

# Trainingsinduzierte Adaptation der mechanischen und morphologischen Eigenschaften der Sehne – Effekt der Dehnungsrate und Dehnungsdauer der Sehne

(AZ: 070501/11-13)

*Sebastian Bohm & Adamantios Arampatzis (Projektleiter)*

Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Sportwissenschaft,  
Abteilung für Trainings- und Bewegungswissenschaften

## 1 Problem

Sehnen übertragen die Muskelkräfte auf den Knochen und ihre mechanischen Eigenschaften tragen zur Effizienz alltäglicher Bewegungen bei (Karamanidis, Arampatzis & Mademli, 2008; Lichtwark, Bougoulias & Wilson, 2007) bzw. determinieren athletische Performance wie Sprintleistung (Stafilidis & Arampatzis, 2007) und Laufökonomie (Albracht & Arampatzis, 2013). Desweiteren sind Sehneneigenschaften vor dem Hintergrund der Prävention von Sehnenverletzungen höchst relevant (Fredberg, Bolvig & Andersen, 2008). Sehnen sind anpassungsfähig auf mechanische Belastungen. Die externe Dehnung (Deformation) der Sehne infolge von Muskelkontraktionen wird auf die mechanosensitiven Sehnenzellen übertragen und initiiert Molekularreaktionen, die die mechanischen, morphologischen und Materialeigenschaften von Sehnen bestimmen (Heinemeier & Kjaer, 2011; Lavagnino & Arnoczky, 2005). Mechanobiologisch können vier Parameter der Dehnung den adaptiven Stimulus beeinflussen: die Magnitude, die Frequenz, die Dauer und die Rate (Arnoczky, Tian, Lavagnino, Gardner, Schuler, Morse, 2002; Yamamoto, Kogawa, Tokura, Hayashi, 2005). Jüngste Interventionsstudien unserer Arbeitsgruppe zeigten, dass eine hohe Magnitude (4.5-5.0 %) nötig ist, um Anpassungsreaktionen der Sehne auszulösen und dass eine niedrigere Frequenz stärkere Adaptation hervorruft (0,17 Hz vs. 0,5 Hz) (Arampatzis, Karamanidis & Albracht, 2007; Arampatzis, Peper, Bierbaum & Albracht, 2010). Ein zusätzlicher Effekt der Dehnungsdauer und Dehnungsrate wurde bisher nicht untersucht. Das Sehnenewebe weist viskoelastische Eigenschaften auf (Wang, 2006), sodass die Übertragung der externen Dehnung auf die Sehnenzellen vermutlich zeitabhängig ist und damit eine längere Dehnungsdauer einen zusätzlichen Stimulus darstellt. Weiterhin wurden dehnungsrateabhängige Flüssigkeitsverschiebungen und assoziierte Schubspannungen an der Zellwand als ein weiterer Anpassungsreiz *in vitro* identifiziert (Giori, Beaupre, Carter, 1993; Lavagnino, Arnoczky, Kepich, Caballero, Haut, 2008). Die vorliegende Studie untersucht den Effekt der Dehnungsdauer und der Dehnungsrate auf die Plastizität der mechanischen, morphologischen und Materialeigenschaften der Sehne *in vivo*. Die Dauer und die Rate werden in Bezug zu einem Referenzprotokoll, welches die stärksten Anpassungen in unseren früheren Studien zeigte (Arampatzis, Karamanidis & Albracht, 2007), moduliert. Aufgrund der dargestellten Mechanismen stellen wir die Hypothesen auf, dass (a) eine längere Dehnungsdauer und (b) eine höhere Dehnungsrate der Achillessehne eine stärkere Anpassung der Sehneneigenschaften im Vergleich zum Referenzprotokoll hervorrufen.

## 2 Methode

Zur Untersuchung des Effektes der Dehnungsdauer und der Dehnungsrate wurden zwei separate Trainingsinterventionen (14 Wochen, 4 x/Woche, 5 Sätze) durchgeführt sowie eine passive Kontrollgruppe rekrutiert (N = 13). Die Achillessehne wurde durch isometrischen Plantarflexionen bei 90 % der maximal willkürlichen Kontraktionskraft, die einer hohen Sehnendehnung entspricht, belastet (Arampatzis, Karamanidis, Albracht, 2007). In beiden Interventionen wurde je ein Bein randomisiert mittels des Referenzprotokolls trainiert (4 x 3 s Belastung/3 s Entspannung, Abb. 1). In der ersten Intervention (N = 14) wurden auf dem zweiten Bein 72 Einbeinsprünge pro Satz absolviert, um die Dehnungsrate gegenüber dem Referenzprotokoll mittels der kurzen Bodenkontaktzeiten während des Springens zu modulieren (Faktor ~3, Abb. 1). In der zweiten Intervention (N = 12) wurde eine einzelne 12-sekündige Kontraktion trainiert und damit eine viermal längere Dehnungsdauer appliziert (Abb. 1). Das Belastungsvolumen (Plantarflexionskraft über die Zeit) wurde in allen Protokollen gleichgehalten.

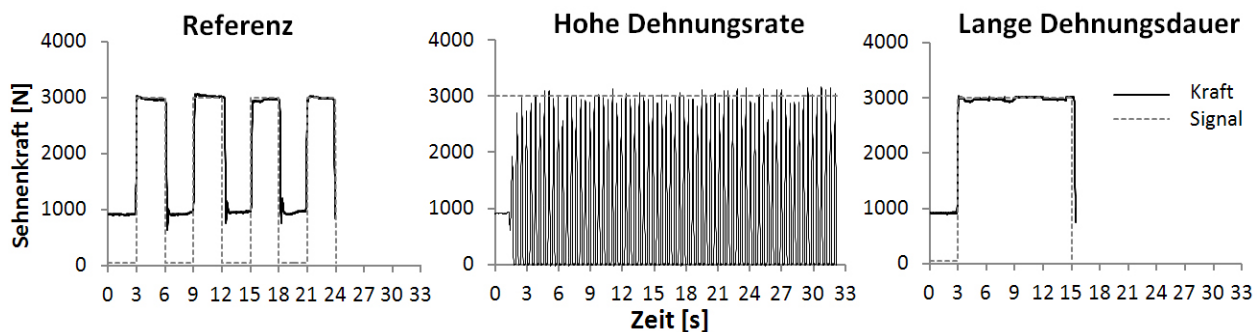


Abb. 1: Belastungsprofil des Referenzprotokolls (4 x 3 s Belastung/3 s Entspannung), des Protokolls mit hoher Dehnungsrate (72 Einbeinsprünge, Erhöhung um Faktor ~3) und mit langer Dehnungsdauer (1 x 12 s Belastung, Erhöhung um Faktor 4) der beiden Interventionen (14 Wochen, 4 x/Woche, 5 Sätze) mit dem selben Belastungsvolumen. Plantarflexionen bei 90 % der maximal willkürlichen Kraft (hohe Dehnungsmagnitude) wurden zur Belastung der Sehne verwendet. Signal: Signal zur Kontrolle der Magnitude und des Belastungsvolumens, Kraft: Plantarflexionskraft über die Zeit

Vor und nach den Interventionen wurden die Sehne aus Magnetresonanztomographiebildern (G-Scan, Esaote, Italy, 0,25 T, 3D HYCE, Schichtdicke 3 mm) rekonstruiert und ihr mittlerer Querschnitt berechnet. Zur Quantifizierung der Sehnensteifigkeit und des Young's modulus führten die Testpersonen maximale Plantarflexionen auf einem Dynamometer (Biodex-System 3, Biodex Medical Systems Inc., USA) aus, bei der die korrespondierende Sehnenelongation mittels Ultrasonographie (My Lab 60, Esaote, Italy) analysiert wurde. Die resultierende Kraft-Elongations-Kurve diente der Berechnung der Steifigkeit und nach Umrechnung in das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis der Kalkulation des Young's modulus. Eine Varianzanalyse für wiederholte Messungen wurde angewandt, um die Effekte der Intervention und der Protokolle zu prüfen (Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$ ).

### 3 Ergebnisse

Das Referenzprotokoll und das Protokoll mit langer Dehnungsdauer induzierte eine signifikante Zunahme ( $p < 0,05$ ) der Sehnensteifigkeit (57 % vs. 25 %, Abb. 2), des Young's modulus (51 % vs. 17 %) und der Querschnitte (4,2 % vs. 5,3 %). Die Zunahme der Steifigkeit und des Young's modulus war stärker ausgeprägt infolge des Trainings mit dem Referenzprotokoll. Obgleich eine regionspezifische Sehnenhypertrophie auch nach dem Training mit der hohen Dehnungsrate detektiert wurde, zeigte die Steifigkeit ( $p = 0,08$ ) und der Young's modulus ( $p = 0,09$ ) nur eine tendenzielle Zunahme. Die Sehneigenschaften der Kontrollgruppe blieben unverändert ( $p > 0,05$ ).

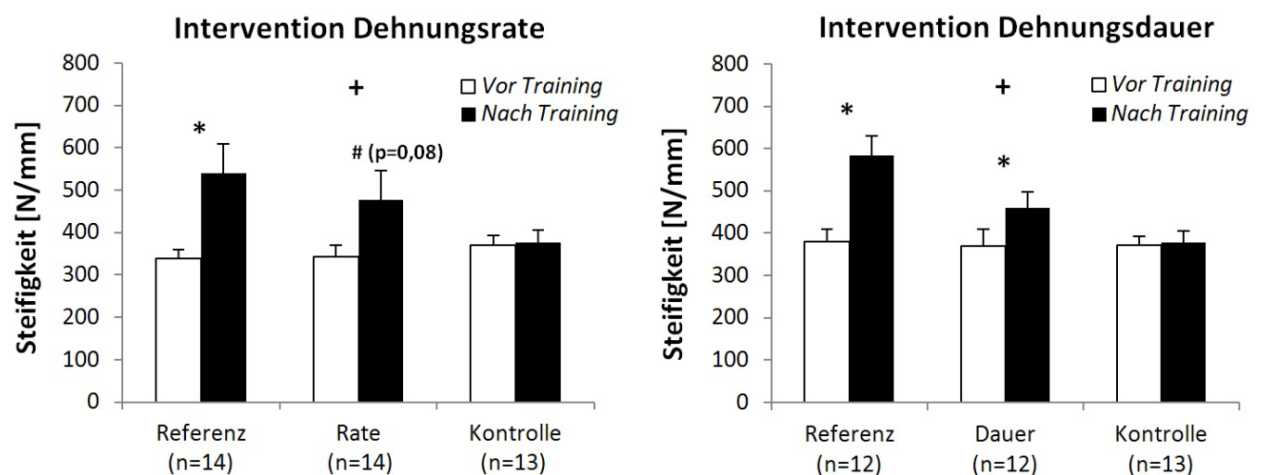


Abb. 2: Steifigkeit der Achillessehne (Mittelwert  $\pm$  Standardfehler) vor (Vor Training) und nach (Nach Training) den Trainingsinterventionen Dehnungsrate und Dehnungsdauer mit dem entsprechenden Referenzprotokoll (Referenz), dem Protokoll mit hoher Dehnungsrate (Rate) und langer Dehnungsdauer (Dauer) sowie für die Kontrollgruppe (Kontrolle).

+ Statistisch signifikante Interaktion der Faktoren Intervention und Protokoll ( $p < 0,05$ ).

\* Statistisch signifikanter Unterschied zwischen vor und nach der Intervention ( $p < 0,05$ ).

(#) Tendenz zu einem Unterschied zwischen vor und nach der Intervention ( $p = 0,08$ ).

### 4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigten eine deutliche Zunahme der Sehnensteifigkeit, des Querschnittes und des Young's modulus infolge des Trainings mit dem Referenzprotokoll und dem Protokoll mit langer Dehnungsdauer aber nicht infolge des Protokolls mit hoher Dehnungsrate. Da keine zusätzlichen Effekte einer langen Dauer und hohen Rate gefunden wurden, mussten beide Hypothesen verworfen werden. Es kann vermutet werden, dass infolge der viskoelastischen Sehnengewebeeigenschaften, die Zeit zur Übertragung der externen Dehnung auf die Sehnenzellen als Anpassungsreiz bei den Einbeinsprüngen (Protokoll hohe Dehnungsrate) zu kurz war und den potenziellen Stimulus der flüssigkeitsverschiebungsassoziierten Schubspannung übertrafen. Die Anpassungen der Steifigkeit und des Young's modulus waren stärker ausgeprägt infolge des Referenzprotokolls im Vergleich zum Protokoll mit langer Dauer. Dieses Ergebnis deutet an, dass obwohl eine bestimmte Dehnungsdauer notwendig ist, der zusätzliche Effekt einer längeren Dauer limitiert ist und der repetitiven Belastung des Referenzprotokolls unterlegen war. Scheinbar erfolgte die Dehnungsübertragung auf zellulärer Ebene als effektiver Adaptationsreiz bereits innerhalb der ersten 3 Sekunden.

Als allgemeine Trainingsregeln für eine effektive Anpassung der Sehne lässt sich ableiten:

- › Trainingsprotokolle sollten hohe Muskelkräfteeinsätze berücksichtigen, um effektive Reize zur Adaptation der Sehne zu bieten, da nur starke aktive Muskelkontraktionen eine hohe Dehnung der Sehne auslösen.
- › Die Dauer der Muskelkontraktion und damit indirekt die Dehnung der Sehne sollte mindestens 3 Sekunden gehalten werden, um eine effektive Übertragung der externen Dehnung auf zellulärer Ebene zu gewährleisten. Bei dynamischen Übungen sollten konsequenter Weise geringe Ausführungsgeschwindigkeiten gewählt werden.
- › Repetitive Belastungen sind geeigneter als konstant langanhaltende Belastungen und höhere Dehnungsraten durch plyometrisches Training scheinen zur Verbesserung der Sehneneigenschaften wenig effektiv.

## 5 Literatur

- Albracht, K. & Arampatzis, A. (2013). Exercise-induced changes in triceps surae tendon stiffness and muscle strength affect running economy in humans. *European journal of applied physiology*, 113, 1605-1615.
- Arampatzis, A., Karamanidis, K. & Albracht, K. (2007). Adaptational responses of the human Achilles tendon by modulation of the applied cyclic strain magnitude. *Journal of experimental biology*, 210, 2743-2753.
- Arampatzis, A., Peper, A., Bierbaum, S. & Albracht, K. (2010). Plasticity of human Achilles tendon mechanical and morphological properties in response to cyclic strain. *Journal of biomechanics*, 43, 3073-3079.
- Arnoczky, S.P., Tian, T., Lavagnino, M., Gardner, K., Schuler, P. & Morse, P. (2002). Activation of stress-activated protein kinases (SAPK) in tendon cells following cyclic strain: the effects of strain frequency, strain magnitude, and cytosolic calcium. *Journal of orthopedic research*, 20, 947-952.
- Fredberg, U., Bolvig, L., & Andersen, N.T. (2008). Prophylactic training in asymptomatic soccer players with ultrasonographic abnormalities in Achilles and patellar tendons: the Danish Super League Study. *American journal of sports medicine*, 36, 451-460.
- Giori, N., Beaupre, G., & Carter, D. (1993). Cellular-Shape and Pressure May Mediate Mechanical Control of Tissue Composition in Tendons. *Journal of orthopedic research*, 11, 581-591.
- Heinemeier, K.M. & Kjaer, M. (2011). In vivo investigation of tendon responses to mechanical loading. *Journal of musculoskeletal and neuronal interaction*, 11, 115-123.
- Karamanidis, K., Arampatzis, A. & Mademli, L. (2008). Age-related deficit in dynamic stability control after forward falls is affected by muscle strength and tendon stiffness. *Journal of electromyography and kinesiology*, 18, 980-989.
- Lavagnino, M. & Arnoczky, S.P. (2005). In vitro alterations in cytoskeletal tensional homeostasis control gene expression in tendon cells. *Journal of orthopedic research*, 23, 1211-1218.
- Lavagnino, M., Arnoczky, S.P., Kepich, E., Caballero, O. & Haut, R.C. (2008). A finite element model predicts the mechanotransduction response of tendon cells to cyclic tensile loading. *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, 7, 405-416.

- Lichtwark, G.A., Bougoulas, K. & Wilson, A.M. (2007). Muscle fascicle and series elastic element length changes along the length of the human gastrocnemius during walking and running. *Journal of biomechanics*, 40, 157-164.
- Stafilidis, S. & Arampatzis, A. (2007). Muscle – tendon unit mechanical and morphological properties and sprint performance. *Journal of sports sciences*, 25, 1035-1046.
- Wang, J.H.-C. (2006). Mechanobiology of tendon. *Journal of biomechanics*, 39, 1563-1582.
- Yamamoto, E., Kogawa, D., Tokura, S. & Hayashi, K. (2005). Effects of the frequency and duration of cyclic stress on the mechanical properties of cultured collagen fascicles from the rabbit patellar tendon. *Journal of biomechanical engineering*, 127, 1168-1175.

### Projektbezogene Veröffentlichungen

- Bohm, S., Mersmann, F., Marzilger, R., Schroll, A. & Arampatzis, A. (2014). Asymmetry of Achilles tendon mechanical and morphological properties between both legs. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, doi: 10.1111/sms.12242.
- Bohm, S., Mersmann, F., Tettke, M., Kraft, M. & Arampatzis, A. (2014). *Human Achilles Tendon Plasticity in Response to Cyclic Strain: Effect of Rate and Duration*. (Revision).
- Bohm, S., Mersmann, F., & Arampatzis, A. (2014) *Chronic Mechanical Loading and Tendon Adaptive Responses: A Systematic Review and Meta-Analysis*. (Revision).

### Transfer:

- Kongress: European Society of Sport Biomechanics
- Kongress: European College of Sport Science
- Trainer-Weiterbildungen