

## 2.4 Muskelalterung – Sarkopenie

Etwa ab dem 30. Lebensjahr kommt es bei beiden Geschlechtern zu einem ersten physiologischen Rückgang der Gesamtmuskelmasse. Diese Abnahme erreicht 25–55% der ursprünglichen Muskelmasse im Alter von über 80 Jahren. Dadurch kommt es zu einer Reduktion an isometrischer, exzentrischer und konzentrischer Muskelkraft (► Kap. 4). Konsequenz dieser sog. Sarkopenie ist ein Verlust an Fitness, Ausdauer, Mobilität und letztendlich Zunahme der muskulären Anfälligkeit für sich potenzierende Mikrotraumen und Fibrosierung (Umbauprozess mit Anreicherung von Bindegewebe). Mehrere Faktoren sind für die Muskelalterung verantwortlich:

- ♦ *Neuronale Faktoren der Muskelalterung:* Unter transsynaptischer Degeneration von Motoneuronen versteht man eine axonale Nervenatrophie mit Minderung der Fähigkeit eines Motoneurons zu expandieren. Daraus resultiert ein Umbau, das sog. Remodelling, der motorischen Einheit mit Denervation der schnellen Muskelfasertypen und Reinnervation durch axonales Aussprossen von langsamen Nervenfasern, sodass in Folge dieses Prozesses ein verändertes motorisches Bewegungs- und Kontraktionsmuster vorliegt. Die Folge ist eine Reduktion der Schnelligkeit der Aktionspotentialfortleitung, der Kontraktionsgeschwindigkeit und somit der Muskelkraft.
- ♦ *Muskuläre Faktoren der Muskelalterung:* Durch das neuronale Remodelling und der metabolisch-oxidativen Grundausstattung der Typ-2-Fasern der Muskulatur sind diese besonders anfällig für Alterungsprozesse. Zusätzlich kommt es zu Fibrosierung und Verfettung des Muskels. Für die Muskelmasse scheint es unterschiedliche molekulare Kontrollsysteme zu geben. In diesem System ist u. a. einerseits der *Insulin growth factor 1 (IGF1)*, der den AKT/TSC2/mTOR-Stoffwechselweg steuert, der Hauptinduktor einer anabolen Muskelhypertrophie. Andererseits scheint Myostatin der katabole Gegenspieler in diesem System zu sein. Weiterhin sind genetisch determinierte Veränderungen in Verbindung mit dem Proteasom-Abbausystem aktiviert.
- ♦ *Mitochondriale Faktoren der Muskelalterung:* Mitochondrien sind die Kraftwerke aller Körperzellen und insbesondere der Skelettmuskulatur. Im Alter kommt es zu einer relativen Abnahme der Gesamtanzahl. Mitochondrien sind aufgrund ihrer hohen Energiebilanz anfälliger für degenerative Veränderungen, die zur Ansammlung abnormer Mitochondrien führen. Ihre besondere genetische Ausstattung führt zu einer höheren

Anzahl von genetischen Unregelmäßigkeiten und schließlich zum Verbrauch der enzymatisch-oxidativen Kapazität. Somit kommt es zu vermehrten Zellstress und letztendlich dem früheren Zelltod. Der Verlust von Mitochondrien trägt zur Minderung der Adenosintriphosphat-(ATP-)Produktion und somit zur Minderung der Kraftleistung entscheidend bei.

- ♦ *Regenerationsverlust durch Satellitenzellproliferation:* Im Rahmen der Muskelalterung erfolgt eine kontinuierliche Abnahme der Fähigkeit durch Satellitenzellen den Gesamtumsatz an Muskelmasse konstant zu halten. Die Regenerationsfähigkeit erschöpft sich fortschreitend.

## 2.5 Muskelstoffwechsel

*Motorische Einheit - Motorische Endplatte - Muskelkontraktion - Molekularer Motor*

Die Einleitung einer Muskelkontraktion ist ein komplexer Prozess, der unter dem Schlagwort »Motorische Einheit« zusammengefasst wird. Elektrische Signale werden im zentralen motorischen Nervensystem des Gehirns (Gyrus postcentralis des Großhirns) über viele »Zwischenstationen« im Großhirn über das Rückenmark und die peripheren Nerven zur sog. *neuromuskulären Endplatte* (Nerv-Muskel-Übergang) übertragen (siehe auch ► Kap. 3.5). Dort öffnen sich Kalziumkanäle, die zur Freisetzung des Neurotransmitters Acetylcholin (ACh) führen. ACh wird am Nervenende freigesetzt und gelangt dann über den sog. *synaptischen Spalt* zur Muskeloberfläche, um dort durch Kanalproteine aufgenommen zu werden (siehe auch ► Kap. 3.5). Diese muskulären Kanalproteine öffnen sich, sodass es zu einem Natriumeinstrom und einer sog. *Depolarisation* der Muskeloberflächenmembran kommt. Durch diese Depolarisation entsteht erneut ein elektrisches Signal, das sog. *Aktionspotential*, das sich über die gesamte Muskelfaseroberfläche ausbreitet. Das Aktionspotential erreicht ein Röhrensystem der Muskelfaser, das sog. T-Tubulus-System und das sarkoplasmatische Retikulum, um hier zu spezialisierten Kalziumkanälen (u.a. den Ryanodin- und Dihydropyridin-Rezeptoren) zu gelangen. Das dort gespeicherte Kalzium wird freigesetzt und erregt die Aktin- und Myosinfilamente, was so zum Start des molekularen Motors und damit zur Muskelkontraktion führt.

## 2.6 Ablauf der Muskelkontraktion

1. Das Gehirn sendet über biochemische Botenstoffe ein elektrisches Signal über das Nervensystem an den Muskel, um eine Bewegung zu starten.
2. Das Signal erreicht die motorische Endplatte der Muskelfaser, wo spezielle biochemische Botenstoffe (Neurotransmitter, insbesondere ACh) freigesetzt werden.
3. Die Neurotransmitter lösen eine elektrische Reaktion in der Muskelfaser aus, die zu einer Freisetzung von Kalzium-Ionen führt.
4. Die Kalzium-Ionen ermöglichen die Interaktion zwischen den sog. Aktin- und Myosinfilamenten in der Muskelfaser, was zur Kontraktion führt (sog. molekularer Motor).
5. Die Aktin- und Myosinfilamente schieben sich gegeneinander, verkürzen die Muskelfaser und erzeugen somit Kraft und Bewegung (sog. Scherengitter).
6. Um die Muskeln wieder zu entspannen, werden die Kalzium-Ionen wieder in die Speicher gelagert und die Kontraktion wird gestoppt.

Dieser Ablauf stellt nur einen Teil des komplexen Vorgangs der Muskelkontraktion dar. Es gibt viele weitere Details und biochemische Prozesse, die bei diesem Prozess eine Rolle spielen. Durch wiederholtes Üben können mithilfe der sog. »neuronalen Plastizität« neue Bewegungen erlernt werden, die dann mit immer mehr Übung zunehmend flüssiger ausgeführt werden können.

## 2.7 Muskel-Energieträger

Muskeln sind entscheidend für Bewegung, Stabilität und die allgemeine Funktion des Körpers. Muskel-Energieträger sind notwendig, damit Muskeln kontrahieren, sowie Kraft, Bewegung und Ausdauerleistung erzeugen können.

Wir Menschen besitzen drei wichtige Energieträger im Körper für unterschiedliche Anforderungen:

- a) ATP (schnelle Energiereserve)
- b) Glykogen (mittelfristige Energiereserve)

## c) Fettsäuren (Ausdauer-Energiereserve)

## Erklärung

- a) *ATP* ist der Hauptenergieträger für die Muskelkontraktion und somit für die Muskelfunktion von entscheidender Bedeutung. *ATP* ist die primäre Energiequelle für Muskelkontraktionen. Wenn ein Muskel kontrahiert, benötigt er Energie, um Arbeit zu verrichten. Diese Energie wird aus der Spaltung von *ATP* in Adenosindiphosphat (*ADP*) und anorganische Phosphate gewonnen.
1. *Schnelle Energiebereitstellung*: Muskelzellen haben nur eine begrenzte Menge an *ATP* gespeichert. Daher werden *ATP* und andere energiereiche Verbindungen wie Kreatinphosphat verwendet, um rasch Energie bereitzustellen, wenn Muskeln schnell kontrahieren müssen (z.B. bei kurzfristigen intensiven Übungen).
  2. *Regeneration von ATP*: *ATP* wird ständig verbraucht und regeneriert, um die Muskelkontraktion aufrechtzuerhalten. Verschiedene Mechanismen zur Energiegewinnung in den Muskelzellen, wie aerobe Glykolyse und oxidative Phosphorylierung, dienen dazu, verbrauchtes *ATP* wiederherzustellen.
  3. *Muskelermüdung*: Bei anhaltender Muskularbeit kann der *ATP*-Spiegel in den Muskelfasern sinken, was zu Muskelermüdung führen kann. Die Regeneration von *ATP* ist daher entscheidend, um die Muskelkontraktion aufrechtzuerhalten und die Ermüdung zu verhindern.
- b) *Glykogen* ist die zweite wichtige Energiequelle für die Muskelfunktion, insbesondere während intensiver und mittel- bis langanhaltender körperlicher Aktivität.
1. *Energiebereitstellung*: *Glykogen* wird in den Muskelzellen gespeichert und dient als kurzfristige Energiequelle für die Muskelkontraktion. Während der Muskularbeit wird *Glykogen* abgebaut und in Glukose umgewandelt, um *ATP* zu produzieren, das die Muskelkontraktion antreibt.
  2. *Ausdauerleistung*: Bei länger anhaltender körperlicher Aktivität, insbesondere Ausdauertraining, spielt *Glykogen* eine entscheidende Rolle. Muskelglykogenspeicher dienen als wichtige Energiereserve, um während des Trainings eine kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen.
  3. *Muskelregeneration*: Nach dem Training oder intensiver körperlicher Aktivität müssen die *Glykogenspeicher* in den Muskeln wieder aufgefüllt werden. Eine angemessene Kohlenhydrataufnahme nach dem

Training trägt dazu bei, die Glykogenspeicher schnell zu reaktivieren und die Muskelerholung zu unterstützen (► Kap. 4.10.3).

4. *Muskelermüdung*: Sinkende Glykogenspiegel in den Muskeln können zur Muskelermüdung beitragen, da die Energieversorgung beeinträchtigt ist.

Insgesamt spielt Glykogen eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung von Energie für die Muskelfunktion und beeinflusst die mittelfristige Leistungsfähigkeit während des Trainings und sportlicher Aktivitäten.

- c) *Fettsäuren* als dritter Energieträger spielen ebenfalls eine wichtige Rolle in der Muskelfunktion, insbesondere bei Ausdaueraktivitäten und während Ruhephasen.

1. *Langfristige Energieversorgung*: Während langanhaltender, moderater körperlicher Aktivität dienen Fettsäuren als wichtige Energiequelle für die Muskeln. Fettsäuren werden aus Fettgewebe mobilisiert und in den Muskelzellen verstoffwechselt, um ATP zu produzieren.
2. *Energieeffizienz*: Im Vergleich zu Kohlenhydraten sind Fettsäuren eine effizientere Energiequelle, da sie mehr ATP pro Molekül produzieren. Dies macht Fettsäuren besonders wichtig für Aktivitäten mit niedriger bis moderater Intensität, bei denen der Körper Zeit hat, Fette als Energiequelle zu nutzen, z. B. bei Langlauf oder Radfahren.
3. *Muskelregeneration*: Fettsäuren spielen auch eine Rolle bei der Muskelregeneration und beim Muskelaufbau. Sie sind an verschiedenen Stoffwechselprozessen beteiligt, die für die Reparatur und das Wachstum von Muskelgewebe nach dem Training notwendig sind.

Obwohl Kohlenhydrate die bevorzugte Energiequelle für intensive, kurz bis mittelfristige Aktivitäten sind, spielen Fettsäuren eine wichtige Rolle bei der Energiebereitstellung, Muskelregeneration und einer langfristigen Muskelfunktion, insbesondere bei Ausdauerleistungen und während Ruhephasen.

## 2.8 Physiologie

Dieses Unterkapitel soll einen Überblick darüber schaffen, welche ausgewählten Muskeln für welche Bewegungen essenziell sind und auf welche bei den in ► Kap. 4 und ► Kap. 5 beschriebenen Trainingsmöglichkeiten ein be-