

Wissenschaftliche Informationen

Thema: Die Tiefkniebeuge

IFHIAS-Veröffentlichung: 06/2013

Einleitung

Basierend auf einen Workshop auf der IRON SYSTEM™ Athletic Week 2013 folgt hier eine Zusammenfassung des Vortrages von Prof. Dr. Dirk Büsch.

Schwerpunktmäßig wird der Mythos „Die Tiefkniebeuge schadet dem passiven Bewegungsapparat im Kniegelenk!“ betrachtet und anhand von empirischen Untersuchungen und Studien zusammenfassend erläutert. Eine Literatur- und Studienliste ist am Ende des Dokuments zu finden.

- Empirische Evidenz

Die Kniegelenksbelastung ist bei der Tiefkniebeuge bspw. geringer als bei vielen Sportarten mit Sprung- und Stoppbewegungen!

- Trainingspraktische Konsequenzen

Die Tiefkniebeuge kann bei Beschwerdefreiheit auch im Fitnessbereich ausgeführt werden, wenn zuvor ein mindestens dreimonatiges isoliertes Training der beteiligten Muskulatur und anschließend ein ein- bis zweimonatiges Koordinationstraining der Kniebeuge ohne Zusatzlasten sowie anschließend mit Hantelstange und geringen Lasten durchgeführt wird. Zur Vermeidung großer Kräfte im Kniegelenk wird ein Winkel von 180-130° bzw. 0-50° empfohlen!ⁱ

Kniebeugen gelten als „Königsdisziplin“ des Krafttrainings. Kniebeugen sind geeignet zum Training der Maximalkraft, beziehen viele Muskelgruppen mit ein (Rückenstrecker, Gesäß- und Oberschenkelmuskulatur (Oberschenkelrück- und Vorderseite, Spanner der Oberschenkelbinde) sowie Adduktoren und Abduktoren), erfordert einen hohen Anteil an Koordination (vordere und hintere Kniebeuge), aber beinhaltet auch eine Verletzungsgefahr bei mangelhafter Technik.

Die Muskelaktivität ist bei der Kniebeuge immer größer als bei der Beinpresse. Daher gilt die Kniebeuge als effektivste Übung zur Kräftigung der Bein- und Hüftmuskulatur. Allerdings treten sowohl bei der Beinpresse als bei der Kniebeuge keine messbaren Kräfte an den vorderen Kreuzbändern (ACL) auf, so dass beide Übungen (mit unterschiedlichen Fußstellungen) auch für ein Rehabilitationstraining geeignet sind (Escamilla et al., 2001).

In der funktionellen Anatomie und Biomechanik wird das gestreckte Knie mit 180° definiert. Vielerorts wird jedoch umgangssprachlich das gestreckte Knie mit 0° angegeben. Daher ist bei den Winkelangaben immer auf die definierte Nullstellung zu achten. Als Orientierung gilt, wenn die Tiefkniebeuge mit $50\text{-}60^\circ$ angegeben wird, dann ist der Winkel des gestreckten Knies im Stehen mit 180° definiert!

Praktische Schlussfolgerungen

1. Die „Tiefe“ der Kniebeuge ist abhängig von der Zielsetzung und den individuellen Voraussetzungen.
2. Die größten tibio- und patellofemorale Kompressionskräfte treten bei maximaler Beugung auf. Bei patellofemorale Problemen sollten große Beugewinkel vermieden werden.

Bei einer Tiefkniebeuge (Oberschenkel mindestens parallel zum Boden, d. h. ein Kniewinkel von mindestens 70° - bis 50° , ohne dass das Gesäß die Oberschenkelrückseite berührt), ohne das können nur deutlich geringere Lasten als in der Halb- und Viertelkniebeuge bewältigt werden (ca. 30-50 % unter der Maximallast der Halbkniebeuge). Dadurch können bei der Tiefkniebeuge auch keine höheren (absoluten) Kniebelastungen erwartet werden (Gottlob, 2007; Pernitsch & Brunner, 2006). Des Weiteren sind die Beschleunigungen, d. h. die Bremskräfte vor dem Umkehrpunkt und die Beschleunigung nach dem Umkehrpunkt zu berücksichtigen, die die Beanspruchung des Knies, insbesondere durch zusätzliche Scherkräfte bei der Halbkniebeuge deutlich erhöhen (Pernitsch & Brunner, 2006; Moosburger, 2006). Um bei einer 90° -Kniebeuge die gleiche Gelenkleistung wie bei einer 70° -Kniebeuge zu erreichen, müsste etwa die 1,5-fache Last bewegt werden (Hildebrand et al., 1989; Witt & Hildebrand, 1995). Aus einer biomechanischen Perspektive ist darauf hinzuweisen, dass beim rechten Winkel im Kniegelenk zwischen Ober- und Unterschenkel der Lasthebel (Oberschenkel) mit dem Widerstand (Körpergewicht und Hantelgewicht) den größten Abstand zum Drehpunkt (Kniegelenk) hat und damit das größte Drehmoment im patellofemorale Gelenk auftritt (Moosburger, 2006; Wirhed, 2001). Entsprechend ist der Stellenwert einer kontrollierten und korrekten Bewegungsausführung nicht hoch genug anzusetzen (Wagner, 2006). Die unphysiologische Abbremsung kann zu einer Überlastung der Patella-Sehne führen und wird daher bspw. bei den Gewichthebern nicht mehr durchgeführt (Fitzgerald & Latchie, 1980; Dörr, 1997; Keogh et al., 2006) und bei den Leichtathleten nur als spezifische Kraft in späteren Trainingsabschnitten (Killing, 2003). Des Weiteren wird thematisiert, dass bei einer Halbkniebeuge durch die Begrenzung der Bewegungsamplitude mehr Kraft- als Dehnungsreize gesetzt werden, die ein zusätzliches Dehnungstraining notwendig erscheinen lassen (Hartmann & Tünnemann, 1988).

Aus präventiver Perspektive stellt die tiefe Hocke außerdem eine physiologische Haltung dar, in der sich Naturvölker viele Stunden aufhalten. Gerade in dieser Position ist ein kräftiger Gelenkschutz notwendig und muss entsprechend trainiert werden (Gottlob, 2007).ⁱⁱ

3. Bei bestehenden Verletzungen oder bereits rekonstruierten hinteren Kreuzbändern sollte die maximale Beugung auf 50-60° limitiert werden.
4. Die vordere Oberschenkelmuskulatur kann mit diesem Winkelbereich und paralleler Fußstellung (wobei die Fußspitzen leicht nach außen rotiert sein können) am besten entwickelt werden.ⁱⁱⁱ
5. Bei der Ausführung der Kniebeuge mit Kniegelenkwinkeln größer bzw. tiefer als 130-120° bzw. 50-60° steigt die Aktivität der Hüftstrecker.
6. Die Bewegungsgeschwindigkeit sollte zielgerichtet an der später im Alltag oder Sport benötigten Kraft-Geschwindigkeitskurve ausgerichtet werden.

Entscheidend für die Kniegelenksbeanspruchung ist maßgeblich die Beschleunigung und nicht die Last. Daher treten bei Sprüngen größere Kniebeanspruchungen als bei einer kontrollierten Ausführung der Kniebeuge auf.^{iv}

7. Eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit (insbesondere abwärts) erzeugt höhere Kompressions- und Scherkräfte und kann zu Verletzungen der Bandstrukturen im Knie führen.
8. Wenn keine anderweitigen sportartspezifischen Notwendigkeiten bestehen, dann hat sich eine exzentrische Muskelaktionsdauer von 2-3 Sek. als Orientierung bewährt (kontrollierte Bewegungsausführung!).

Dieser Aspekt gilt insbesondere für die Halbkniebeuge.^v

9. Eine breite Fußstellung ist für die Kräftigung der Adduktoren und der Hüftstrecker zu bevorzugen, reduziert jedoch – wenn auch gering – die muskuläre Aktivierung der Kniestreckmuskulatur.
10. Eine enge Fußstellung ist für die Kräftigung des Zwillingswadenmuskels zu bevorzugen.
11. Eine enge Fußstellung reduziert die patello-femorale und tibiofemorale Kompressionskräfte.

12. Eine breite Fußstellung reduziert das „Vorwärtsschieben“ der Knie sowie der Scherkräfte im Knie (für Anfänger geeignet).
13. Bei paralleler Fußstellung ist die muskuläre Aktivität in der letzten Phase des Beugens und der ersten Phase des Streckens, d. h. im Umkehrpunkt bei kontrollierter Bewegungsausführung am größten. Die höchste muskuläre Aktivität ist in der konzentrischen Muskelaktion (Streckbewegung) zu verzeichnen.^{vi}
14. Die Front-Kniebeuge erzeugt im Vergleich zur Standard- oder Nackenkniebeuge eine bedeutsam geringere Kompression im Kniegelenk und bedeutsam geringere Beanspruchung der Lendenwirbel und stellt damit eine Alternative (in den meisten Fällen die bessere Alternative) bei Knie- und Rückenbeschwerden und für die langfristige Gesunderhaltung dar.

Hierbei ist ebenfalls zu beachten, dass die kontrolliert zu bewegendenden Lasten deutlich geringer ausfallen als bei der Standardkniebeuge (back squat)

15. Eine hohe Beanspruchung (Ermüdung) hat einen schädlichen Einfluss auf die technische Ausführung und führt zu Instabilitäten im Knie sowie erhöhten Scherkräften in den Lendenwirbeln.
16. Im hoch beanspruchten Zustand sollte ein „Spotter“ (Helfer) die korrekte Ausführung kontrollieren.
17. Die muskuläre Aktivität ist – wie bei allen Kraftübungen – abhängig von der Höhe der Last und der Bewegungsgeschwindigkeit.

Bei moderaten Lasten unterscheidet sich die Muskelaktivität nicht in Abhängigkeit der „Tiefe“. Dieser Aspekt ist im Fitnessbereich zu beachten, wenn im Gruppentraining keine hohen Lasten bewegt werden (können).^{vii}

18. Kniebeugen auf einem instabilen Untergrund erhöhen die muskuläre Aktivität der Beine und des Rumpfs bei gleicher Last, aber reduzieren die Generierung von Maximalkraft und Schnellkraft, da auf instabilen Untergründen nur geringere Lasten (bei korrekter Bewegungsausführung) verwendet werden können.
19. Die Kniebeuge mit moderaten Lasten ist eine sehr effektive Methode zur Aktivierung der Rumpf stabilisierenden Muskulatur bzw. der sogenannten Tiefenmuskulatur.

20. Die muskuläre Aktivität unterscheidet sich nicht zwischen Front- und Standard- bzw. Nackenkniebeuge bis 70 % des EWM, obwohl bei der Frontkniebeuge eine geringere Last bewegt wird. Allerdings geht die höhere Last bei der Nackenkniebeuge mit einer größeren Oberkörpervorneigung einher, wodurch die Drehmomente im Hüftgelenk größer als im Kniegelenk ausfallen.

Höhere Lasten (> 80 EWM) bei der Nackenkniebeuge gehen mit größeren Muskelaktivitäten in den Hüftextensoren und den Rückenmuskeln einher.^{vi}

21. Die Abwärtsbewegung wird mit dem Gesäß (nicht mit dem Kopf!) eingeleitet. Das Gesäß wird bewusst nach hinten geführt.

22. Die Aufwärtsbewegung wird mit dem Kopf und nicht mit dem Gesäß eingeleitet.

23. Ein Gewichthebergürtel hat keinen Einfluss auf die muskuläre Aktivität.

24. Die größten Kraftzuwächse erfolgen in dem trainierten Winkelbereich, wobei die größten Transfereffekte auf andere sportmotorische Bewegungsfertigkeiten durch die Tiefkniebeuge zu konstatieren sind.

25. Die Tiefkniebeuge bewirkt größere Muskelquerschnittszunahmen als andere Kniebeugevarianten.^{ix}

Squats mit Langhantel zum gezielten Training des M. quadrizeps

„Da bei den tiefen Kniebeugen mit Langhantel die Neigung des Oberkörpers begrenzt ist, wird der Lendenbereich weniger belastet, und die Spannung der großen Adduktoren und der Kniebeuger ist geringer.

Im Gegenzug erzwingt die Position vor der Langhantel dadurch, dass sie den Überhang vergrößert, eine größere Leistung vom Quadrizeps.

Dieser Squat ist also optimal für die Oberschenkel, wird aber stets mit geringerer Belastung ausgeführt als der klassische Squat und sollte zur besseren Standfestigkeit immer mit erhöhten Fersen geübt werden.

Für Personen mit langen Beinen ist dieser Squat aber leider schwer durchzuführen. Wegen des stärker vorgeneigten Oberkörpers fällt es ihnen schwerer, die Langhantel zu halten, die ihnen jederzeit nach vorn herabfallen kann. ^x

Schlussfolgerungen Fußgelenk

1. Die Füße sollen dergestalt “bequem” positioniert werden, dass sich die Knie auf einer Linie mit den Fußspitzen bewegen. ^{xi}
2. Die Fußspitzen sollten bei schulterbreitem Stand für eine korrekte Führung der Kniescheibe (Patella) ca. 7° nach außen rotiert werden.
3. Die Fersen müssen in der exzentrischen Phase fest am Boden “kleben” (Überpronation = “Knickfuß” vermeiden). Eine Gewichtsverlagerung auf die Fersen kann das “Kleben” unterstützen.

Neben einer grundsätzlichen Verbesserung der Beweglichkeit im unteren und oberen Sprunggelenk, wenn die Fersen in der exzentrischen Phase angehoben werden, kann vorübergehend eine Hantelscheibe oder Holzplatte unter die Fersen gelegt werden. Entscheidend ist die Stabilität in der Bewegungsausführung über die gesamte Bewegungsamplitude. ^{xii}

Ein breiterer Stand induziert höhere interne Kräfte bei der Kniebeugung und größere und phasenverschobene innere Kräfte in den Adduktoren. Bei nach außen gedrehten Fußspitzen und breiterem Stand treten geringere Scherkräfte im Knie, insbesondere im mittleren Bewegungsabschnitt auf. Dennoch haben die Unterschiede bei gesunden jungen Probanden höchstwahrscheinlich keine klinische Relevanz (Almosnino, Kingston & Graham, 2013). ⁱⁱⁱ

„Die Geschmeidigkeit der Fußgelenke hat großen Einfluss auf die Ausführung der Squats.

Sei es durch eine eingeschränkte Funktion bei den Muskeln und Sehnen (etwa die mehr oder weniger ausgeprägte Verkürzung der Wadenmuskeln) oder den Knochen, wenn die Dorsalflexion (also das Anziehen des Fußrückens) gemindert ist, wirkt sich massiv auf die Technik der tiefen Kniebeuge aus.

Tatsächlich hemmt die mangelnde Geschmeidigkeit der Fußgelenke das Kippen der Schienbeine und dadurch die Bewegung der Knie nach vorne, so dass sich bei den Squats das Gesäß nach hinten verlagert und der Rücken stark vorgebeugt wird und folglich die großen Gesäßmuskeln und die Rückenstrecker intensiv trainiert werden.

Durch den extremen Überhang des Oberkörpers, den diese Squats bewirken, werden die Muskeln an der Oberschenkelrückseite sowie die großen Adduktoren und die Schlankmuskeln enorm belastet, so dass die Gefahr von Muskelfaserrissen zunimmt.

Wenn die Oberschenkelknochen unter die Horizontale gesenkt werden, wird außerdem der untere Abschnitt der Wirbelsäule gekrümmt, was zugleich die Gefahr von Wirbelerkrankungen erhöht.“^{xiv}

Schlussfolgerungen Kniegelenk

1. Bei zunehmender Beugung vergrößern sich die Scherkräfte im Knie, wenn die Knie deutlich über die Fußspitzen hinaus ragen. Daher ist in der Abwärtsbewegung eine deutliche Vorwärtsbewegung der Knie über die Fußspitzen zu vermeiden, jedoch in geringem Umfang zu tolerieren und zumeist unproblematisch.

Die Ausführung mit den Knien über die Fußspitzen erlaubt einen größeren Kniewinkel in der maximalen Beugung und geringere Veränderungen der stabilen „Bogenspannung“ in der Wirbelsäule sowie geringere Segmentverschiebungen im Rumpf und geringere Beanspruchungen im Hüftgelenk, so dass diese Bewegungsausführungen insgesamt zu einer geringeren Beanspruchung der Wirbelsäule führt. Die Ausführung mit den Knien über die Fußspitzen stellt daher für die meisten Menschen die beste Option der Bewegungsausführung dar (List et al., 2013; Wagner et al., 2010). Dass die Knie gar nicht über die Fußspitzen geführt werden dürfen, sollte daher von Trainern, insbesondere bei Sportlern mit langen Oberschenkeln bzw. Extremitäten nicht überzogen, sondern in geringem Umfang als physiologisch notwendig und weitgehend unbedenklich betrachtet werden.

Des Weiteren ist zu beachten, dass an der Kniestreck-Krafttrainingsmaschine (offene kinematische Kette) die Scherkräfte im Knie deutlich größer als bei der Tiefkniebeuge (geschlossenen kinematische Kette) ausfallen (Chandler & Stone, 1991).

2. Die Vermeidung darf jedoch nicht auf Kosten der Hüfte und der Wirbelsäule erfolgen, da z.B. bei einer Ausgleichsbewegung des Oberkörpers nach vorn, die Scherkräfte im Lendenwirbelsäulenbereich bedeutsam ansteigen.
3. Um tibio- und patellofemorale Kräfte zu reduzieren, erfolgt die Abwärtsbewegung bewusst und kontrolliert ("hinten absitzen").
4. Bei einer Valgusstellung (X-Beine) sollen die Knie bewusst nach außen gedrückt werden.

Ein weiteres Argument gegen die 90°-Kniebeuge betrifft das hintere Kreuzband, da die höchsten Kräfte in dieser Position wirken, wohingegen bei einer größeren Beugung die Zugkräfte wieder abnehmen.^{xviii}

Schlussfolgerungen Hüftgelenk^{xvii}

1. Die Beweglichkeit der Hüfte ist aufgrund der engen Beziehung zwischen Hüfte, Becken und Lendenwirbelsäule ein entscheidendes Kriterium für die korrekte Ausführung einer dynamischen Tiefkniebeuge.

Beziehung zwischen "Tiefe" und Beweglichkeit positiv korreliert!

2. Eine unzureichende Beweglichkeit im Hüftgelenk führt zu einer Vorwärtsneigung des Oberkörpers und erhöht somit die Scherkräfte in der Lendenwirbelsäule.
3. Bei unzureichender Beweglichkeit ist eine Verbesserung der Beweglichkeit notwendig.

Schlussfolgerungen Wirbelsäule^{xviii}

1. Die Wirbelsäule ist das schwächste Teil bei der Tiefkniebeuge.
2. Die natürliche Lordose (Vorwärtskrümmung) ist bei der Kniebeuge über die gesamte Bewegungsamplitude aufrecht zu erhalten, da die Lendenwirbelsäule für Kompressionskräfte besser geeignet ist als für Scherkräfte.
3. Bei der Kniebeuge ist der Kopf aufrecht zu halten und der Blick nach vorn-oben orientiert!
4. Jede Seitwärtsbewegung ist bei der Kniebeuge grundsätzlich zu vermeiden.

Verbesserte Haltung bei den Squats^{xix}:

Um den Lendenbereich zu entlasten und die Spannung in den Kniebeugern zu begrenzen, kann man wie bei den Gewichthebern die Langhantel bis zu den hinteren Faserbündeln des Deltamuskels senken.

Diese Technik mindert den Überhang und erhöht dadurch die Kraft beim Aufrichten des Rückens, was wiederum das Stemmen größerer gewichte ermöglicht.

Mit einem Keil unter den Fersen oder Spezialschuhen für Hanteltraining oder Gewichtheben, reduziert sich der Überhang, weil das Verschieben der Knie die Bewegung des Gesäßes nach hinten verlagert und dies wiederum eine stärkere Beugung der Hüftgelenke bewirkt.

Bei dieser Technik spüren Sie die Arbeit des Quadrizeps stärker. Gleichzeitig wird die Neigung des Oberkörpers wie auch die Belastung des großen Gesäßmuskels und der Rückenstrecker begrenzt.

Durch die Kombination Langhantel tief/Fersen erhöht lassen sich deutlich höhere Gewichte heben. Sie ist Langbeinigen und Personen mit steifen Fußgelenken unbedingt zur Haltungskorrektur bei den Squats zu empfehlen.^{xx}

1. Die Hantelstange liegt bei der Standard- bzw. Nackenkniebeuge nicht auf der Halswirbelsäule, sondern unterhalb des 7. Halswirbels auf dem M. trapezius (Kapuzenmuskel, pars descendens) und dem M. deltoideus (Schultermuskel). Die Position wird auch als „hohe Ablage“ bezeichnet.
2. Bei der Frontkniebeuge liegt die Hantelstange oberhalb der Schlüsselbeingelenke (art. sternoclaviculares) mit proniertem Griff in der Umsetzposition und die Oberarme befinden sich parallel zum Boden.
3. Der gesamte Rücken zeigt eine „Bogenspannung“. Gleichzeitig wird auch die Bauchmuskulatur angespannt, um den Rumpf zu stabilisieren bzw. zu „verriegeln“.

Zusammenfassung

Brad Schoenfeld und Mary Williams haben in einer Kolumne, in der sie zu einer Fachdiskussion zur Tiefkniebeuge aufgefordert haben, die Frage gestellt:

„Are deep squats a safe and viable exercise?“

Unsere Antwort darauf lautet derzeit:

„Ja, das ist sie, sofern keine körperlichen Beschwerden/Schäden vorliegen und die Bewegungstechnik korrekt beherrscht und ausgeführt wird!“^{xxi}

Verweise und Literaturangaben

- i Escamilla, R. F. (2001). Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(1), 127-142. ; Gottlob, A. (2007). Differenziertes Krafttraining mit Schwerpunkt Wirbelsäule (2. Aufl.). München: Urban & Fischer. ; Pernitsch, H. & Brunner, F. (2006). Zur Kniebeuge: Technik - Methodik - Medizin - Biomechanik - Praxis. Zugriff am 18.03.2006 unter <http://www.ssport.at/download/kniebeuge.pdf>; Zawieja, M. (2008). Leistungsreserve Hanteltraining. Handbuch des Gewichthebens für alle Sportarten. Münster: Philippka.
- ii Dörr, J. (1997). Gewichtheben. In M. Engelhardt, B. Hintermann & B. Segesser (Hrsg.), GOTS-Manual Sporttraumatologie (S.238-242). Bern: Hans Huber; Donnelly, DV, Berg, WP, and Fiske, DM. The effect of the direction of gaze on the kinematics of the squat exercise. *J Strength Cond Res* 20: 145-150, 2006; Fitzgerald B & McLatchie GR. Degenerative joint disease in weight-lifters. Fact or fiction? *Br J Sports Med* 14: 97-101, 1980; Gottlob, A. (2007). Differenziertes Krafttraining mit Schwerpunkt Wirbelsäule (2. Aufl.). München: Urban & Fischer; Keogh J, Hume PA, and Pearson S. Retrospective injury epidemiology of one hundred one competitive Oceania power lifters: The effects of age, body mass, competitive standard, and gender. *J Strength Cond Res* 20: 672-681, 2006; Moosburger, K. (2006). Die tiefe Kniebeuge. Ist die tiefe Kniebeuge wirklich gefährlich? Zugriff am 31. Mai 2013 unter <http://www.personal-fitness.at/fit/cms.nsf/open/C4ADD33766866AE3C12571D600361230>; Wirhed, R. (2001). Sportanatomie Bewegungslehre (A. Danguillier & M. Dotter, Übers. 3. Auflage. Aufl.). Stuttgart: Schattauer; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506
- iii Escamilla, R. F. (2001). Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(1), 127-142; Watkins, J. Structure and Function of the Musculoskeletal System. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers, 1999; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506.
- iv Pernitsch, H. & Brunner, F. (2006). Zur Kniebeuge: Technik - Methodik - Medizin - Biomechanik - Praxis. Zugriff am 18.03.2006 unter <http://www.ssport.at/download/kniebeuge.pdf>
- v Behm, DG and Sale, DG. Velocity specificity of resistance training. *Sports Med* 15: 374-388, 1993; Donnelly, DV, Berg, WP, and Fiske, DM. The effect of the direction of gaze on the kinematics of the squat exercise. *J Strength Cond Res* 20: 145-150, 2006; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506.
- vi Markolf, KL, Gorek, JF, Kabo, JM, and Shapiro, MS. Direct measurement of resultant forces in the anterior cruciate ligament: An in vitro study performed with a new experimental technique. *J Bone Joint Surg* 72: 557-567, 1990; Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle Activation in the Loaded Free Barbell Squat: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178; Escamilla, RF, Fleisig, GS, Lowry, TM, Barrentine, SW, and Andrews, JR. A three-dimensional biomechanical analysis of the squat during varying stance widths. *Med Sci Sports Exerc* 33: 984-998, 2001b; Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle Activation in the Loaded Free Barbell Squat: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506.
- vii Fry, AC, Smith, JC, and Schilling, BK. Effect of knee position on hip and knee torques during the barbell squat. *J Strength Cond Res* 17: 629-633, 2003; Gullett, J. C., Tillman, M. D., Gutierrez, G. M. & Chow, J. W. (2009). A biomechanical comparison of back and front squats in healthy trained individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(1), 284-292. doi: 10.1519/JSC.0b013e31818546bb; Bird, S. P. & Casey, S. (2012). Exploring the front squat. *Strength and Conditioning Journal*, 34(2), 27-33. doi: 10.1519/SSC.0b013e3182441b7d; Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle Activation in the Loaded Free Barbell Squat: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178; Kellis, E, Arambatzis, F, and Papadopoulos, C. Effects of load on ground reaction force and lower limb kinematics during concentric squats. *J Sports Sci* 23: 1045-1055, 2005; Stuart, MJ, Meglan, DA, Lutz, GE, Gowney, ES, and An, KN. Comparison of intersegmental tibiofemoral joint forces and muscle activity during various closed kinetic chains exercises. *Am J Sports Med* 24: 792-799, 1996; Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle Activation in the Loaded Free

Barbell Squat: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506.

viii Martuscello, J. M., Nuzzo, J. L., Ashley, C. D., Campbell, B. I., Orriola, J. J. & Mayer, J. M. (2013). Systematic review of core muscle activity during physical fitness exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(6), 1684-1698. doi: 10.1519/JSC.0b013e318291b8da; Willardson, J. M. (2007). Core stability training for healthy athletes: A different paradigm for fitness professionals. *Strength & Conditioning Journal*, 29(6), 42-49; Fry, A. C., Aro, T. A., Bauer, J. A. & Kraemer, W. J. (1993). A comparison of methods for determining kinematic properties of three barbell squat exercises. *J. Hum. Mov. Stud.*, 24, 83-95; Gullett, J. C., Tillman, M. D., Gutierrez, G. M. & Chow, J. W. (2009). A biomechanical comparison of back and front squats in healthy trained individuals. *J. Strength Cond. Res.*, 23 (1), 284-292; Lander, J. E., Bates, B. T. & Devita, P. (1986). Biomechanics of the squat exercise using a modified center of mass bar. *Med. Sci. Sports Exer.*, 18 (4), 469-478; Lander, J. E., Hundley, J. R. & Simonton, R. L. (1992). The effectiveness of weight-belts during multiple repetitions of the squat exercise. *Med. Sci. Sports Exer.*, 24 (5), 603-609; Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle Activation in the Loaded Free Barbell Squat: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178.

ix Clark, D. R., Lambert, M. I., & Hunter, A. M. (2012). Muscle Activation in the Loaded Free Barbell Squat: A Brief Review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 1169-1178; Hartmann, H., Wirth, K., Dalic, J., Klusemann, M., Matuschek, C. & Schmidtbleicher, D. (2013). Auswirkungen eines periodisierten Maximalkrafttrainings in unterschiedlichen Kniebeugevarianten auf das Einer-Wiederholungsmaximum und das isometrische Maximalkraft- und Explosivkraftvermögen. *Leistungssport*, 43(3), 19-26; Hartmann, H., Wirth, K., J., D., Klusemann, M., Matuschek, C. & Schmidtbleicher, D. (2012). Auswirkungen eines periodisierten Maximalkrafttrainings in unterschiedlichen Kniebeugevarianten auf die Schnellkraftleistung im Squat Jump und Counter Movement Jump. *Leistungssport*, 42(5), 40-46.; Weiss, L. W., Fry, A. C., Wood, L. E., Relyea, G. E. & Melton, C. (2000). Comparative effects of deep versus shallow squat and leg-press training on vertical jumping ability and related factors. *J. Strength Cond. Res.*, 14 (3), 241-247; Raastad, T., Karlsen, S., Madsgaard, S., Boesen, M. & Langberg, H. (2008). Effects of heavy strength training with deep or shallow squats on muscle cross sectional area and muscle function. In 13th Annual Congress of the European College of Sport Science, 9-12. Juli 2008, Estoril - Portugal (S. 515). [Der Trainingszeitraum betrug zwölf Wochen, persönliche Mitteilung von Prof. Dr. Raastad am 18.01.2009.] ; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506

x Delavier, F. (2011). *Der neue Muskel Guide* (11. Aufl., S. 132). München: blv.

xi Escamilla, RF. Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Med Sci Sports Exerc* 33: 127-141, 2001.

xii Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497-3506.

xiii Almosnino, S., Kingston, D. & Graham, R. B. (2013). Three-dimensional knee joint moments during performance of the bodyweight squat: Effects of stance width and foot rotation. *Journal of Applied Biomechanics*, 29, 33-43.

xiv Delavier, F. (2011). *Der neue Muskel Guide* (11. Aufl., S. 131). München: blv.

xv Chandler, T. J. & Stone, M. H. (1991). The squat exercise in athletic conditioning: a review of the literature. *National Strength and Conditioning Association Journal*, 13(5), 52-58; Fry, AC, Smith, JC, and Schilling, BK. Effect of knee position on hip and knee torques during the barbell squat. *J Strength Cond Res* 17: 629-633, 2003; List, R., Gulay, T., Stoop, M. & Lorenzetti, S. (2013). Kinematics of the trunk and the lower extremities during restricted and unrestricted squats. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(6), 1529-1538. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182736034; Escamilla, RF, Lander, JE, and Garhammer, J. Biomechanics of powerlifting and weightlifting exercises. In: *Exercise and Sport Science*. Garrett, WE and Kirkendall, DT, eds. Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins, 2000. pp. 585-615

xvi Li G, Zayontz S, DeFrate LE, Most E, Suggs JF, and Rubash HE. In situ forces of the anterior and posterior cruciate ligaments in high knee flexion: An in vitro investigation. *J Orthop Res* 22: 293-297, 2004; Li G, Zayontz S, Most E, DeFrate LE, Suggs JF, and Rubash HE. Kinematics of the knee at high flexion angles: An in vitro investigation. *J Orthop Res* 22: 90-95, 2004; Most E, Li G, Sultan PG, Park SE, and Rubash HE. Kinematic analysis of conventional and high-flexion cruciate-retaining total knee arthroplasties: An in vitro investigation. *J Arthroplasty* 20: 529-535, 2005; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting

kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497–3506

xvii Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497–3506.

xviii Toutoungi, DE, Lu, TW, Leardini, A, Catani, F, and O'Connor, JJ. Cruciate ligament forces in the human knee during rehabilitation exercises. *Clin Biomech* 15: 176–187, 2000; Dionisio, VC, Almeida, GL, Duarte, M, and Hirata, RP. Kinematic, kinetic and EMG patterns during downward squatting. *J Electromyogr Kinesiol* 18: 134–143, 2008; Schoenfeld, B. J. (2010). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(12), 3497–3506.

xix Hartmann, H., Wirth, K., Dalic, J., Klusemann, M., Matuschek, C. & Schmidtbleicher, D. (2013). Auswirkungen eines periodisierten Maximalkrafttrainings in unterschiedlichen Kniebeugevarianten auf das Einer-Wiederholungsmaximum und das isometrische Maximalkraft- und Explosivkraftvermögen. *Leistungssport*, 43(3), 19-26.

xx Delavier, F. (2011). *Der neue Muskel Guide* (11. Aufl., S. 132). München: blv.

xxi Schoenfeld, B. & Williams, M. (2012). Are deep squats a safe and viable exercise? *Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(2), 34-36. doi: 10.1519/SSC.0b013e31824695a3