

„Wenn der Muskel exzentrisch wird ...“ – Energierückgewinnung des Muskels beim Bremsen

„When the Muscle Goes Eccentric ...“ – Energy Recycling in the Braking Muscle

Bei einer konzentrischen Kontraktion verkürzt sich der Muskel und leistet mechanische Arbeit (sog. positive Arbeit) unter Verbrauch von Adenosintriphosphat (ATP), das nach Anlagerung an Myosin gespalten wird (ATPasewirkung). Exzentrisch ist eine Kontraktion, bei der der Muskel eine Dehnung durch äußere Kräfte abbremst (negative Arbeit). Dies erfolgt einerseits wie bei einem Gummifaden durch elastische Rückstellkräfte in Sehnen, Bindegewebe und den Muskelfasern selbst; in letzteren ist besonders das Rieseneiweißmolekül Titin wichtig. Bei physiologischen Muskelängen ist diese „Gummielastizität“ aber gering. Deshalb werden zusätzlich Aktin-Myosinbrücken gebildet, die der Dehnung entgegenwirken. Dies kostet zwar möglicherweise Energie wegen ATP-Verbrauchs, hat aber den Vorteil, dass sich die Kraft wie mit einem Bremspedal abtufen lässt. Außerdem sind die Häuse der Myosinköpfchen elastisch und tragen bei Verbindung mit Aktin zur Bremskraft bei. Die Summe aller Kräfte im Muskel kann bei exzentrischer Kontraktion deutlich höhere Werte als bei konzentrischer erreichen und bei ungewohnten Bewegungen Muskelkater durch Mikrorisse verursachen (3).

Bei negativer Arbeit (z.B. Bergablaufen) wird Bewegungsenergie aufgenommen; was der Muskel damit macht, ist bis heute nicht geklärt. Ein bremsendes Auto mit normalem Verbrennungsmotor verschwendet seine Bewegungsenergie als abgestrahlte Wärme. Eine Straßenbahn benutzt ihren Elektromotor dagegen beim Bremsen als Dynamo und speist Energie ins Netz zurück. Sollte die Natur nicht beim Muskel im Laufe von 500 Millionen Jahren Entwicklung längst eine ähnliche Lösung gefunden haben? Es gibt in der Tat drei Mechanismen, die eine Rolle für die Energierückgewinnung spielen dürften.

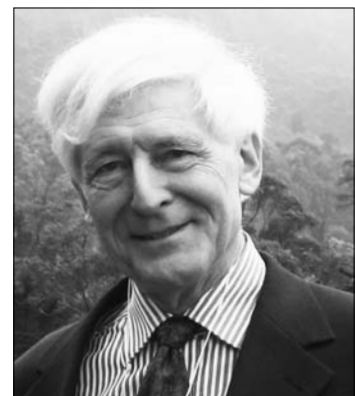
1. Bei raschem Wechsel zwischen konzentrischen und exzentrischen Kontraktionen kann gespeicherte elastische Verformungsenergie aus der Bremsphase die Verkürzung des Muskels unterstützen. Wenn ein Läufer aus der Flugphase landet, wird das Bein zu einer gespannten Feder, die den folgenden Abstoß unterstützt. Die gesparte Energie ist so groß, dass ab einer Mindestgeschwindigkeit die Sauerstoffaufnahme geringer ist als beim Gehen. Wir beginnen dann unwillkürlich zu laufen, weil das leichter ist: ein Problem, mit dem sich die Sportgeher herumschlagen, die beim Laufen disqualifiziert werden. Besonders vollkommen beim Sparen ist das Känguruh, das sich als Zweibeinhüpfer mit großer Geschwindigkeit und weniger Energieverbrauch als Vierbeinläufer bewegen kann (z.B. (5)).

2. Bei Bergabbewegung ist die Sauerstoffaufnahme sehr viel niedriger als bergauf, obwohl doch dauernd ATP zum Bremsen verbraucht werden sollte (1,2). Möglicherweise zieht die Bewe-

gung des Aktins bei der Muskeldehnung das Myosinköpfchen, das eigentlich eine Kippbewegung macht, in die Gegenrichtung und verursacht dabei höhere elastische Kräfte. Dadurch wären weniger ATP-Bindungen nötig. Ein weiterer Mechanismus wurde kürzlich von Brunello et al. (4) mitgeteilt. Jedes Myosinfilament hat 2 Köpfe, die bei konzentrischer Kontraktion aber nie gleichzeitig an das Aktin binden. Dagegen lagern sich beide Köpfe bei exzentrischer Kontraktion an, aber nur für die erste Bindung wird ATP benötigt. Dies könnte eine Halbierung des ATP-Bedarfs bedeuten!

3. Wenn ein isolierter Muskel sich exzentrisch kontrahiert, findet man nur einen Teil der aufgenommenen Bewegungsenergie als Wärme wieder. Wohin ist der Rest verschwunden? Die Wissenschaftler, die diese Messungen bereits vor einigen Jahrzehnten machten, spekulierten, dass die Muskelmaschine beim Bremsen rückwärts läuft und ATP synthetisiert. Der Gedanke ist nicht aus der Luft gegriffen, denn etliche ATPasen wie z. B. aktiv transportierende Ionenkanäle können ATP auch synthetisieren, wenn entsprechende Konzentrationsunterschiede von H^+ (Mitochondrien) oder Ca^{++} (sarkoplasmatisches Retikulum) vorliegen.

In den letzten Jahren wurde diese alte Idee wiederaufgegriffen. Kürzlich haben Loiselle et al. (7) alte und neuere Befunde in einem Übersichtsartikel zusammengefasst und sind allerdings der Meinung, dass es keinen Beweis für ATP-Bildung gibt. In einer der zitierten Arbeiten (6) stellten die Autoren aber fest, dass bis zu 56% der von isolierten Froschmuskelfasern bei exzentrischer Kontraktion aufgenommenen Energie nicht sofort als Wärme abgegeben wurden. Die Speicherung in elastischen Strukturen konnte nur etwa ein Drittel davon erklären. Die Autoren meinen, dass der ATP-Verbrauch für die eigentliche Kontraktion gegen Null geht, glauben aber nicht, dass ATP erzeugt wird, da kurz nach Ende der exzentrischen Kontraktion die gespeicherte Energie doch noch als Wärme frei wird. Ich halte das aber nicht für beweisend, da die Versuche bei etwa 1° stattfanden, also bei stark verlangsamtem



Prof. Dr. Dieter Böning
Sportmedizin
Charité – Universitätsmedizin Berlin

Stoffwechsel. Wegen der Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur Regel sinkt die Geschwindigkeit chemischer Vorgänge je -10° auf etwa ein Drittel. Davon muss die ATP-Synthese als endotherme Reaktion besonders betroffen sein. Wenn Energie zunächst durch Verformung in den Querbrücken zwischengespeichert wird, aber dann keine ATP-Bildung stattfinden kann, muss sie schließlich als Wärme freiwerden. Außerdem könnte die Situation bei wechselnd konzentrisch-exzentrischen Bewegungen, wenn ATP ständig in großen Mengen verbraucht wird, völlig anders sein als bei den hier untersuchten einzelnen exzentrischen Kontraktionen.

Ein möglicher Speicher für neugebildetes ATP bei Bremsarbeit ist Creatinphosphat. Erstaunlicherweise findet man dazu nur eine Veröffentlichung mit Muskelbiopsien bei negativer Arbeit auf dem Fahrradergometer aus dem Jahr 1972 (2). Bei 4 min dauernder positiver Arbeit (230 Watt) fielen Creatinphosphat- und Glykogengehalt im Muskel deutlich ab, während die Laktatkonzentration anstieg. Bei negativer Arbeit blieben alle Werte völlig gleich. Das schließt eine Verwendung von Bremsenergie für die ATP-Synthese aber nicht aus, denn der Muskel hat einen erheblichen Aufwand für die Ionenpumpen in der Zellmembran und im sarkoplasmatischen Retikulum. Vielleicht wurde am Myosin neugebildetes ATP hier sofort wieder verbraucht, statt aus der Oxidation von Kohlehydraten und Fetten gewonnen zu werden?

Man kann gespannt sein, was die Forschung in den nächsten Jahren zu diesem Thema noch herausfindet. Aufklärung könnten vielleicht Magnetresonanzmessungen der Phosphate im Muskel bei Bremsarbeit bringen. Ich würde mich jedenfalls wundern, wenn die Natur nicht längst Energiesparmechanismen benutzen würde, die die Ingenieure noch suchen.

Dieter Böning, Berlin

Literatur

1. ASMUSSEN E: Positive and negative muscular work. *Acta Physiol Scand* 28 (1952) 364-382.
2. BONDE-PETERSEN F, KNUTTGEN HG AND HENRIKSSON J: Muscle metabolism during exercise with concentric and eccentric contractions. *J Appl Physiol* 33 (1972) 792-795.
3. BÖNING D: Muskelkater. *Dtsch Z Sportmed* 51 (2000) 63-64.
4. BRUNELLO E, RECONDITI M, ELANGOVAN R, LINARI M, SUN YB, NARAYANAN T, PANINE P, PIAZZESI G, IRVING M AND LOMBARDI V: Skeletal muscle resists stretch by rapid binding of the second motor domain of myosin to actin. *Proc Natl Acad Sci U S A* 104 (2007) 20114-20119.
5. KRAM R AND DAWSON TJ: Energetics and biomechanics of locomotion by red kangaroos (*Macropus rufus*). *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 120 (1998) 41-49.
6. LINARI M, WOLEDGE RC AND CURTIN NA: Energy storage during stretch of active single fibres from frog skeletal muscle. *J Physiol* 548 (2003) 461-474.
7. LOISELLE DS, TRAN K, CRAMPIN EJ AND CURTIN NA: Why has reversal of the actin-myosin cross-bridge cycle not been observed experimentally? *J Appl Physiol* 108 (2010) 1465-1471.