

Muskel: Hintergrund

Das Skelett dient dem Körper als Stütze und zur Artikulation. Die Knochen fungieren als Gerüst und die Gelenke als Dreh- und Angelpunkte. Skelett- bzw. quer gestreifte Muskeln sind entweder direkt oder über Sehnen - starken Kollagenfaserbündeln - mit den Knochen verbunden.

Mindestens zwei Muskeln arbeiten gewöhnlich antagonistisch. In dieser Anordnung führt die Kontraktion des einen Muskels zur Dehnung bzw. Verlängerung des anderen (Abbildung 1).

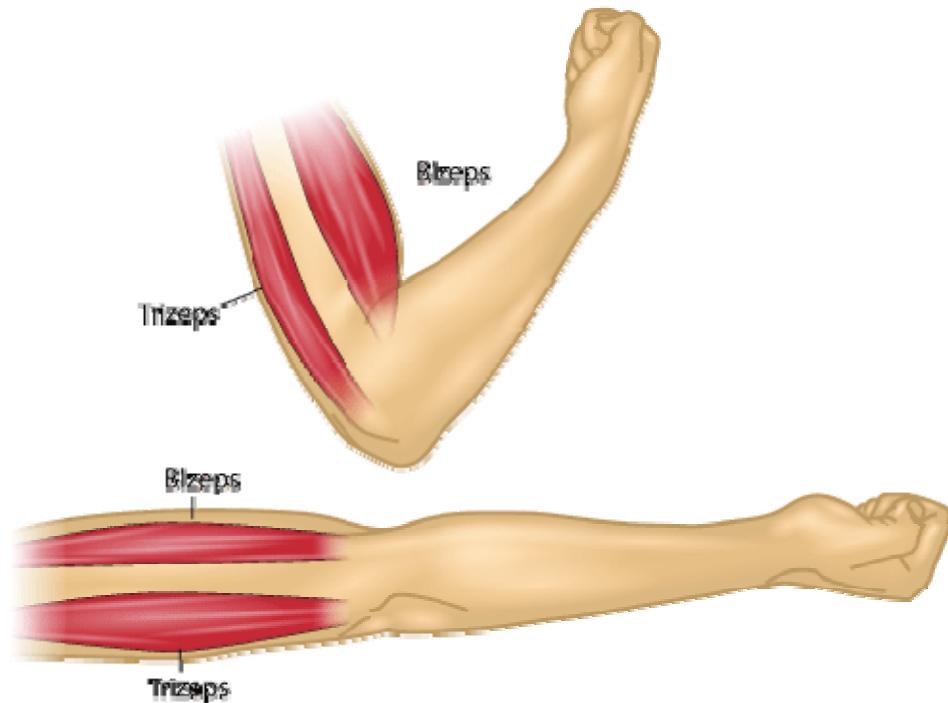


Abbildung 1. Bizeps/Trizeps - Beispiel für zwei antagonistisch arbeitende Muskeln.

Skelettmuskeln setzen sich aus langen, mehrkernigen Zellen zusammen, den so genannten „Fasern“, die in Bündeln zusammengefasst sind (Abbildung 2).

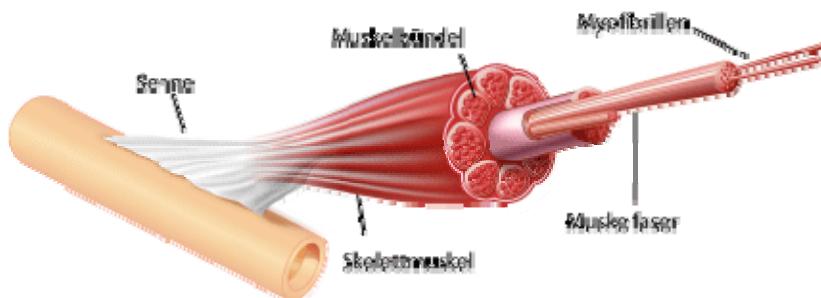


Abbildung 2. Struktur eines Skelettmuskels.

Ein einzelnes motorisches Neuron sowie alle von ihm innervierten Muskelfasern werden als „motorische Einheit“ bezeichnet (Abbildung 3).

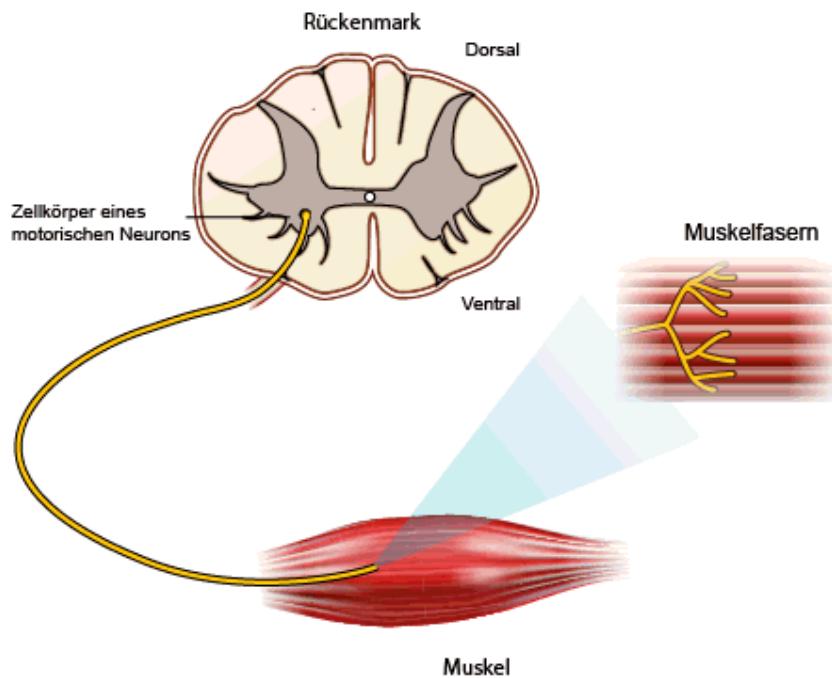


Abbildung 3. Motorische Einheit.

Ein Aktionspotenzial in einem motorischen Neuron führt zur Ausschüttung des Neurotransmitters Acetylcholin in den synaptischen Spalt der motorischen Endplatte und löst dadurch ein Aktionspotenzial in den innervierten Muskelfasern aus. Dadurch steigt die intrazelluläre Konzentration der Calcium-Ionen $[Ca^{2+}]$ kurzfristig an und aktiviert den kontraktilem molekularen Mechanismus in der Faser. Dieser erfordert den Einsatz einer intrazellulären ATP-Versorgung (Adenosintriphosphat) als Energiequelle. Die Folge ist eine kurze Kontraktion, eine so genannte „Zuckung“.

Die Steuerung eines einzigen Muskels setzt die Freisetzung eines Aktionspotenzials in bis zu Hunderten von motorischen Axonen voraus. Diese motorischen Nerven können Bewegungen auf verschiedene Weise steuern. So kann das Nervensystem beispielsweise die Anzahl der Axone regeln, in denen ein Aktionspotenzial ausgelöst wird, und dadurch die Anzahl der kontrahierenden Muskelfasern kontrollieren. Dieser Vorgang wird „Rekrutierung“ genannt.

Eine weitere Möglichkeit zur Steuerung einer Muskelkontraktion durch das Nervensystem besteht darin, die Frequenz der Aktionspotenziale in den motorischen Axonen zu variieren. Bei Reizintervallen von mehr als 200 ms erreicht die intrazelluläre $[Ca^{2+}]$ -Konzentration zwischen den Aktionspotenzialen wieder das Basislinienniveau und die Kontraktion besteht aus separaten Zuckungen. Bei Reizintervallen zwischen 200 und 75 ms liegt die $[Ca^{2+}]$ -Konzentration im Muskel immer noch über dem Basislinienniveau, wenn das nächste Aktionspotenzial eintrifft. Die Muskelfaser hat sich daher nicht vollständig entspannt und die nächste Kontraktion ist stärker als normal. Dieser zusätzliche Effekt wird „Summation“ genannt.

Bei noch höheren Reizfrequenzen hat der Muskel zwischen den aufeinander folgenden Reizen keine Zeit, sich zu entspannen. Das Ergebnis ist eine fließende Kontraktion, die um ein Vielfaches stärker ist als eine Einzelzuckung: eine „tetanische“ Kontraktion. Der Muskel befindet sich nun im „Tetanus“.

Bei einer externen Nervenreizung fühlt der Proband ein kurzes Stechen, ein Kribbeln und ein Zucken im Muskel. Es kann sich ähnlich anfühlen wie die statische Entladung, die man spürt, wenn man seine Füße am Teppich reibt und dann einen Metallgegenstand anfasst. In unseren Übungen sind die einzelnen elektrischen Impulse sehr kurz (weniger als eine Millisekunde). Die Energie der elektrischen Impulse ist nicht hoch genug, um Verletzungen oder Schäden hervorzurufen. Es gibt keinerlei Risiko im Zusammenhang mit diesen kleinen Strömen. Da nichts in die Haut eingeführt wird, besteht keine Infektionsgefahr.

In Übung 1 beobachten Sie Muskelreaktionen, ohne diese aufzuzeichnen. In den Übungen 2 bis 4 messen Sie mithilfe eines Sensors die vom adductor pollicis erzeugten Kräfte (Abbildung 3).

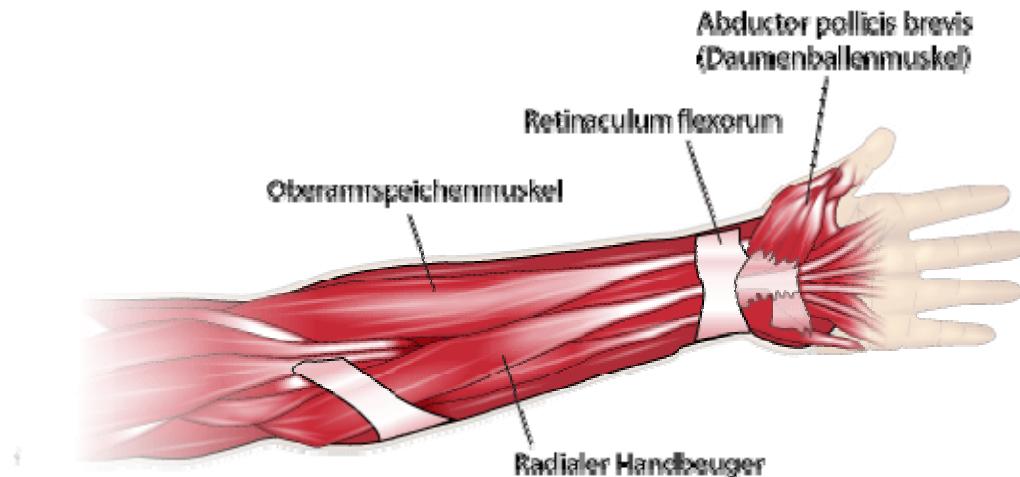


Abbildung 4. Einige Muskeln von Unterarm und Hand.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Phänomen der Muskelermüdung wird in der letzten Übung die von der Hand ausgeübte Greifkraft mit einem Greifkraftsensor gemessen.

Übung 2: Zuckungsreaktion und Rekrutierung

Studienfragen

1. War bei einem Reiz von 0 mA eine messbare Zuckung festzustellen? Was sagt dies über die Anzahl der Muskelfasern aus, die bei diesem Reizstrom kontrahieren?

2. Welche Stromstärke war mindestens erforderlich, um eine Kontraktion zu erzeugen (Schwellenstrom)? Wie groß musste Ihrer Ansicht nach der Anteil der kontrahierenden Fasern im Muskel sein, um diese kleine Reaktion hervorzurufen?
3. Welche Stromstärke war mindestens erforderlich, um die maximale (größte) Kontraktion zu erzeugen? Wie groß muss Ihrer Ansicht nach der Anteil der kontrahierenden Fasern im Muskel gewesen sein, um diese maximale Reaktion hervorzurufen?
4. Wie wirkte sich Ihren Schlüssen zufolge die Steigerung der Stromstärke vom Schwellenwert bis zu dem Wert, der eine maximale Kontraktion erzeugt, auf die Anzahl der Fasern aus?
5. Warum hängt die Zuckungskraft von der Stärke des Reizes ab?

Übungen 3 und 4: Summation und Tetanus

Studienfragen

1. Das Reizintervall hat entscheidende Auswirkungen auf die Kontraktionskraft des Muskels. Erklären Sie mit eigenen Worten, was geschah, wenn der Muskel mehrmals schnell hintereinander gereizt wurde. Welche Zeit war mindestens erforderlich, bis sich die Muskelzuckungen des Probanden zu einer Einzelzuckung addierten (Summation)?
2. Wenn Sie die Reizfrequenz erhöhen, lässt sich eine dauerhafte Kontraktion der Muskelfasern beobachten (Tetanus). Chemische Stoffe können die motorischen Neuronen stören und dadurch Tetanus verursachen. Zu diesen Stoffen gehört ein Toxin, das vom Bodenbakterium *Clostridium tetani* erzeugt wird. Eines der Symptome dieser Stoffe ist die so genannte „spastische Lähmung“. Erklären Sie mit eigenen Worten, warum diese Stoffe für Sie und Ihre Muskeln schlecht sind.

Übung 5: Muskelermüdung

Studienfragen

Das Thema Ermüdung ist noch nicht gänzlich erforscht. Es wird angenommen, dass bei Ermüdung unter anderem folgende Faktoren für die Abnahme der Kraft verantwortlich sind: Änderung des „Anstrengungssinns“, Verlust des „zentralen Antriebs“, Versagen der neuromuskulären Propagation, Reduzierung der Calcium-Ausschüttung zwischen Erregung und Kontraktion, metabolische Veränderungen im Muskel und Verschlechterung der Muskeldurchblutung aufgrund sich zusammenziehender Blutgefäße.

1. Helfen Ihnen die Experimente zu entscheiden, welche Faktoren wichtig sind?
 2. Bei fast allen Probanden lässt die Kraft bei geschlossenen Augen nach (Pseudo-Ermüdung). Dieses Verhalten ist der Ermüdung sehr ähnlich. Dabei handelt es sich jedoch nicht um echte Ermüdung, da die Probanden problemlos rund 40% ihrer Kraft ausüben können, sobald sie die Augen wieder öffnen. Wie lässt sich Pseudo-Ermüdung Ihrer Meinung nach erklären?
1. Summation of frequent muscle twitches to give maximum contraction is called:
- A.Motor unit summation.
 - B.Twitch.
 - C.Facilitation.
 - D.Tetanus.

2. A motor unit is best described as:

- A.All the nerve fibers and muscle fibers in a single muscle bundle.
- B.One muscle fiber and its single nerve fiber.
- C.A single motor neuron and all the muscle fibers that it innervates.
- D.The neuron that provides the central nervous system with information on the state of contraction of the muscle.

3. Which statement about muscle contractions is **not** true?

- A.A single action potential at the neuromuscular junction is sufficient to cause a muscle to twitch.
- B.Once maximum muscle tension is achieved, no ATP is required to maintain that level of tension.
- C.An action potential in the muscle cell activates contraction by releasing $[Ca^{2+}]$ within the muscle cell.
- D.Summation of twitches leads to a graded increase in the tension that can be generated by a single muscle fiber.
- E.The tension generated by a muscle can be varied by controlling how many of its motor units are active.

4. The neuromuscular junction:

- A.Is the junction between the neuron and the skeletal muscle.
- B.Causes the release of neurotransmitter.
- C.Both A and B.

5. In skeletal muscle, a single action potential causes a minimum unit of contraction called:

- A.Tetanus.
- B.Tension.
- C.Twitch.
- D.Summation.

6. How can muscle fibers show a range of responses to different levels of stimulation?

- A.Each muscle fiber contraction is all or none.
- B.A new contraction can occur only after the resting condition is reached.
- C.Following stimulation, the fiber stays contracted.
- D.Individual twitches in the same fiber can summate.