

---

# **Adaptation der mechanischen und morphologischen Eigenschaften von Sehnen – Entwicklung von Trainingsmethoden auf der Grundlage zyklischer Dehnungen der Sehne**

Adamantios Arampatzis (Projektleiter)

Humboldt-Universität zu Berlin  
Abteilung Trainings und Bewegungswissenschaften

## **Einleitung**

In der internationalen Literatur gibt es wenige Forschungsergebnisse, die sich mit der Adaptation der Sehne beim Menschen beschäftigen. Die meisten Informationen über Sehnenadaptation stammen entweder aus Tierexperimenten oder aus kultivierten Kollagenfasern. Forschung zu Trainingsmethoden oder -reizen, die gezielte Adaptationen der mechanischen und morphologischen Eigenschaften der Sehne im Focus haben, existieren kaum. Aus mechanobiologischer Sicht lässt sich feststellen, dass die Dehnungsamplitude, Dehnungsfrequenz, Dehnungsrate und Dehnungsdauer von Sehnenzellen die zelluläre biochemische Antwort (Bosch et al., 2002; Arnoczy et al., 2002; Lavagnino et al., 2003; Yang et al., 2004) und die mechanischen Eigenschaften von Kollagenfasern (Yamamoto et al., 2002; 2003; 2005) beeinflussen. Unserer Kenntnis nach gibt es keine Studie in der internationalen Literatur, die den Einfluss von kontrollierten zyklischen Dehnungsamplituden und Dehnungsfrequenzen auf die mechanischen und morphologischen Eigenschaften der Sehne in vivo untersucht hat. Kenntnisse über den Einfluss der Dehnungsamplitude und Dehnungsfrequenz der Sehne auf die Veränderung ihrer mechanischen und morphologischen Eigenschaften können zur Schaffung von entscheidenden Voraussetzungen für ein effektives und spezifisches Trainingsprogramm zur Sehnenadaptation beitragen und können damit der Trainingspraxis in ihrer langfristigen Trainingsplanung bei der Auswahl von geeigneten Trainingsreizen helfen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, Kenntnisse über den Einfluss der Dehnungsamplitude und Dehnungsfrequenz der Sehne auf die Adaptation ihrer mechanischen und morphologischen Eigenschaften zu gewinnen.

## **Methodik**

Insgesamt wurden 32 erwachsene Personen (Sportstudenten) für alle Untersuchungen rekrutiert. Es wurden zwei Trainingsinterventionsstudien gemacht, wobei gezielt die Amplitude, und die Frequenz der Dehnung der Achillessehne während einer Trainingsperiode modifiziert wurden. Dabei wurden zwei experimentelle Gruppen mit jeweils 11 Personen (Gruppe 1:  $64.1 \pm 5.0$  kg Körpermasse,  $172 \pm 5$  cm Körperhöhe,  $29.5 \pm 5.0$  Jahre; Gruppe 2:  $77.2 \pm 4.1$  kg Körpermasse,  $178 \pm 5$  cm Körperhöhe,  $23.9 \pm 2.2$  Jahre) und eine Kontrollgruppe (kein spezifisches Training) mit 10 weiteren Personen (Kontrollgruppe:  $70.4 \pm 4.5$  kg Körpermasse,  $172 \pm 4$  cm

Körperhöhe,  $28.6 \pm 4.5$  Jahre) gebildet. Der Einfluss der Trainingsinterventionen auf die mechanischen und morphologischen Eigenschaften der Sehne wurde im Anschluss an das Training untersucht.

Die Probanden der Gruppe 1 ( $N = 11$ ) absolvierten wiederholte isometrische Plantarflexionen (3 s Belastung, 3 s Erholung, 5 Sätze pro Trainingstag, 4-mal pro Woche, 14 Wochen). Das eine Bein wurde mit einer geringen Dehnungsamplitude (2.5 - 3.0 %) und das andere Bein mit einer hohen Dehnungsamplitude der Sehne (4.5 - 5.0 %) trainiert. Die Dehnungsamplitude wurde durch das erzeugte Plantarflexionsmoment reguliert. Das gesamte Trainingsvolumen (Integral des Plantarflexionsmomentes über die Zeit) wurde für beide Beine identisch gehalten.

Im Rahmen der zweiten Intervention absolvierte die Gruppe von Probanden ( $N = 11$ ) ebenfalls wiederholte isometrische Plantarflexionen, aber mit unterschiedlicher Frequenz (1 s Belastung, 1 s Erholung, 5 Sätze pro Trainingstag, 4-mal pro Woche, 14 Wochen). Ebenfalls wurden ein Bein mit geringer Dehnungsamplitude (2.5 - 3.0 %) und das andere Bein mit hoher Dehnungsamplitude der Sehne (4.5 - 5.0 %) trainiert.

Die mechanischen und morphologischen Eigenschaften der Achillessehne wurden vor und nach der jeweiligen Trainingsintervention diagnostiziert. Für die mechanischen Eigenschaften der Achillessehne wurde die Dehnungs-Kraft Relation der Sehne und Aponeurose, die Steifigkeit und das Elastizitätsmodul der Sehne betrachtet. Für die Bestimmung der morphologischen (Querschnitt und Länge) Eigenschaften wurde die Achillessehne vom distalen (Calcaneus) bis zum proximalen Teil (Ansatz des M. Soleus) rekonstruiert.

## Ergebnisse

Nach 14 Wochen Training zeigten das maximale Fußgelenkmoment und die maximale Sehnekraft eine statistisch signifikante Zunahme in beiden Beinen. Die Steifigkeit der Sehne und Aponeurose zeigte nur für das mit hoher Dehnungsamplitude trainierte Bein eine Zunahme. Dieses Ergebnis zeigt, dass der gleiche Trainingsreiz unterschiedliche Adaptationseffekte auf Muskel und Sehne verursacht. Die Kontrollgruppe blieb in allen Parameter auf gleichem Niveau (keine statistisch signifikanten Unterschiede im maximalen Moment, Dehnung und Sehnesteifigkeit).

Nach 14 Wochen Training zeigte der Querschnitt (CSA) der Achillessehne bei dem mit geringer Dehnungsamplitude trainierten Bein alle 10 % Sehnenlänge keine statistisch signifikanten Unterschiede im Vergleich zu den Werten vor der Trainingsintervention. Im Bein, welches mit der hohen Dehnungsamplitude und der niedrigen Dehnungsfrequenz trainiert wurde, gab es eine regionspezifische Hypertrophie der Achillessehne. Die Intervention mit der höheren Dehnungsfrequenz hat zu keiner Hypertrophie der Achillessehne geführt.

## Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es Erkenntnisse über den Einfluss der Dehnungsamplitude und Dehnungsfrequenz der Sehne auf die Adaptation ihrer mechanischen und morphologischen Eigenschaften zu gewinnen. Deswegen wurden zwei Trainingsinterventionen mit dem gleichen Trainingsvolumen, aber unterschiedlichen Dehnungsamplituden (~2.9 % vs. ~4.7%) und Dehnungsfrequenzen (0.17 Hz; 3 s Belastung, 3 s Erholung vs. 0.5 Hz; 1 s Belastung, 1 s Erholung) der Achillessehne (d. h. insgesamt vier Trainingsprotokolle) durchgeführt. Nach 14 Wochen Training wurde für beide Trainingsinterventionen nur in dem Bein, welches mit der hohen Dehnungsamplitude trainiert wurde eine Reduktion in der Dehnung der Sehne bei einer gegebenen Sehnenkraft und eine Erhöhung der Sehnensteifigkeit und des Elastizitätsmoduls festgestellt. Darüber hinaus führte das Trainingsprotokoll mit der hohen Dehnungsamplitude (~4.7 %) und der niedrigen Dehnungsfrequenz (0.17 Hz; 3 s Belastung, 3 s Erholung) als einziges zu einer regionsspezifischen Hypertrophie der Achillessehne. Von den vier angewandten Trainingsprotokollen führte dieses Protokoll auch zu der höchsten Zunahme der Sehnensteifigkeit. Diese Befunde liefern Belege für die Existenz einer Schwelle in der Dehnungsamplitude der Sehne die überschritten werden muss, damit die mechanische Belastung effektiv auf die zelluläre Ebene übertragen wird und als Folge zur Regulierung der anabolen Prozesse der Sehnenzellen beitragen kann. Die Resultate weisen außerdem darauf hin, dass eine geringere Dehnungsfrequenz der Sehne (d. h. länger anhaltende Deformation der Sehne) effektiver den Trainingsreiz auf die zelluläre Ebene überträgt, auf der letztlich Trainingsanpassung erfolgt.

Die Folge der erhöhten Krafftigkeiten der Wadenmuskulatur war eine erhöhte maximale Spannung der Sehne während der maximalen willkürlichen Kontraktion (MVC) in beiden Beinen. Andererseits wurde die maximale Dehnung der Sehne während der MVC nur nach dem Trainingsprotokoll mit der geringeren Dehnungsamplitude höher (Training mit 55 % der MVC). Da die Rissdehnung der Sehne nicht signifikant verändert werden kann (Abrahams, 1967; Loitz et al., 1989; Nakagawa et al., 1996) determiniert die maximale erreichte Sehnenstreckung die Beanspruchung der Sehne während der MVC. Deswegen ist zu argumentieren, dass die Beanspruchung der Achillessehne nach dem Training mit dem geringeren Krafteinsatz (55 % MVC) höher wurde, und dass eine Steigerung der tolerierbaren mechanischen Belastungsgrenze der Achillessehne nur im Protokoll mit dem hohen Krafteinsatz (90 % MVC) stattfand. Diese Ergebnisse zeigen, dass (a) Trainingsreize die Anpassungsprozesse einleiten für den Muskel und die Sehne unterschiedlich sind (d. h. es gibt nicht unbedingt eine koordinierte Adaptation zwischen Muskel und Sehne nach einem Krafttrainingsprotokoll) und (b) durch die ausschließliche Adaptation des Muskels wurde die Beanspruchung der Sehne signifikant erhöht. Aus diesem Grund ist ein gezieltes Training zum Aufbau der Sehne notwendig, um auch die Sehnebeanspruchung und so das Verletzungsrisiko zu reduzieren.

## Literatur

- Abrahams, M. (1967). Mechanical behaviour of tendon in vitro. *Medical and Biological Engineering*, 5, 433-443.
- 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 & cytosolic calcium. *Journal of orthopaedic research*, 20, 947-952.
- Bosch, U., Zeichen, J., Skutek, M., Alberts, I., van Griensven, M. & Gässler, N. (2002). Effect of cyclic strain on matrix formation in human patellar tendon derived fibroblasts. *Unfallchirurg*, 105, 437-442.
- Lavagnino, M., Arnoczky, S.P., Tian, T. & Vaupel, Z. (2003). Effect of amplitude and frequency of cyclic tensile strain on the inhibition of MMP-1 mRNA expression in tendon cells: an in vitro study. *Connective tissue research*, 44, 181-187.
- Loitz, B.J., Zernicke, R.F., Vailas, A.C., Kody, M.H. & Meals, R.A. (1989). Effects of short-term immobilization versus continuous passive motion on the biomechanical and biochemical properties of the rabbit tendon. *Clinical orthopaedics related research*, 244, 265-271.
- Nakagawa, Y., Hayashi, K., Yamamoto, N., Nagashima, K. (1996). Age-related changes in biomechanical properties of the Achilles tendon in rabbits. *European journal of applied physiology*, 73, 7-10.
- 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.
- Yamamoto, E., Tokura, S. & Hayashi, K. (2003). Effects of cyclic stress on the mechanical properties of cultured collagen fascicles from the rabbit patellar tendon. *Journal of biomechanical engineering*, 125, 893-901.
- Yamamoto, E., Iwanaga, W., Miyazaki, H. & Hayashi, K. (2002). Effects of static stress on the mechanical properties of cultured collagen fascicles from the rabbit patellar tendon. *Journal of biomechanical engineering*, 124, 85-93.
- Yang, G., Crawford, R.C. & Wang, J.H-C. (2004). Proliferation and collagen production of human patellar tendon fibroblasts in response to cyclic uniaxial stretching in serum-free conditions. *Journal of biomechanics*, 37, 1543-1550.