende Muskelkraft sogar um das Vierfache (7).

Aus unterschiedlichen Studien geht hervor, dass sich die Maximalkraft (höchster willkürlich erzielter Kraftwert) zwischen dem 30. und 80. Lebensjahr in Abhängigkeit verschiedener methodischer Faktoren (z.B. Alter, Trainingszustand, angewandtes Messverfahren etc.) um 20 bis 40 Prozent reduziert (5). Von diesem altersbedingten Krafterückgang (Dynapenie) scheint insbesondere die proximal (Knieextensoren) und distal gelegene (Plantarflexoren) Muskulatur der unteren Extremitäten betroffen zu sein (10). Für den Kraftverlust im Alter ist vor allem die altersbedingte Verringerung der Muskelmasse, die auch als Sarkopenie bezeichnet wird, verantwortlich (11). Die Sarkopenie wird durch (a) eine Reduktion des Querschnitts einzelner Muskelfasern (einfache Atrophie); (b) eine numerische Verringerung der Anzahl von Muskelfasern (numerische Atrophie); (c) eine Kombina-

tion aus einfacher und numerischer Atrophie und (d) Veränderungen der Muskelarchitektur verursacht (5).

Da die Dynapenie um das 2- bis 5-Fache schneller voranschreitet als die Sarkopenie, sind neben der Sarkopenie weitere (neuronale) Faktoren (z.B. Verlust an Motoneuronen) für den Krafterückgang im Alter verantwortlich (12). Interessanterweise konnten Manini und Clark (13) in einer aktuellen Metaanalyse zeigen, dass die Dynapenie stärker mit altersbedingten Mobilitätseinschränkungen assoziiert ist als die Sarkopenie. In einer Studie zur funktionellen Bedeutung der Dynapenie untersuchten Bean und Kollegen (14), ob bei selbstständig lebenden älteren Personen (65–83 Jahre) die Maximalkraft oder die muskuläre Leistung (Produkt aus Kraft x Geschwindigkeit) stärker mit Variablen der funktionellen Mobilität (z.B. habituelle, maximale Gehgeschwindigkeit, Zeit, zehn Treppenstufen zu bewältigen etc.) assoziiert ist. Im Ergebnis zeigte sich, dass die muskuläre Leistung der Beinstrecker im Mittel eine höhere Varianzaufklärung hinsichtlich der funktionellen Mobilität erzielte (muskuläre Leistung 23%; Maximalkraft 19%) als die Maximalkraft. Weiterhin konnte in einer longitudinalen Studie festgestellt werden (15), dass die muskuläre Leistung bei selbstständig lebenden Personen einen signifikanten Prädiktor für Mobilitätseinschränkungen

im Alter (≥ 70 Jahre) darstellt. Vor diesem Hintergrund könnte das gezielte Training der Maximalkraft und insbesondere der muskulären Leistung im Alter zu bedeutsamen Kraftzuwachs und Mobilitätsverbesserungen führen.

In der Vergangenheit wurden viele Studien durchgeführt, die die Wirkungen unterschiedlicher Krafttrainingsmethoden im Alter auf die Kraft und den Muskelquerschnitt eindrücklich belegten (16, 17). Weitestgehend ungeklärt sind jedoch Dosis-Wirkungs-Beziehungen hinsichtlich der spezifischen Trainingsziele (z.B. Kraftzuwachs, Muskelaufbau, Verbesserung der Mobilität etc.), die durch Krafttraining im Alter angesteuert werden sollen.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der vorliegenden narrativen Literaturübersicht darin, anhand ausgewählter Originalarbeiten, systematischer Reviews und Metaanalysen die Wirkungen unterschiedlicher Krafttrainingsmethoden (z.B. Maximalkraft, Schnellkraft) im Alter auf Variablen der Kraft, des Muskelquerschnitts, des Gleichgewichts und der Mobilität darzustellen. Die Einnahme von Nahrungsergänzungsmitteln (Molkeproteine, Vitamin D) während der Durchführung des Krafttrainings wird diskutiert. Evidenzbasierte Dosis-Wirkungs-Beziehungen beim Krafttraining im Alter werden präsentiert, um daraus konkrete Hin-

weise für die Trainingspraxis ableiten zu können.

Krafttraining im Alter

Die effektive Durchführung eines Krafttrainings erfordert zunächst die Festlegung des Trainingsziels (z.B. Muskelwachstum [Hypertrophie]). Um dieses bestmöglich anzu steuern zu können, werden geeignete Trainingsinhalte ausgewählt (z.B. Übungen an Kraftmaschinen für die Muskulatur der unteren Extremitäten). Neben den Trainingsinhalten sind für die zielorientierte Steuerung des Krafttrainings Angaben zu den Belastungsnormativen (z.B. Trainingsintensität, -dauer, -häufigkeit), also zur Dosis des Trainings, notwendig. Dadurch kann ein Krafttraining effektiv im Sinne einer biologischen (z.B. Hypertrophie) oder verhaltensorientierten (z.B. Mobilitätsverbesserung) Anpassungswirkung gestaltet werden. Im geriatrischen Kontext wird Krafttraining primär zur Bekämpfung der Dynapenie (18) und der Sarkopenie (16) eingesetzt sowie zur Prävention und Therapie altersbedingter Einschränkungen des Gleichgewichts (19) und der Mobilität (20).

Krafttraining als Mittel gegen die Dynapenie

In einer kürzlich durchgeführten Metaanalyse wurden Dosis-Wirkungs-Beziehungen beim Krafttraining mit älteren Personen (≥ 55 Jahre) anhand von 15 randomisierten und kontrollierten Studien überprüft (21). Insbesondere sollte der Einfluss der dosisbestimmenden Variablen wie Trainingsdauer (Wochen), Trainingshäufigkeit (Trainingseinheiten pro Woche), Trainingsintensität (% des Einerwiederholungs-Maximums [EWM]) auf Messgrößen der Kraft herausgearbeitet werden. Das EWM entspricht der höchsten Last, die unter definierten Arbeitsbedingungen einmal gehoben werden kann. In allen Studien wurden die Knieextensoren trainiert und zur Überprüfung der Trainingseffekte EWM-Tests eingesetzt. Im Ergebnis der Literaturanalyse zeigte sich, dass Krafttraining signifikante Kraftzuwachsrate der Kniestrecker bewirkt. Allerdings konnte nur für die Variable «Trainingsdauer» ein bedeutsamer

Einfluss hinsichtlich der Kraftverbesserungen festgestellt werden. Studien mit einer Trainingsdauer von 8 bis 18 Wochen zeigten dabei kleinere Effekte als Studien mit einer Trainingsdauer von 24 bis 52 Wochen (21). Da bei den 15 einbezogenen Studien nur geringe Unterschiede hinsichtlich der Belastungsnormativen Trainingshäufigkeit (12 Studien 3 x/Woche; 3 Studien < 3 x/Woche) und Trainingsintensität (11 Studien $> 70\%$ des EWM, 4 Studien $< 70\%$ des EWM) gefunden wurden, konnte der Einfluss dieser wichtigen Variablen auf die Kraftzuwachsrate nicht herausgearbeitet werden. Aus einer Originalarbeit geht jedoch hervor (22), dass bei körperlich aktiven Frauen im Alter von über 60 Jahren ein 16-wöchiges Krafttraining bei 60 bis 80 Prozent des EWM dann zu signifikant grösseren Kraftzuwachsrate in den Muskeln der unteren und oberen Extremitäten führte, wenn 3 Trainingseinheiten pro Woche im Vergleich zu 2 oder nur 1 Einheit durchgeführt wurden.

Neben den Belastungsnormativen Trainingsdauer und -häufigkeit scheint insbesondere auch die Trainingsintensität das Ausmass des Kraftzuwachses zu beeinflussen. In einem narrativen Literaturüberblick wurde darauf hingewiesen (11), dass Methoden mit mittleren Krafteinsätzen ($>30\%$ und $< 60\%$ des EWM) zu keinen oder nur geringen Kraftsteigerungen führen, wohingegen Krafttraining mit submaximalen Krafteinsätzen (70–80% des EWM) Kraftzuwachsrate bis zu 220 Prozent bewirkte. Die Ergebnisse dieses Beitrages wurden in einer Metaanalyse von Steib und Kollegen bestätigt (23). Die Autoren untersuchten den Einfluss der Trainingsintensität auf die Effekte von progressiv gestaltetem Krafttraining im Alter (≥ 65 Jahre) auf Messgrößen der Kraft. Die 29 randomisierten und kontrollierten Studien wurden in drei Kategorien eingeteilt: Krafttraining mit hohen ($>75\%$ des EWM), mittleren (55–75% des EWM) und niedrigen ($< 55\%$ des EWM) Intensitäten. Im Ergebnis konnte ermittelt werden, dass hochintensives Krafttraining grössere Effekte erzielte als Krafttraining mit mittleren und niedrigen Intensitäten. Zusätzlich zu den beschriebenen Belas-

tungsnormativen könnte auch die Satzzahl pro Kraftübung für das Ausmass des Kraftgewinns bedeutsam sein (23). In diesem Zusammenhang untersuchten Galvao und Kollegen (24) bei 65- bis 78-jährigen selbstständig lebenden Personen die Effektivität von Einsatz- im Vergleich zu Mehrsatztraining nach einem 20-wöchigen hochintensiven Krafttraining (80% des EWM) für Muskeln der unteren und oberen Extremitäten. Nach dem Training konnten sowohl für das Einsatz- als auch das Mehrsatztraining signifikante Kraftzuwachsrate in EWM-Tests für die unteren und oberen Extremitäten beobachtet werden, wobei das Dreisatztraining signifikant grössere Verbesserungen bewirkte als das Einsatztraining (24). *Tabelle 1* ist eine Übersicht von Studien zur Wirkung von Krafttraining im Alter auf verschiedene Messgrößen der Kraft zu entnehmen. **Als Fazit kann festgehalten werden, dass lang andauerndes (24–52 Wochen) Mehrsatzkrafttraining (3 Sätze) mit hoher Trainingshäufigkeit (3 x/Woche) und -intensität ($> 75\%$ des EWM) am besten geeignet ist, um der Dynapenie entgegenzuwirken.**

Krafttraining als Mittel gegen die Sarkopenie

Um Krafttraining gezielt als Mittel gegen die Sarkopenie einsetzen zu können, muss zunächst die zeitliche Abfolge der Anpassungsmechanismen an Krafttraining geklärt werden. Während der ersten Phase eines Krafttrainings (Trainingswochen 1 und 2) lassen sich bereits signifikante Verbesserungen in Tests zur Erfassung des EWM feststellen, die in erster Linie auf motorische Lernprozesse zurückzuführen sind (25). Während der zweiten Trainingsphase (Trainingswochen 3 und 4) zeigen sich signifikante Kraftzuwachsrate (z.B. Explosivkraft), die vor allem durch neuronale Anpassungsprozesse ausgelöst werden. Diese umfassen eine optimierte neuronale Ansteuerung des Agonisten durch verbesserte Rekrutierungs- und Frequenzierungsmuster motorischer Einheiten sowie eine erhöhte Koaktivierung synergistischer Muskeln und eine reduzierte Koaktivität antagonistischer Muskeln (26). Die dritte

Trainingsphase (≥ 6 Trainingswoche) ist geprägt durch einen signifikanten Zuwachs der Maximalkraft, der durch muskuläre Anpassungsprozesse (Hypertrophie) ausgelöst wird (25).

In zahlreichen Studien zur Wirkung von Krafttraining im Alter auf das Muskelwachstum konnten unter Verwendung verschiedener nicht invasiver Untersuchungsverfahren (z.B. Ultraschall, Computertomografie, Magnetresonanztomografie) trainingsbedingte Muskelquerschnittsvergrößerungen festgestellt werden (17, 27, 28). So wurden beispielsweise nach einem zwölfwöchigen hochintensiven Krafttraining für die Beinstrecker eine um bis zu 10 Prozent grössere Querschnittsfläche des M. quadriceps bei Männern und Frauen mittleren (43–57 Jahre) und höheren Alters (64–73 Jahre) ermittelt (29). In einer weiteren Studie konnte bei gesunden Männern und Frauen im Alter von 65 bis 75 Jahren bereits nach einem neunwöchigen hochintensiven Krafttraining (85% des EWM) für die Beinstrecker eine signifikante Querschnittsvergrößerung des M. quadriceps von 12 Prozent festgestellt werden (30). Biopsischen Analysen ist zu entnehmen, dass die Fasertypen I, IIa und IIb auf Krafttrainingsreize mit Querschnittsvergrößerung reagieren (31, 32). Dabei scheint sich jedoch die prozentuale Fasertypenverteilung nicht zu verändern (33).

Interessant ist die Frage, ob ältere Personen im Vergleich zu jüngeren über eine ähnlich ausgeprägte Plastizität der Skelettmuskulatur verfügen, oder ob Alterseffekte die Plastizität limitieren. In diesem Zusammenhang untersuchten Roth et al. (34) die Wirkungen eines sechsmonatigen hochintensiven (85% des EWM) und 3-mal pro Woche durchgeführten Krafttrainings mit jungen (20–30 Jahre) und älteren (65–75 Jahre) Männern und Frauen auf die Querschnittsfläche des M. quadriceps. Unabhängig von Alter und Geschlecht zeigten sich nach dem Training signifikante Querschnittsvergrößerungen, die im Bereich von 4,1 bis 8,1 Prozent lagen. In einer weiteren Studie konnten ebenfalls keine Unterschiede zwischen jungen (mittleres Alter 29 Jahre) und älteren (mittleres Alter 61 Jahre) Männern

hinsichtlich des trainingsbedingten Muskelwachstums im M. quadriceps festgestellt werden (32). Das Krafttraining wurde in dieser Studie über 10 Wochen mit einer Trainingshäufigkeit von 3-mal pro Woche und einer Intensität von 70 bis 80 Prozent des EWM durchgeführt. Die geschilderten Resultate implizieren, dass Hypertrophie bei geeigneter Reizsetzung in jedem Alter induziert werden kann.

Für das Krafttraining im Alter mit der Zielstellung Hypertrophie fehlen derzeit literaturbasierte Angaben zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen, weshalb auf eine Metaanalyse (35) zurückgegriffen wird, die Studien mit gesunden Erwachsenen im Alter von 18 bis 59 Jahren analysierte. Da muskuläre Anpassungen an Krafttraining auch in höchstem Alter stattfinden können und kein Unterschied zu jungen Personen zu erwarten ist (32, 34), dürften die Resultate der vorliegenden Metaanalyse (35) auf die geriatrische Population übertragbar sein.

Anhand von 44 Originalarbeiten untersuchten Wernbom et al. (35) den Einfluss der dosisbestimmenden Variablen Trainingshäufigkeit, -dauer, -intensität und Anzahl der Sätze pro Trainingsübung auf die Querschnittsfläche des M. quadriceps. Im Ergebnis zeigte sich, dass sowohl Studien mit 2 als auch 3 Trainingseinheiten pro Woche die Querschnittsfläche des M. quadriceps pro Trainingstag im Mittel um 0,11 Prozent vergrösserten. Hinsichtlich der Trainingsdauer ergab die Literaturanalyse, dass in Studien mit längeren Trainingsperioden grössere Zuwächse erzielt wurden als in Studien mit kurzen Trainingsperioden. So konnte beispielsweise das grösste Muskelwachstum (34%) in der längsten Studie (20 Wochen) verzeichnet werden (36). Weiterhin berichten die Autoren (35), dass Trainingsprotokolle mit 4 bis 6 Sätzen pro Trainingsübung eine mittlere Zuwachsrate pro Trainingstag von 0,13 Prozent erzielten, wohingegen Protokolle mit weniger als 4 und mehr als 6 Sätzen ein geringeres Muskelwachstum verzeichneten (jeweils 0,09% pro Trainingstag). Schliesslich konnte festgestellt werden, dass Studien mit Trainingsintensitäten von 70 bis 85 Prozent des EWM das höchste Muskel-

wachstum im M. quadriceps hervorriefen (35). Dieses Resultat stimmt insofern mit den Ergebnissen einer früheren Metaanalyse überein, als Fry (37) einen Intensitätsbereich von 80 bis 95 Prozent des EWM zur optimalen Auslösung von Hypertrophie angibt (Abbildung 1). In Tabelle 1 werden Studien zur Wirkung von Krafttraining im Alter auf Variablen des Muskelwachstums aufgeführt.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass lang andauerndes (20 Wochen) Mehrsatzkrafttraining (4–6 Sätze) mit hoher Trainingshäufigkeit (2–3 x/Woche) und -intensität (70–95% des EWM) am besten geeignet zu sein scheint, um der Sarkopenie entgegenzuwirken.

Supplementiertes Krafttraining als Mittel gegen Dynapenie und Sarkopenie

Um Dynapenie und Sarkopenie bestmöglich zu bekämpfen, könnte die zusätzliche Gabe von Nahrungsergänzungsmitteln vor, während oder nach dem Maximalkrafttraining (70–95% des EWM) einen additiven Effekt hinsichtlich des Kraftzuwachses und vor allem des Muskelwachstums erzielen. Aktuelle Metaanalysen, Übersichtsbeiträgen und Originalarbeiten ist zu entnehmen (38–40), dass Kraftzuwächse und Muskelquerschnittsvergrößerungen insbesondere durch die Gabe von Molkeproteinen und Vitamin-D-Präparaten induziert werden können. Molkeproteine sind deshalb zu bevorzugen, weil sie einen hohen Leucinanteil aufweisen und damit im Vergleich zu Kasein oder Sojaproteinen eine schnellere Verarbeitung, Absorption und Muskelproteinsynthese ermöglichen (41). Weiterhin fördert die Einnahme von Vitamin D sowohl den Kalziumeinstrom in die Muskelfasern als auch die Proteinsynthese. Dies scheint die Ursache für einen Zuwachs an Muskelkraft und ein verbessertes Gleichgewicht zu sein, was letztlich mit einer Reduktion der Sturzrate einhergeht (42). Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Abschnitt in erster Linie die Wirkungen von Krafttraining im Alter im Zusammenhang mit diesen Nahrungsergänzungsmitteln beschrieben. In einer aktuellen Metaanalyse unter-

suchten Cermak et al. (38) die Wirkungen von Krafttraining in Kombination mit Nahrungsergänzungsmitteln (Proteine) im Vergleich zu Krafttraining mit Placebopräparaten (Kohlenhydrate) auf Variablen der Kraft (z.B. EWM) und der Muskelmasse (z.B. fettfreie Masse, Muskelfaserquerschnittsvergrößerung) bei gesunden jungen (< 50 Jahre) und älteren Erwachsenen (> 50 Jahre). In die Analyse wurden randomisierte, kontrollierte Studien inkludiert, die Krafttraining über einen Zeitraum von 6 bis 24 Wochen (im Mittel 12) mit 2 bis 5 (im Mittel 3) Trainingseinheiten pro Woche durchführten. Durchschnittlich wurden 42 g Proteine (z.B. Molke, Casein) pro Tag (mindestens 1,2 g/kg/Tag) vor, während oder nach dem Training über die Nahrung oder durch Supplemente zugeführt. Im Vergleich zu den Gruppen, die zum Krafttraining Placebopräparate (z.B. Kohlenhydrate, Wasser usw.) einnahmen, führte Krafttraining mit Proteinsupplementen sowohl bei den jungen als auch bei den älteren Probanden zu signifikant höheren Zuwachsraten im EWM (Beinpresse) und bei der fettfreien Masse. Das EWM nahm bei den jüngeren und älteren Probanden um 20 respektive 33 Prozent zu, die fettfreie Masse erhöhte sich bei den jungen (0,81 kg) und den älteren Probanden (0,48 kg) signifikant. Es konnte kein Alterseffekt festgestellt werden. Hinsichtlich der Muskelfaserquerschnittsvergrößerung (Typ-I und -II-Fasern) wurden nur bei den jungen Vergleichsgruppen signifikante Zuwächse (Typ I [45%] und Typ II [54%]) nach Krafttraining mit Nahrungsergänzung im Vergleich zu den Placebokontrollierten Krafttrainingsgruppen festgestellt. Die Autoren zogen daraus den Schluss, dass eine Protein- und/oder Aminosäuresupplementation nach einem Krafttraining die Muskelproteinsynthese steigert. Dadurch wird eine potenzierte adaptive Antwort des Muskels auf Krafttraining ermöglicht, was letztlich zu höheren Kraftzuwachsrate und stärkerem Muskelwachstum führt (38).

Der Zeitpunkt der Einnahme scheint neben dem Proteintyp und der verabreichten Proteinmenge ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf die Muskelquer-

schnittsvergrößerung und die Kraftzuwächse zu haben. In einer Studie wurde bei Männern im Alter von 70 bis 80 Jahren untersucht, ob eine Proteineinnahme (10 g entrahmte Milch/Soja) unmittelbar nach dem Krafttraining einen grösseren Einfluss auf das Muskelwachstum (M. quadriceps) und die Kraftzuwachsrate (EWM und 5-WM) der Kniestrecker hat als die Einnahme zwei Stunden nach Beendigung des Trainings (43). Das 12-wöchige Krafttraining (3 x/Woche) bewirkte eine signifikant höhere Zunahme des Muskelquerschnitts im M. quadriceps (7%) in der Gruppe, die die Proteine unmittelbar nach dem Training aufnahm. Die verzögerte Proteinzufuhr nach dem Training führte zu keinen bedeutsamen Veränderungen im Muskelquerschnitt.

Neben der Gabe von Molkeproteinen scheinen ältere Menschen insbesondere von der Vitamin-D-Einnahme zu profitieren. In einer Metaanalyse von Muir et al. (44) konnte gezeigt werden, dass die tägliche Gabe von Vitamin D mit einer Dosierung von 800 bis 1000 IE zu signifikanten Verbesserungen der Kraft und des Gleichgewichts bei älteren Menschen (≥ 60 Jahre) führte. In einem Übersichtsbeitrag konnte allerdings kein additiver Effekt von Vitamin D bei gleichzeitiger Durchführung eines Krafttrainings im Alter festgestellt werden (45). Nach Aussage des Autors scheint dieses Ergebnis jedoch nicht abschliessend gesichert zu sein, da die Studienqualität der betrachteten Arbeiten limitiert war (kleine Stichprobengrößen, geringe Vitamin-D-Dosen, niedrige Trainingsintensitäten und/oder -umfänge). Hinsichtlich der optimalen Vitamin-D-Dosis untersuchten Bogaerts et al. (40) bei 113 Frauen (≥ 70 Jahre) die Effekte der Gabe von 880 oder 1600 IE Vitamin D mit oder ohne zusätzliches 24-wöchiges Ganzkörpervibrationstraining (3 x/Woche). Verglichen mit den Gruppen, die nur Vitamin D bekamen, zeigten sich in den Gruppen, die Vibrationstraining durchführten und Vitamin D einnahmen, signifikante Verbesserungen der Kraft (EWM), der Ausdauer (shuttlewalk), des Gleichgewichts (Posturografie) und der Mobilität (Timed-Up-and-Go-Test). Es konnte jedoch kein additiver Effekt der

höheren Vitamin-D-Dosis gefunden werden (40).

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass sowohl eine ausreichende Dosis Vitamin D (800–1000 Einheiten) als auch die unmittelbare Einnahme insbesondere von Molkeproteinen ($\geq 1,2$ g/kg/Tag) nach dem Krafttraining der Dynapenie und Sarkopenie entgegenwirken können.

Krafttraining als Mittel gegen Gleichgewichtsdefizite und Mobilitätseinschränkungen

Neben der Bekämpfung von Dynapenie und Sarkopenie wird Krafttraining im Alter auch angewandt, um Transferleistungen im Sinne von Gleichgewichts- und Mobilitätsverbesserungen bei älteren Menschen zu erzielen. In einer systematischen Literaturübersicht untersuchten Orr und Kollegen (46) die Wirkungen von progressivem Krafttraining auf das Gleichgewicht gesunder und mobilitätseingeschränkter selbstständig lebender älterer Personen (≥ 60 Jahre). Die Autoren unterteilten dabei den primären Endpunkt der Analyse (Gleichgewicht) nach der Bewegungsart und der verwendeten Untersuchungsmethodik in vier Kategorien:

- a) statisches Gleichgewicht (z.B. Romberg-Test);
- b) dynamisches Gleichgewicht (z.B. Functional-Reach-Test);
- c) funktionell/klinische Testverfahren zur Abschätzung des Gleichgewichts (z.B. Berg-Balance-Test);
- d) apparative Verfahren zur Abschätzung des Gleichgewichts (z.B. Sensory-Organisation-Test).

Von den 29 randomisierten und kontrollierten Studien, die in die Literaturanalyse einbezogen wurden, fanden 14 Studien trainingsbedingte Verbesserungen in allen vier Kategorien, wobei vor allem in jenen Studien Leistungssteigerungen beobachtet wurden, die funktionell-klinische Tests einsetzten. Die spezifische Betrachtung der Trainingseffekte vor dem Hintergrund der Zielgruppe und der Dosis-Wirkungs-Beziehungen zeigte, dass Krafttraining insbesondere bei mobilitätseingeschränkten Personen Verbesserungen des Gleichgewichts bewirkte und

Studien mit langer Trainingsdauer (40–104 Wochen) und hoher Trainingsintensität ($\geq 70\%$ des EWM) besonders effektiv waren. Weiterhin wurde die Studienlage durch die Verwendung der Physiotherapy-Evidence-Database (PEDRo)-Skala einer methodenkritischen Analyse unterzogen, um eine Beurteilung der Qualität der Interventionsstudien vornehmen zu können. Hierbei wurde eingeschätzt, inwieweit eine Studie intern valide ist und statistische Informationen enthält, sodass die Ergebnisse nachvollzogen und interpretiert werden können. Insgesamt können maximal 10 Punkte vergeben werden, wobei das Erreichen von 6 oder mehr Punkten einer hohen methodologischen Studienqualität entspricht. Nur zwölf Studien (43% der Arbeiten) erzielten einen Wert von ≥ 6 auf der PEDRo-Skala, was einer durchschnittlichen Studienqualität entspricht. Zukünftig sind somit weitere, methodisch gut durchgeführte Arbeiten notwendig, die die Wirkungen von Krafttraining im Alter auf Variablen des Gleichgewichts überprüfen.

Die bereits erwähnte Metaanalyse von Steib et al. (23) untersuchte nicht nur die Wirkungen von Krafttraining auf Variablen der Kraft, sondern auch auf das Gleichgewicht (z.B. Gehgeschwindigkeit) und die Mobilität (z.B. Timed-Up-and-Go-Test). Im Gegensatz zur Literaturbetrachtung von Orr et al. (46) konnten Steib et al. (23) keinen Einfluss der Trainingsintensität auf Messgrößen des Gleichgewichts und der Mobilität feststellen. Die Autoren vermuten, dass trainingsbedingte Kraftverbesserungen nur bis zu einem gewissen Mass in Leistungssteigerungen des Gleichgewichts und der Mobilität transferiert werden können, dass also eine nicht lineare Beziehung zwischen Kraftzuwachs und Gleichgewichts-/Mobilitätsverbesserungen besteht. Mit anderen Worten: Die ermittelten höheren Kraftzuwächse durch Krafttraining mit hohen Intensitäten ($> 75\%$ des EWM) im Vergleich zu Krafttraining mit mittleren (55–75% des EWM) und niedrigen ($< 55\%$ des EWM) Intensitäten schlugen sich nicht in additiven Verbesserungen des Gleichgewichts und der Mobilität nieder (23).

Interessant ist jedoch die Feststellung von Steib und Kollegen (23), dass Schnellkrafttraining (englisch: Power Training oder High Velocity Strength Training) im Vergleich zu traditionellem Krafttraining in Tests zur Erfassung des Gleichgewichts und der Mobilität zu stärkeren Leistungsverbesserungen führte. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass sich die Methodik des Schnellkrafttrainings insbesondere in der Bewegungs- und/oder Kontraktionsgeschwindigkeit beim Ausstossen einer Last (während der konzentrischen Phase) vom traditionellen Krafttraining unterscheidet. In der Literatur wird das Verhältnis von konzentrischer zu exzentrischer Phase in der Regel mit 1:2 angegeben (47), sodass die konzentrische Phase explosiv gestaltet wird. Tschopp et al. (47) bestätigen in ihrer kürzlich durchgeführten Metaanalyse die Ergebnisse von Steib et al. (23), indem sie ebenfalls höhere Effekte von Schnellkrafttraining im Vergleich zu traditionellem Krafttraining auf Gleichgewichts- (z.B. Zeit im Einbeinstand) und Mobilitätsparameter (z.B. Short Physical Performance Battery) feststellten.

Die Frage nach der geeigneten Trainingsintensität beim Schnellkrafttraining mit älteren Personen konnte jedoch in beiden Metaanalysen (23, 47) nicht abschliessend beantwortet werden. Trainingsintensitäten von 20 bis 80 Prozent des EWM wurden in der Vergangenheit im Schnellkrafttraining mit Senioren angewandt (19). Granacher et al. (48) weisen in ihrem systematischen Übersichtsbeitrag darauf hin, dass Schnellkrafttraining mit niedrigen Intensitäten zu grösseren Anpassungen der Mobilität und des Gleichgewichts führen könnte als Schnellkrafttraining mit hohen Intensitäten. In einer Originalarbeit wurde der Einfluss der Trainingsintensität beim Schnellkrafttraining auf das Gleichgewicht überprüft (19). Die Autoren verglichen die Wirkungen eines zehnwöchigen, zweimal pro Woche durchgeführten Schnellkrafttrainings bei unterschiedlichen Trainingsintensitäten (20, 50, 80% des EWM) auf das Gleichgewicht (Einbeinstand auf Kraftmessplatte) von gesunden, selbstständig lebenden Personen mit einem mittleren Alter von

69 Jahren. Es konnte festgestellt werden, dass die niedrig dosierte Trainingsgruppe (20% des EWM) die grössten Gleichgewichtsverbesserungen erzielte im Vergleich zu den Gruppen, die mit 50 und 80 Prozent des EWM trainierten (19).

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Schnellkrafttraining mit explosiven Einsätzen während der konzentrischen Phase nur bedingt als Trainingsmassnahme für gebrechliche ältere Personen geeignet ist. Neue Interventionsansätze deuten darauf hin, dass Rumpfkrafttraining bei dieser Zielgruppe besonders gut geeignet sein könnte, um Verbesserungen des Gleichgewichts und der Mobilität zu induzieren. Einer aktuellen Studie ist zu entnehmen, dass das progressiv gestaltete Training der Rumpfmuskulatur (9 Wochen, 2 x/Woche) unter Verwendung instabiler Trainingsmittel zu signifikanten Verbesserungen des dynamischen Gleichgewichts (Gehgeschwindigkeit, Gangvariabilität) und der Mobilität (Leistung im Timed-Up-and-Go-Test) bei 63- bis 80-jährigen Frauen und Männern führte (49). In einer kürzlich publizierten systematischen Literaturübersicht wurden die Ergebnisse der Originalarbeit auf einer breiten Literaturbasis bestätigt (50). Granacher et al. (50) berichten, dass Rumpfkrafttraining zwischen 6 und 12 Wochen mit 2 bis 3 Trainingseinheiten pro Woche und 3 bis 4 Sätzen pro Übung sowie einer progressiven Belastungsgestaltung über Thera-Bänder oder das eigene Körpergewicht signifikante Verbesserungen des Gleichgewichts und der Mobilität bewirken.

Es kann festgehalten werden, dass insbesondere Schnellkrafttraining für die unteren Extremitäten mit Intensitäten von 20 Prozent des EWM und einer Trainingsdauer von 10 Wochen bei 2 Trainingseinheiten pro Woche und 3 Sätzen pro Übung Verbesserungen des Gleichgewichts und der Mobilität induzieren (Tabelle 1).

Darüber hinaus deutet sich an, dass Rumpfkrafttraining eine vielversprechende und einfach durchzuführende Massnahme zum Training des Gleichgewichts und der Mobilität im Alter darstellt. Einschränkend muss jedoch angemerkt wer-

den, dass die Studienlage zu den Dosis-Wirkungs-Beziehungen im Schnellkraft- und Rumpfkrafttraining limitiert ist und die bis heute zur Verfügung stehenden Ergebnisse daher mit Vorsicht interpretiert werden müssen.

Fazit

Krafttraining stellt eine effektive Interventionsmassnahme im Alter dar, um Dynapenie, Sarkopenie, Gleichgewichtsdefiziten und Mobilitätseinschränkungen entgegenzuwirken. Bei der Umsetzung von Krafttraining in die Trainingspraxis muss das jeweilige Trainingsziel beachtet werden. So unterscheidet sich beispielsweise das Belastungsgefüge des Maximalkrafttrainings mit dem Ziel Muskelwachstum deutlich von den Belastungsnormativen des Schnellkrafttrainings mit dem Ziel Gleichgewichts- und Mobilitätsverbesserungen. Aus *Abbildung 2* ist eine nach Trainingszielen geordnete Zusammenstellung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen zum Krafttraining mit älteren Menschen zu entnehmen.

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Urs Granacher
Universität Potsdam
Humanwissenschaftliche Fakultät
Exzellenzbereich Kognitionswissenschaften
Lehrstuhl für Trainings- und
Bewegungswissenschaft
Am Neuen Palais 10, Haus 12
D-14469 Potsdam
Tel. +49 (0)331-977 1543
Fax +49 (0)331 977 4022
E-Mail: urs.granacher@uni-potsdam.de

Tabelle 1 online einsehbar auf www.sze.ch

Literatur:

1. «Population structure and ageing» – Statistics Explained (2013/10/2) [database on the Internet]. European Commission. 2013 [cited 2013/10/29]. Available from: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Population_structure_and_ageing.
2. Bundesamt für Statistik. Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2010–2060. Bundesamt für Statistik, editor. Neuchâtel Bundesamt für Statistik 2010.
3. Reinhardt UE. Does the aging of the population really drive the demand for health care? *Health Affairs* 2003; 22 (6): 27–39.
4. Weyler EJ, Gandjour A: Socioeconomic burden of hip fractures in Germany. *Gesundheitswesen* 2007; 69 (11): 601–606.
5. Granacher U, Zahner L, Gollhofer A: Strength, power, and postural control in seniors: Considerations for functional adaptations and for fall prevention. *Eur J Sport Sci* 2008; 8 (6): 325–340.
6. Gostynski M, Ajdacic-Gross V, Gutzwiller F, Michel JP, Herrmann F: Epidemiological analysis of accidental falls by the elderly in Zurich and Geneva. *Schweiz Med Wochenschr* 1999; 129 (7): 270–275.
7. Rubenstein LZ, Josephson KR. The epidemiology of falls and syncope. *Clin Geriatr Med* 2002; 18 (2): 141–158.
8. Kannus P, Parkkari J, Koskinen S, Niemi S, Palvanen M, Jarvinen M et al. Fall-induced injuries and deaths among older adults. *Jama* 1999; 281 (20): 1895–1899.
9. Rubenstein LZ: Falls in older people: epidemiology, risk factors and strategies for prevention. *Age and ageing* 2006; 35: ii37–ii41.
10. Lynch NA, Metter EJ, Lindle RS, Fozard JL, Tobin JD, Roy TA et al. Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. *J Appl Physiol* 1999; 86 (1): 188–194.
11. Strass D, Granacher U. Neuromuskuläre Auswirkungen des Alterns: Krafttraining zur Vorbeugung. *Sportwissenschaft* 2000; 30 (4): 471–480.
12. Delmonico MJ, Harris TB, Visser M, Park SW, Conroy MB, Velasquez-Mieyer P et al. Longitudinal study of muscle strength, quality, and adipose tissue infiltration. *Am J Clin Nutr* 2009; 90(6): 1579–1585.
13. Manini TM, Clark BC. Dynapenia and aging: an update. *J Gerontol A, Biol Sci Med Sci* 2012; 67 (1): 28–40.
14. Bean JF, Kiely DK, Herman S, Leveille SG, Mizer K, Frontera WR et al. The relationship between leg power and physical performance in mobility-limited older people. *J Am Geriatr Soc* 2002; 50 (3): 461–467.
15. Oh-Park M, Wang C, Verghese J: Stair negotiation time in community-dwelling older adults: normative values and association with functional decline. *Arch Phys Med Rehabil* 2011; 92 (12): 2006–2011.
16. Fiatarone MA, Marks EC, Ryan ND, Meredith CN, Lipsitz LA, Evans WJ. High-intensity strength training in nonagenarians. Effects on skeletal muscle. *Jama* 1990; 263 (22): 3029–3034.
17. Frontera WR, Meredith CN, O'Reilly KP, Knuttgen HG, Evans WJ. Strength conditioning in older men: skeletal muscle hypertrophy and improved function. *J Appl Physiol* 1988; 64 (3): 1038–1044.
18. Granacher U, Gruber M, Gollhofer A. Resistance training and neuromuscular performance in seniors. *Inter J Sports Med* 2009; 30 (9): 652–657.
19. Orr R, de Vos NJ, Singh NA, Ross DA, Stavrinou TM, Fiatarone-Singh MA. Power training improves balance in healthy older adults. *J Gerontol Series A, Biol Sci Med Sci* 2006; 61 (1): 78–85.
20. Sayers SP, Bean J, Cuoco A, LeBrasseur NK, Jette A, Fielding RA. Changes in function and disability after resistance training: does velocity matter?: a pilot study. *Am J Phys Med Rehabil* 2003; 82 (8): 605–613.
21. Silva NL, Oliveira RB, Fleck SJ, Leon AC, Farinatti P. Influence of strength training variables on strength gains in adults over 55 years-old: A meta-analysis of dose-response relationships. *J Sci Med Sport/Sports Med Australia*. 2013: 135–137.
22. Farinatti PT, Galdes AA, Bottaro MF, Lima MV, Albuquerque RB, Fleck SJ. Effects of different resistance training frequencies on the muscle strength and functional performance of active women older than 60 years. *J Strength Cond Res* 2013; 27 (8): 2225–2234.
23. Steib S, Schoene D, Pfeifer K. Dose-response relationship of resistance training in older adults: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 2010; 42 (5): 902–914.
24. Galvao DA, Taaffe DR. Resistance exercise dosage in older adults: single- versus multiset effects on physical performance and body composition. *J Am Geriatr Soc* 2005; 53 (12): 2090–2097.
25. Macaluso A, De Vito G. Muscle strength, power and adaptations to resistance training in older people. *Eur J Appl Physiol* 2004; 91 (4): 450–472.
26. Häkkinen K. Ageing and neuromuscular adaptation to strength training. In: Komi PV, editor. *Strength and Power in Sport*. Oxford: Blackwell Publishing 2003. 409–425.
27. Harridge SD, Kryger A, Stensgaard A. Knee extensor strength, activation, and size in very elderly people following strength training. *Muscle & Nerve* 1999; 22 (7): 831–839.
28. Häkkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Malkia E et al. Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol* 1998; 84 (4): 1341–1349.
29. Häkkinen K, Häkkinen A. Neuromuscular adaptations during intensive strength training in middle-aged and elderly males and females. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1995; 35: 137–147.
30. Tracy BL, Ivey FM, Hurlbut D, Martel GF, Lemmer JT, Siegel EL et al. Muscle quality. II. Effects of strength training in 65- to 75-year-old men and women. *J Appl Physiol* 1999; 86 (1): 195–201.
31. Trappe S, Williamson D, Godard M, Porter D, Rowden G, Costill D: Effect of resistance training on

- single muscle fiber contractile function in older men. *J Appl Physiol* 2000; 89(1): 143–152.
32. Häkkinen K, Newton RU, Gordon SE, McCormick M, Volek JS, Nindl BC et al. 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* 1998; 53 (6): B415–B423.
33. Häkkinen K, Pakarinen A, Kraemer WJ, Häkkinen A, Valkeinen H, Alen M: Selective muscle hypertrophy, changes in EMG and force, and serum hormones during strength training in older women. *J Appl Physiol* 2001; 91 (2): 569–580.
34. Roth SM, Ivey FM, Martel GF, Lemmer JT, Hurlbut DE, Siegel EL et al. Muscle size responses to strength training in young and older men and women. *J Am Geriatr Soc* 2001; 49 (11): 1428–1433.
35. Wernbom M, Augustsson J, Thomee R. The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med* 2007; 37 (3): 225–264.
36. Sale DG, MacDougall JD, Jacobs I, Garner S. Interaction between concurrent strength and endurance training. *J Appl Physiol* (1985) 1990; 68 (1): 260–270.
37. Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med* 2004; 34 (10): 663–679.
38. Cermak NM, Res PT, de Groot LC, Saris WH, van Loon LJ. Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr* 2012; 96 (6): 1454–1464.
39. Hayes A, Cribb PJ. Effect of whey protein isolate on strength, body composition and muscle hypertrophy during resistance training. *Curr Opin Clin Nutr Metabol Care* 2008; 11 (1): 40–44.
40. Bogaerts A, Delecluse C, Boonen S, Claessens AL, Milisen K, Verschuere SM. Changes in balance, functional performance and fall risk following whole body vibration training and vitamin D supplementation in institutionalized elderly women. A 6 month randomized controlled trial. *Gait & posture* 2011; 33 (3): 466–472.
41. Pennings B, Boirie Y, Senden JM, Gijsen AP, Kuipers H, van Loon LJ: Whey protein stimulates postprandial muscle protein accretion more effectively than do casein and casein hydrolysate in older men. *Am J Clin Nutr* 2011; 93 (5): 997–1005.
42. Bischoff-Ferrari HA, Conzelmann M, Dick W, Theiler R, Stahelin HB: Effect of vitamin D on muscle strength and relevance in regard to osteoporosis prevention. *Z Rheumat* 2003; 62 (6): 518–521.
43. Esmarck B, Andersen JL, Olsen S, Richter EA, Mizuno M, Kjaer M: Timing of postexercise protein intake is important for muscle hypertrophy with resistance training in elderly humans. *J Physiol* 2001; 535 (Pt 1): 301–311.
44. Muir SW, Montero-Odasso M. Effect of vitamin D supplementation on muscle strength, gait and balance in older adults: a systematic review and meta-analysis. *J Am Geriatr Soc* 2011; 59 (12): 2291–2300.
45. Daly RM. Independent and combined effects of exercise and vitamin D on muscle morphology, function and falls in the elderly. *Nutr* 2010; 2 (9): 1005–1017.
46. Orr R, Raymond J, Fiatarone SM: Efficacy of progressive resistance training on balance performance in older adults: a systematic review of randomized controlled trials. *Sports Med* 2008; 38 (4): 317–343.
47. Tschopp M, Sattelmayer MK, Hilfiker R: Is power training or conventional resistance training better for function in elderly persons? A meta-analysis. *Age and ageing* 2011; 40 (5): 549–556.
48. Granacher U, Muehlbauer T, Zahner L, Gollhofer A, Kressig RW. Comparison of traditional and recent approaches in the promotion of balance and strength in older adults. *Sports Med* 2011; 41 (5): 377–400.
49. Granacher U, Lacroix A, Muehlbauer T, Roettger K, Gollhofer A. Effects of core instability strength training on trunk muscle strength, spinal mobility, dynamic balance and functional mobility in older adults. *Gerontol* 2013; 59 (2): 105–113.
50. Granacher U, Gollhofer A, Hortobagyi T, Kressig RW, Muehlbauer T: The Importance of Trunk Muscle Strength for Balance, Functional Performance, and Fall Prevention in Seniors: A Systematic Review. *Sports Med*. 2013; 43 (7): 627–641.
51. Charette SL, McEvoy L, Pyka G, Snow-Harter C, Guido D, Wiswell RA et al. Muscle hypertrophy response to resistance training in older women. *J Appl Physiol* 1991; 70 (5): 1912–1916.
52. Hicks AL, Cupido CM, Martin J, Dent J. Twitch potentiation during fatiguing exercise in the elderly: the effects of training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1991; 63 (3–4): 278–281.
53. Grimby G, Aniansson A, Hedberg M, Henning GB, Grangard U, Kvist H. Training can improve muscle strength and endurance in 78- to 84-yr-old men. *J Appl Physiol* 1992; 73 (6): 2517–2523.
54. Judge JO, Underwood M, Gennosa T. Exercise to improve gait velocity in older persons. *Arch Phys Med Rehabil* 1993; 74 (4): 400–406.
55. Nichols JF, Omizo DK, Peterson KK, Nelson KP. Efficacy of heavy-resistance training for active women over sixty: muscular strength, body composition, and program adherence. *J Am Geriatr Soc* 1993; 41 (3): 205–210.
56. Pyka G, Lindenberger E, Charette S, Marcus R. Muscle strength and fiber adaptations to a year-long resistance training program in elderly men and women. *J Gerontol* 1994; 49 (1): M22–M27.
57. Fiatarone MA, O'Neill EF, Ryan ND, Clements KM, Solares GR, Nelson ME et al. Exercise training and nutritional supplementation for physical frailty in very elderly people. *N Engl J Med* 1994; 330 (25): 1769–1775.
58. Häkkinen K, Pakarinen A: Serum hormones and strength development during strength training in middle-aged and elderly males and females. *Acta Physiol Scand* 1994; 150 (2): 211–219.
59. McCartney N, Hicks AL, Martin J, Webber CE. A longitudinal trial of weight training in the elderly: continued improvements in year 2. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 1996; 51 (6): B425–B433.
60. Häkkinen K, Kallinen M, Linnamo V, Pastinen UM, Newton RU, Kraemer WJ. Neuromuscular adaptations during bilateral versus unilateral strength training in middle-aged and elderly men and women. *Acta Physiol Scand* 1996; 158 (1): 77–88.
61. Yarasheski KE, Pak-Loduca J, Hasten DL, Obert KA, Brown MB, Sinacore DR: Resistance exercise training increases mixed muscle protein synthesis rate in frail women and men \geq 76 yr old. *Am J Physiol* 1999; 277 (1 Pt 1): E118–E125.
62. Hagerman FC, Walsh SJ, Staron RS, Hikida RS, Gilders RM, Murray TF et al. Effects of high-intensity resistance training on untrained older men. I. Strength, cardiovascular, and metabolic responses. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2000; 55 (7): B336–B346.
63. Häkkinen K, Alen M, Kallinen M, Newton RU, Kraemer WJ: Neuromuscular adaptation during prolonged strength training, detraining and re-strength-training in middle-aged and elderly people. *Eur J Appl Physiol* 2000; 83 (1): 51–62.
64. Roth SM, Martel GF, Ivey FM, Lemmer JT, Metter EJ, Hurley BF et al. High-volume, heavy-resistance strength training and muscle damage in young and older women. *J Appl Physiol* 2000; 88 (3): 1112–1118.
65. Schlicht J, Camaione DN, Owen SV: 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* 2001; 56 (5): M281–M286.
66. Scaglioni G, Ferri A, Minetti AE, Martin A, Van Hoecke J, Capodaglio P et al. Plantar flexor activation capacity and H reflex in older adults: adaptations to strength training. *J Appl Physiol* 2002; 92 (6): 2292–2302.
67. Hruza KV, Hicks AL, McCartney N: Training for muscle power in older adults: effects on functional abilities. *Can J Appl Physiol* 2003; 28 (2): 178–189.
68. Granacher U, Strass D, Gollhofer A. Maximal and Explosive Force Production Capacity in Elderly Men: Implications for Exercise. *Isokinet Exerc Sci* 2004; 12 (1): 43–44.
69. Granacher U, Gollhofer A, Strass D. Training induced adaptations in characteristics of postural reflexes in elderly men. *Gait & Posture* 2006; 24 (4): 459–466.
70. Bunout D, Barrera G, Leiva L, Gattas V, de la Maza MP, Avendano M et al: Effects of vitamin D supplementation and exercise training on physical performance in Chilean vitamin D deficient elderly subjects. *Experim Gerontol*. 2006; 41 (8): 746–752.
71. Holviala JH, Sallinen JM, Kraemer WJ, Alen MJ, Hakkinen KK: Effects of strength training on muscle strength characteristics, functional capabilities, and balance in middle-aged and older women. *J Strength Cond Res* 2006; 20 (2): 336–344.
72. Bottaro M, Machado SN, Nogueira W, Scales R, Veloso J: Effect of high versus low-velocity resistance training on muscular fitness and functional performance in older men. *Eur J Appl Physiol* 2007; 99(3): 257–264.
73. Caserotti P, Aagaard P, Buttrop LJ, Puggaard L: Explosive heavy-resistance training in old and very old adults: changes in rapid muscle force, strength and power. *Scan J Med Sci Sports* 2008; 18 (6): 773–782.
74. Slivka D, Raue U, Hollon C, Minchev K, Trappe S: Single muscle fiber adaptations to resistance training in old (> 80 yr) men: evidence for limited skeletal muscle plasticity. *Am J Physiol Regul, Integr Compar Physiol* 2008; 295 (1): R273–280.
75. Raue U, Slivka D, Minchev K, Trappe S: Improvements in whole muscle and myocellular function are limited with high-intensity resistance training in octogenarian women. *J Appl Physiol* 2009; 106 (5): 1611–1617.
76. Bickel CS, Cross JM, Bamman MM: Exercise dosing to retain resistance training adaptations in young and older adults. *Med Sci Sports Exerc* 2011; 43 (7): 1177–1187.

Tabell: Auflistung ausgewählter Studien zum Krafttraining im Alter

Autoren	Geschlecht	Alter (Jahre)	N	Muskeln	Dauer (Wochen)	Kraftgewinn (%)	Muskelquerschnittsvergrößerung (%)	Typ I/Typ II Zuwächse (%)	Verbesserung des Gleichgewichts/der Mobilität (%)
Frontera et al. (17)	M	60–72	12	Knieextension	12	EWM (107)	CT (9)	34 / 28	
Fiatarone et al. (16)	M/F	86–96	10	Knieextension	8	EWM (174)	CT (11)		Tandem-GG (48)
Charette et al. (51)	F	64–86	13	Beinpresse	12	EWM (28)		7 / 20	
Hicks et al. (52)	M/F	mittleres Alter: 66	11	Dorsalextension	12	EWM (48)			
Grimby et al. (53)	M	78–84	9	Knieextension	8–12	EWM (10)	CT (3)	8 / 5	
Judge et al. (54)	M/F	71–97	18	Knieflexion	12	EWM (32)			GG (8)
Nichols et al. (55)	F	mittleres Alter: 67	18	Untere/obere Extrem.	24	EWM (18–71)			
Pyka et al. (56)	M/F	61–78	25	Untere/obere Extrem.	30	EWM (23–62)		59 / 67	
Fiatarone et al. (57)	M/F	72–98	100	Hüft- und Knieextens.	10	EWM (113)	CT (3)		GG (12), Treppensteigen (28)
Häkkinen et al. (58)	M/F	64–73	11	Beinextension	12	MWK (20–37)			
McCartney et al. (59)	M/F	60–80	113	Beinpresse	84	EWM (32)	CT (9)		Treppensteigen (57)
Häkkinen et al. (60)	M/F	60–75	12	Knieextension	12	EWM (18–21)			
Häkkinen et al. (32)	M	mittleres Alter: 61	10	Knieextension	10	EWM (17)	MRT (9)	23 / 38	
Harridge et al. (27)	M/F	85–97	11	Knieextension	12	EWM (134)/MWK (37)	MRT (10)		
Tracy et al. (30)	M/F	65–75	12	Knieextension	9	EWM (27–29)	MRT (12)		
Yarasheski et al. (61)	M/F	76–92	17	Knieextension	12	EWM (6–22)			
Hagermann et al. (62)	M	60–75	10	Beinpresse	16	EWM (72)			
Häkkinen et al. (63)	M/F	62–78	11	Knieextension	24	EWM (16–24)			GG (11)
Trappe et al. (31)	M	mittleres Alter: 74	7	Knieextension	12	EWM (50)		20 / 13	
Roth et al. (64)	F	65–75	6	Knieextension	9	EWM (25)			
Häkkinen et al. (33)	F	60–68	10	Beinextension	21	MWK (37)		22 / 36	
Schlicht et al. (65)	M/F	61–87	24	Beinextension Hüftadduktion Plantarflexion		EWM (20–48)			GG (17), fünfmaliges Aufstehen und Hinsetzen aus einem Stuhl (15)
Roth et al. (34)	M/F	65–75	19	Beinpresse	24	EWM (M:12 / F: 27)	MRT (4)		
Scaglioni et al. (66)	M	65–80	14	Plantarflexion	16	EWM (24)/MWK (18)			
Hruda et al. (67)	M	75–94	25	Knieextension	10	EWM kon. (60)/exz. (44)			6 m Gehzeit (33), 30 s Aufstehen und Hinsetzen aus einem Stuhl (66)
Granacher, et al. (69)	M	60–80	60	Beinextension	12	MWK (27)			
Granacher et al. (68)									
Bunout et al. (70)	M/F	mittleres Alter: 76	96	Knieextension	36	EWM (19)			SPPB (11), 12 min Gehen (9)
Holviola et al. (71)	F	mittleres Alter: 64	48	Beinextension	21	EWM (27)/MWK (20)			GG (9), Gleichgewicht (23)

Tabella: Fortsetzung

Autoren	Geschlecht	Alter (Jahre)	N	Muskeln	Dauer (Wochen)	Kraftgewinn (%)	Muskelquerschnittsvergrößerung (%)	Typ I/Typ II Zuwächse (%)	Verbesserung des Gleichgewichts / der Mobilität (%)
Bottaro et al. (72)	M	60–76	24	Beinextension	10	EWM (27)			TUG (15), 30 s Aufstehen u. Hinsetzen aus einem Stuhl (43)
Caserotti et al. (73)	F	60–65 80–89	65	Beinextension	12	60–65 J. EWM (18) 80–89 J. EWM (28)			
Slivka et al. (74)	M	80–86	6	Knieextension	12	EWM (41)	CT (3)		
Raue et al. (75)	F	mittleres Alter: 85	6	Knieextension	12	EWM (26)		-3/13	
Bickel et al. (76)	M/F	60–75	31	Knieextension	16	EWM (40)		14/28	
Granacher et al. (49)	M/F	63–80	32	Rumpfextension Rumpfflexion Rumpffrotation Rumpf-lateralflexion	9	EWM (21–53)			GG (9), FRT (20), TUG (4)

M = Männer; F = Frauen; MWK = maximal willkürliche Kontraktion; EWM = Einer-Wiederholungs-Maximum; CT = Computertomographie; MRT = Magnetresonanztomographie; GG = Gehgeschwindigkeit; SPPB = Short Physical Performance Battery; kon. = konzentrisch; exz. = exzentrisch; FRT = Functional Reach Test