

THOMAS GRONWALD
KARSTEN HOLLANDER

FUNKTIONELLES KRAFTTRAINING FÜR LÄUFER

**Das Programm, um deine Performance
zu steigern, die Technik zu verbessern
und Verletzungen vorzubeugen**

riva

© 2021 des Titels »Funktionelles Krafttraining für Läufer« von Thomas Gronwald (ISBN 978-3-7423-1845-9) by riva Verlag,
Münchner Verlagsgruppe GmbH, München. Nähere Informationen unter: www.m-vg.de

LAUFSPORT OHNE KRAFTTRAINING – UNDENKBAR

Der Laufsport ist für mich schon sehr lange fester Bestandteil meines Alltags. Ob als Profiläufer oder neben der beruflichen Tätigkeit – ich bin stets auf der Suche nach adäquaten Trainingsmitteln, die meine Leistungsfähigkeit und vor allem meine Belastbarkeit zielführend und zeitökonomisch unterstützen und ausbauen können. Funktionelles Lauftraining, mit dem ich meine Lauftechnik und die aktive Stabilität im Bereich der Hüfte und der unteren Extremitäten verbessern kann, integriere ich schon immer in meine Routinen. Erste Kontakte für ein zusätzliches Krafttraining fand ich nach der Fußballweltmeisterschaft 2006, als durch das interdisziplinäre Expertenteam um Jürgen Klinsmann und Mark Verstegen deutlich wurde, welche innovativen Herangehensweisen für das Krafttraining im funktionellen Bereich für Spportsportler möglich und leistungsfördernd sind.

Ich habe daraufhin versucht, die bestehenden Konzepte auch für mein eigenes Training zu nutzen, um relevante Inhalte für die Performancesteigerung und Verletzungsprävention im Laufsport zu implementieren. Gerade in Trainingsphasen mit sehr hohen Belastungs-

umfängen von bis zu 250 Kilometern pro Woche war es für mich relevant, die Belastbarkeit meines aktiven und passiven Stütz- und Bewegungsapparats insofern vorzubereiten, dass eine schnelle Regeneration möglich ist und es unter anderem zu keinen akuten muskulären Verletzungen kommt.

Nach einem Muskelfaserriss der Hamstrings 2013 habe ich Inhalte des funktionellen Krafttrainings forciert in meine Trainingspläne integriert und regelmäßig körperstabilisierende Übungen in meine



Arne Gabius ist mehrfacher Deutscher Meister über 3000 Meter, 5000 Meter und 10 Kilometer sowie Vize-Europameister über 5000 Meter. Seine Marathonbestzeit liegt bei 2:08:33 Stunden.

Warm-up-Routine eingebaut. Aus meiner eigenen Erfahrung nehmen sich Läufer zu wenig Zeit für eine gezielte Vor- und Nachbereitung ihrer Lafeinheiten. Hier kann ein adäquates Warm-up mit funktionellen Krafttrainingsinhalten helfen, verschiedene Zielstellungen zur Verletzungsprävention und Rumpfstabilisierung zeitökonomisch zu verfolgen. In den letzten Jahren habe ich dem Krafttraining auch eigenständige Trainingseinheiten gewidmet, die sowohl Übungen aus dem Bodyweight-Training als auch Freihanteltraining beinhalten.

Alles in allem kann ich nur Positives über die Kombination von Lauf- und Krafttraining berichten. Ein umfassender Ratgeber zum funktionellen Krafttraining für Läufer ist längst überfällig und sollte in jeder Läuferbibliothek stehen. Die Vielzahl an praktischen Empfehlungen und Übungsbeispielen sowie Ansätze für die konkrete Trainingsplanung machen den vorliegenden Ratgeber von Thomas Gronwald und Karsten Hollander zu einem unverzichtbaren Trainingsmittel. Wenn mir nicht schon ein Exemplar versprochen worden wäre, hätte ich dieses Buch definitiv schon auf meiner Wunschliste.

Viel Spaß beim Trainieren!

Arne Gabius

Profisportler im Mittel- und Langstreckenlauf

KRAFTTRAINING – EIN MUSS FÜR JEDEN LÄUFER

Die Fähigkeit, über Muskulatur Kraft zu produzieren und auf die Körpergelenke zu übertragen, ist für unser Leben und jede Bewegung als essenziell zu betrachten und bleibt unser gesamtes Leben lang von hoher Bedeutung. Generell muss beim bloßen Stand oder beim Aufstehen aus einer sitzenden oder liegenden Position der Körper stabilisiert und der Schwerkraft entgegengewegt werden. Hierfür muss bewusst muskuläre Kraft aufgewendet werden, der wiederum eine neuromuskuläre Ansteuerung vorausgeht. Bewegt sich der Mensch fort, sei es durch Gehen oder Laufen, werden die Anforderungen an die Kraftentfaltung und Koordination der Muskulatur deutlich gesteigert. Da die Muskulatur im Alltag sowie bei sportlichen Aktivitäten fast nie gänzlich isoliert, sondern in Muskelketten arbeitet, die über mehrere Körpergelenke gleichzeitig verlaufen, ist eine funktionelle Betrachtung von Krafttraining entscheidend, um anforderungsgerecht diese essenzielle Fähigkeit trainieren zu können.

Die wohl evolutionär betrachtet traditionellste Form der Fortbewegung ist, neben dem Gehen, das Laufen. Laufen hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer der beliebtesten sportlichen Aktivitäten weltweit entwickelt. Jedes Jahr entscheiden sich mehr Menschen aus verschiedenen Gründen für den Laufsport, um der eigenen Gesundheit etwas Gutes zu tun, die körperliche Fitness zu steigern oder die Leistung im Wettkampf zu verbessern. Leistungssportler haben schon seit Langem den Mehrwert eines funktionellen Krafttrainings neben den läuferischen Trainingsinhalten für sich entdeckt, um die Laufökonomie zu verbessern, die Leistung zu steigern sowie um Verletzungen vorzubeugen. »Funktionell« bedeutet für uns in diesem Zusammenhang »der Funktion und Zielstellung, sprich dem Anforderungsprofil des Laufens, entsprechend«.

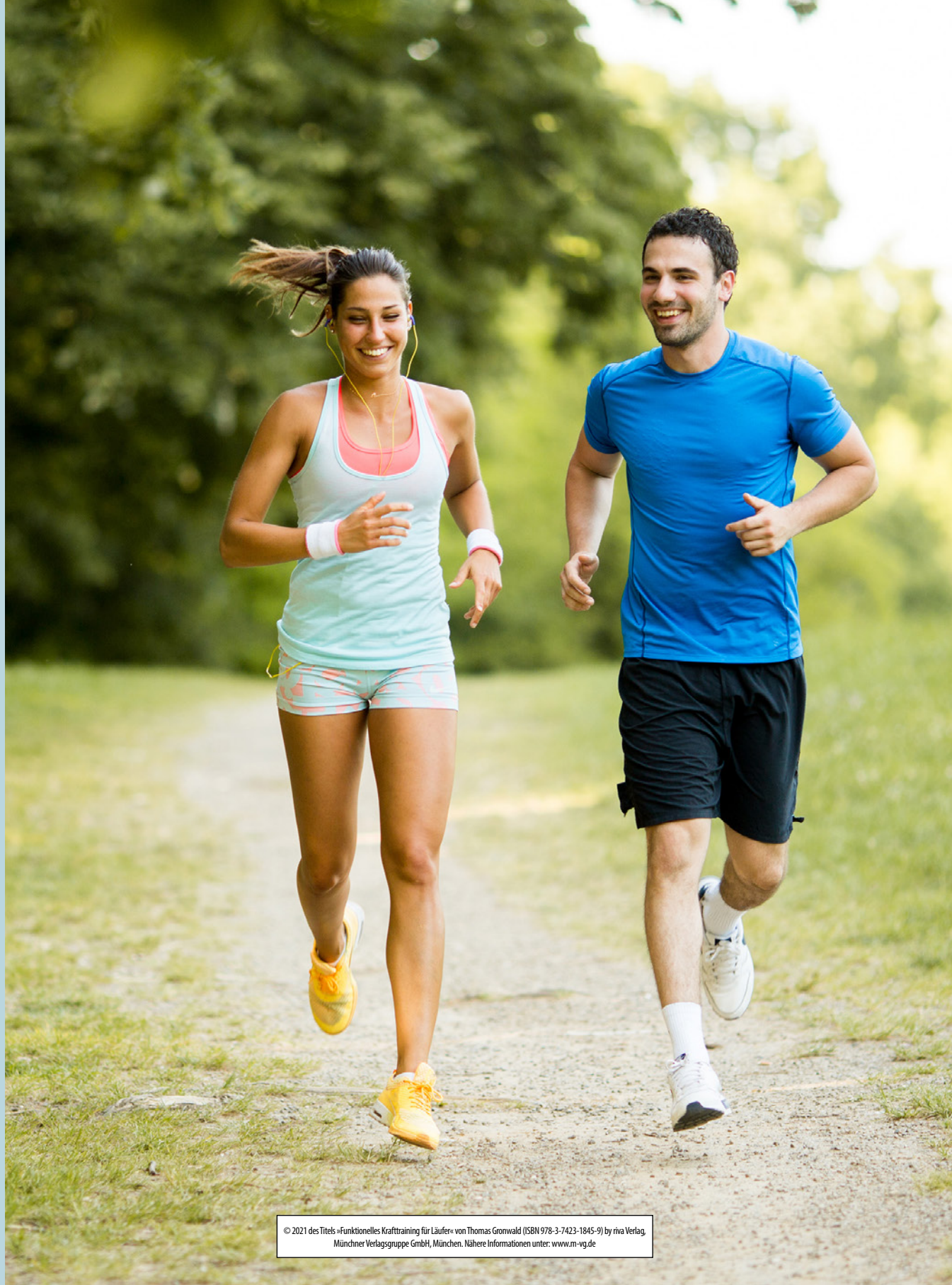
Breiten- und Fitnesssportler müssen ihr Lauftraining in der Regel in den beruflichen und privaten Alltag integrieren und nutzen die Zeit vor allem für das »Sammeln von Kilometern«. Dabei wird oft übersehen, dass das Potenzial, durch ein ergänzendes funktionelles Krafttraining gesünder, länger und schneller laufen zu können, sehr hoch ist. Mit diesem Buch möchten wir dir als leistungsorientiertem Läufer zeitökonomische Möglichkeiten des Krafttrainings, das mit einfachen Mitteln und Methoden umsetzbar ist, vorstellen und dir einen Leitfaden bieten, wie du dieses effektiv in den Trainingsplan einbauen kannst. Richtig eingesetzt, hat ein ganzheitliches und funktionelles Krafttraining zudem weitreichende positive Effekte auf die Körperhaltung und auf die allgemeine Gesundheit, die durch unsere meistens sitzenden Tätigkeiten oft negativ beeinträchtigt sind.

Durch eine einfache Analyse der läuferischen Bewegung ist es möglich, ein Krafttraining funktionell mithilfe von spezifischen Bewegungsmustern und Zielstellungen umzusetzen. Dazu gehören unter anderem knie- und hüftdominante Bewegungen der unteren Extremitäten, um beispielsweise das funktionelle Wechselspiel aus Beugung und Streckung in beiden Gelenken zu trainieren. Darüber hinaus sind Zug- und Druckbewegungen der oberen Extremitäten hilfreich, um beispielsweise Stabilität im Schultergürtelbereich aufzubauen. Zudem ist die Stabilität in Schultergürtel, Rumpf und Becken essenziell, um den Vortrieb kraftvoll und zugleich ökonomisch zu gestalten. Weiter von Bedeutung ist die einbeinige Standphase, die das Laufen neben der Flugphase im Vergleich zum Gehen ausmacht. Hierbei werden sogenannte reaktive und zugleich explosive Anforderungen vor allem an die Muskulatur der unteren Extremitäten gestellt, die auch im funktionellen Krafttraining abgebildet werden sollten. Außerdem spielt die Basis der Fuß- und Sprunggelenkmuskulatur eine entscheidende Rolle, die mit einigen effektiven Übungen gekräftigt werden kann.

In diesem Buch findest du, basierend auf den Anforderungen des Laufens, einen umfassenden Überblick, warum und in welcher Form ein funktionelles Krafttraining für Läufer so wichtig ist und wie du es im (läuferischen) Alltag umsetzen kannst. Wir zeigen dir über 80 Übungen für die Praxis, die detailliert beschrieben und bebildert sind. Neben einer ausführlichen Einführung erhältst du außerdem Anregungen für die selbstständige Trainingsgestaltung und den sinnvollen Einbau der Krafteinheiten in deine Trainingsplanung.

Viel Spaß beim Lesen und Trainieren!

Thomas Gronwald, Karsten Hollander



1

EINE REISE DURCH DEN KÖRPER – PHYSIOLOGIE FÜR LÄUFER

WAS IM KÖRPER WÄHREND DES LAUFENS PASSIERT

Das Gehen und Laufen sind die wichtigsten Fortbewegungsarten des Menschen. Immer mehr Menschen haben das Laufen als Trainingsform entdeckt, um ihre körperliche Aktivität zu steigern, Kondition aufzubauen, die in allen Sportarten leistungsfähiger macht und einen auch den Alltag leichter bewältigen lässt.

In Abhängigkeit von der Zielstellung ist das Anforderungsprofil des Laufens geprägt durch verschiedene Arten des Energiestoffwechsels. Die Energiebereitstellung ist unmittelbar damit verknüpft, wie die Muskulatur arbeitet und ebenfalls mit relevanten Ermüdungsprozessen. Zusätzlich zu diesen physiologischen Prozessen spielt die Lauftechnik eine Rolle, die eng an die Anatomie und die Biomechanik des Stütz- und Bewegungssystems gebunden ist. Die Schrittlänge und Schrittfrequenz spielen ebenso eine Rolle wie die Art und Weise, wie der Läufer den Fuß aufsetzt. Die grundlegenden Aspekte der fürs Laufen bedeutenden physiologischen Prozesse sowie der individuellen Biomechanik werden wir dir in diesem Kapitel näherbringen und begründen, warum du regelmäßig ein Krafttraining in deinen Lauf-Trainingsplan einbeziehen solltest.

Die Grundlagen des Energiestoffwechsels

Während des Gehens und Laufens benötigt der Körper Energie, um alle dafür nötigen Funktionen aufrechterhalten zu können. Die Energie wird in Form des universellen Energieträgers Adenosintriphosphat (ATP) in den Körperzellen bereitgestellt. Aus einem Kilogramm ATP werden 30,3 Kilokalorien (kcal) oder 126,8 Kilojoule (kJ) Energie freigesetzt, wenn enzymatisch ein energiereiches Phosphat abgespalten wird. Da dem Körper insgesamt nur circa 80 Gramm ATP zur Verfügung stehen, muss dieses kontinuierlich regeneriert werden. Zur Veranschaulichung: Bei einer maximalen körperlichen Belastung würde die von allen ATP-Speichern bereitgestellte Energie nur circa 2 bis 3 Sekunden ausreichen. Deshalb stehen dem Körper zur Regeneration verschiedene alternative Energiespeicher zur Verfügung, die sich sowohl in der Regenerationsrate als auch in der Menge gespeicherter Energie deutlich unterscheiden. Diese Energiespeicher sind im Wesentlichen die folgenden drei:

1. Der mengenmäßig kleinste Speicher ist der **Kreatinphosphatspeicher**. In ihm wird eine energiereiche Phosphatverbindung abgespalten, die dafür genutzt wird, ein neues ATP-Molekül aus Adenosindiphosphat (ADP) zu regenerieren. Dieser Prozess erfolgt

sehr schnell und ist bereits nach circa 10 Sekunden erschöpft. Die Dauer hängt davon ab, wie trainiert eine Person ist. Bei wenig trainierten Sportlern reicht der Prozess für circa 6 Sekunden, bei hoch trainierten Sportlern kann er bis circa 20 Sekunden anhalten. Dieses hohe Tempo, mit dem dieser Vorgang vonstattengeht, ist der Grund, warum der Kreatinphosphatspeicher eine bedeutende Rolle im Sprint bei einer Distanz von 100 bis 200 Metern spielt, aber eine untergeordnete Rolle bei längeren Belastungen wie dem Laufen.

2. Der nächstgrößere zur Verfügung stehende Speicher ist der **Kohlenhydratspeicher**. Hier unterscheidet man die frei im Blut zirkulierenden Kohlenhydrate, den Blutzucker, und die Speicherform der Kohlenhydrate, das Glykogen. Den kleineren Speicher von beiden bildet der Blutzucker und insbesondere die freie Glukose – Traubenzucker – im Blut. Ein Glukose-Molekül kann unter vollständiger Verbrennung zur Resynthese von 36 Molekülen ATP genutzt werden. Je nach Ernährungszufuhr befinden sich circa 4 bis 8 Gramm Zucker in unserem Blut.
3. Wenn nach einer Mahlzeit viel Glukose in unserem Blut zirkuliert, kann es in die Speicherform **Glykogen** überführt werden. Glykogen als Speicherform der Kohlenhydrate kann mit der Energie liefernden Stärke in Pflanzen verglichen werden, die die Pflanze braucht, um Zellwände aufzubauen und um zu wachsen. In unserem Körper gibt es zwei Glykogenspeicher, einen in der Leber und einen in der Skelettmuskulatur. Letzterer hat eine große Bedeutung für die Trainingsbelastung und den Leistungsaufbau im Laufsport. Während der Leberglykogenspeicher relativ konstant 100 bis 150 Gramm Glukose bei einem 75 Kilogramm schweren Mann speichern kann, variiert der Muskelglykogenspeicher zwischen 200 und 400 Gramm. Wie groß Letzterer tatsächlich ist, lässt sich beeinflussen, denn er kann trainiert werden. Dennoch reichen die Muskelglykogenspeicher bei Belastung im extensiven Bereich, das heißt unter Nutzung von Sauerstoff, also im aeroben Stoffwechsel, oft nur für 60 bis 90 Minuten. Diese Dauer ist unter anderem abhängig vom Trainingsstand.
4. Als letzter Energiespeicher im menschlichen Körper ist der **Fettspeicher** zu nennen. Der Fettspeicher kann für die Regeneration vieler Zehntausender ATP-Moleküle durch Verbrennung genutzt werden, genauer durch Beta-Oxidation, den oxidativen – unter Mithilfe von Sauerstoff – Abbau von Fettsäuren. Die Energie, die aus den Fettspeichern regeneriert wird, steht dem Organismus am langsamsten zur Verfügung, bleibt aber auch länger verfügbar. Selbst bei schlanken Läufern könnte dieser Speicher für mehrere Marathonläufe dienen.

In selteneren Fällen können auch Proteine zur Resynthese von ATP verstoffwechselt werden. Dieser Vorgang geschieht aber eher in Phasen von Krankheit, Unterernährung oder gegen Ende einer längeren und intensiven Laufbelastung ab einer Dauer von über 90 Minuten.

Formen des Energiestoffwechsels

Zum tieferen Verständnis der Funktionsweise der Muskulatur sollen die verschiedenen Formen des Energiestoffwechsels noch genauer beleuchtet werden. Allgemein werden zwischen Stoffwechselprozessen in Abwesenheit von Sauerstoff (anaerob) und in Anwesenheit von Sauerstoff (aerob) unterschieden.¹ Die anaeroben Stoffwechselprozesse sind dabei schneller verfügbar, aber auch schneller erschöpft. Für die aeroben Stoffwechselprozesse ist genau das Gegenteil der Fall: Sie zeichnen sich durch eine langsamere, aber auch längere Verfügbarkeit aus.

Die anaeroben Stoffwechselprozesse finden innerhalb einer Muskelzelle statt. Die erste und schnellste Form der Energiebereitstellung erfolgt über die Abspaltung eines energiereichen Phosphatrestes von Kreatinphosphat.² Kreatinphosphat liegt in jeder Muskelzelle in ungefähr drei- bis vierfacher Menge im Verhältnis zum ATP vor. Damit Kreatinphosphat abgespalten werden kann, ist das Enzym Kreatinkinase notwendig. Dieses Enzym kann beispielsweise durch Schnellkrafttraining gezielt vermehrt werden. Ebenso wird eine Vergrößerung des Kreatinphosphatspeichers durch Schnellkrafttraining erreicht.

Neben dieser schnellen Form der ATP-Regeneration läuft auch die anaerobe Glykolyse im Körper ab, also die Verstoffwechselung von Glukose ohne Sauerstoff. Hierbei wird die sowohl im Blut als auch im Glykogen vorhandene Glukose genutzt. Im ersten Schritt der Glykolyse wird Glukose zu Pyruvat, einem Salz der Brenztraubensäure und einem wichtigen Zwischenprodukt verschiedener Stoffwechselwege, aufgespalten, wovon zwei ATP-Moleküle regeneriert werden können.³ Das Pyruvat verursacht hierbei allerdings eine negative Rückkopplung, das heißt Verlangsamung, in Bezug auf die Glykolyse und wird umgehend in Laktat, die Milchsäure, umgewandelt und von der Zelle in das Blut abgegeben. Das Laktat kann als Stoffwechselzwischenprodukt für verschiedene Prozesse im Körper genutzt werden, zum Beispiel für die erneute Energiebereitstellung. Sie wirkt jedoch leistungslimitierend, wenn sie im Übermaß vorhanden ist. In diesem Fall spricht man von »Übersäuerung«.

Die Glykolyse spielt eine wichtige Rolle dabei, das Leistungsvermögen über längere Zeit aufrechtzuerhalten, und wird beispielsweise über den gezielten Einsatz von Intervalltraining

verbessert. Gerade im Bereich des Langsprints und der Mittelstrecke bei einer Distanz von 400 bis 5000 Metern stehen die Vermehrung der für die anaerobe Glykolyse notwendigen Enzyme sowie die möglichst lange Aufrechterhaltung der Bewegung trotz Ansammlung von Laktat im Blut im Vordergrund des Trainings. Durch dieses Training werden die sogenannte Laktatschwelle und die Laktattoleranz, die Pufferkapazität, im Körper erhöht, wodurch die Leistungsfähigkeit steigt.

In Anwesenheit von Sauerstoff kann Glukose auch über den Zwischenschritt Pyruvat vollständig zu Kohlendioxid und Wasser verstoffwechselt werden. Dieser Prozess wird aerobe Glykolyse oder auch Zellatmung genannt und erfolgt in den Mitochondrien der Muskelzellen.⁴ Hierbei können weitere circa 34 ATP-Moleküle aus einem Glukosemolekül regeneriert werden. Ein wesentliches Ziel von Ausdauertraining ist die Vermehrung der an diesem Stoffwechselschritt beteiligten Enzyme und die Vergrößerung der Glykogenspeicher.

Die langsamste, aber ausdauerndste Form der Energiegewinnung ist die aerobe Verstoffwechselung von Fettsäuren, die bereits erwähnte Beta-Oxidation. Dieser Prozess erfolgt in den Mitochondrien der Muskelzellen. Ein Mol Fettsäuren kann hier zur Resynthese von 130 Mol ATP genutzt werden. Dieser Stoffwechselprozess steht insbesondere bei langen Ausdauerbelastungen mit niedriger Intensität im Vordergrund, zum Beispiel beim Marathon.

Im Körper laufen alle Stoffwechselprozesse gleichzeitig ab, auch wenn ein Prozess zu bestimmten Zeitpunkten der Belastung je nach Intensität und/oder Dauer dominant ist. Körperliches Training führt generell zur Verbesserung und Vermehrung der Enzyme für die jeweiligen Stoffwechselprozesse und sorgt für die Vergrößerung der Energiespeicher, vor allem des Muskelglykogens.

Bedeutung und Funktion von ATP für die Muskulatur

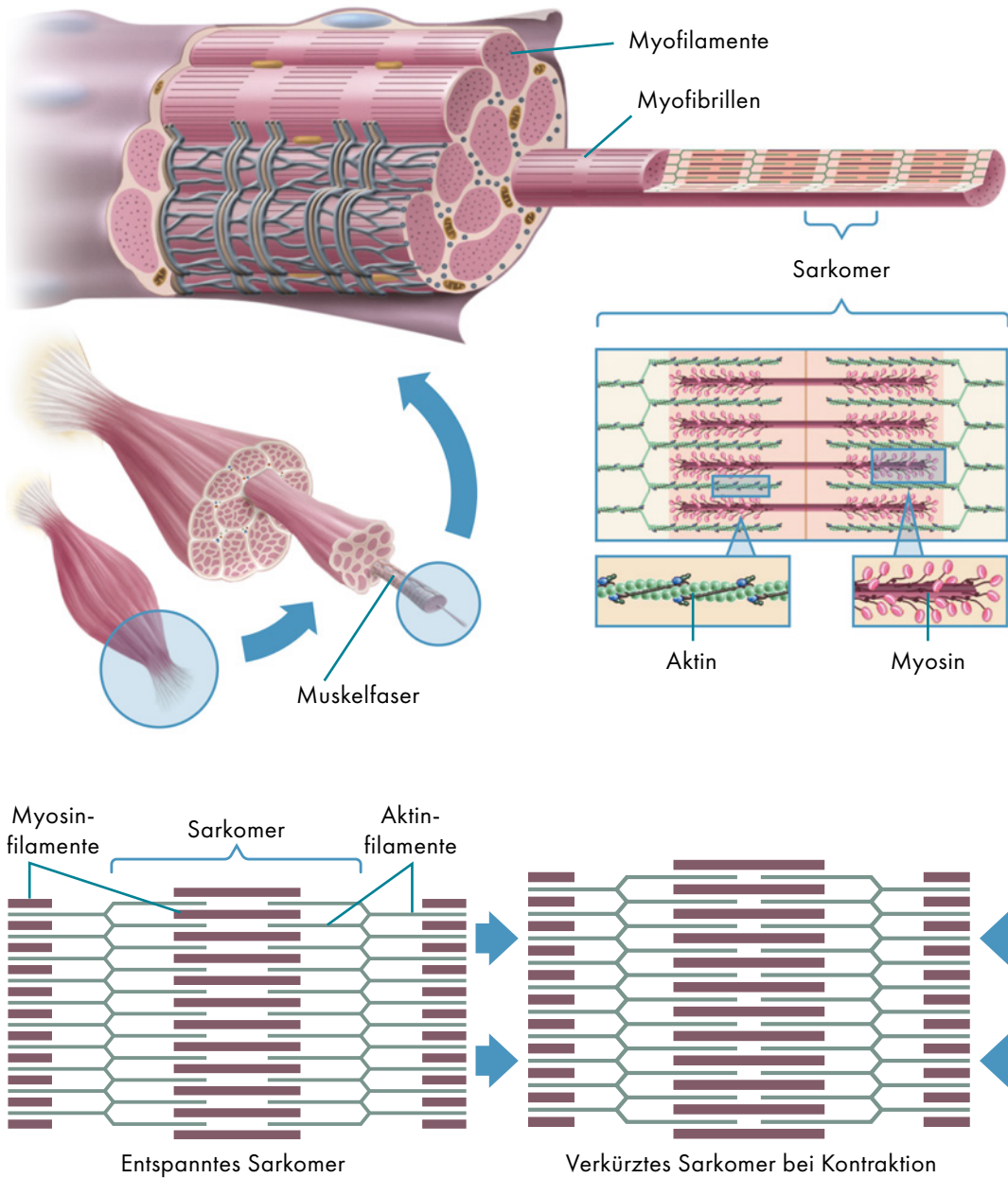
Für die Funktion der Muskulatur ist ATP von entscheidender Bedeutung. Die wesentliche Funktion der Muskulatur besteht in der Fähigkeit, sich zusammenziehen zu können, was Kontraktion genannt wird. Die Kraftentwicklung der Muskulatur entsteht durch das Zusammenspiel der Filamentproteine Aktin und Myosin in der Muskelzelle. Im Ruhezustand sind Aktin und Myosin nicht miteinander verbunden. ATP ist an kleinen Fortsätzen des Myosins, den Myosinköpfen, gebunden, die sich in einem 90-Grad-Winkel in einer Art Vorspannung zum Aktinfilament befinden. Bei einem ankommenden elektrischen Signal, das als Stimulus für die Kontraktion fungiert, werden Kalziumionen ausgeschüttet und aktivieren ein

ATP-spaltendes Enzym an den Myosinköpfen. Durch diese von Magnesium abhängige Aktivierung wird das energiereiche Phosphat vom ATP abgespalten und es entsteht ADP und damit Energie. Außerdem sorgt das Kalzium für die Freigabe der Myosinbindungsstelle des Aktinfilaments, wodurch eine Querverbindung zwischen Myosin und Aktin gebildet wird. Bei der Abgabe des Phosphates und der Energie vom Myosinköpfchen kippen Letztere um circa 45 Grad. Die Energie der 90-Grad-Vorspannung wird genutzt, um das Aktinfilament aktiv zwischen die Myosinfilamente zu schieben, sodass sich der Muskel kontrahiert. Dieser Vorgang wird als Filamentgleittheorie beziehungsweise Querbrückenzyklus bezeichnet. Bei einer erneuten Bindung von ATP löst sich die Bindung von Myosinköpfchen und Aktin wieder und es kann ein neuer Kontraktionszyklus vorbereitet werden.

Mehrere Kontraktionszyklen können so lange aufeinanderfolgen, solange genügend ATP in der Muskelzelle zur Verfügung steht. Eine starke körperliche Belastung mit damit einhergehendem ATP-Mangel kann jedoch zu einer vorübergehenden festen Bindung des Aktin-Myosin-Komplexes führen und somit zu einer reduzierten muskulären Funktionsfähigkeit. Dieser Vorgang wird unter anderem als eine mögliche Ursache für Muskelkater angesehen. Fest steht: Die Verfügbarkeit von ATP ist essenziell für die Funktionsweise der einzelnen Muskelzelle und damit auch der gesamten Muskulatur.

Unterschiedliche Muskeltypen

Nach dem mikroskopischen Erscheinungsbild gibt es zwei Typen von Muskulatur im menschlichen Körper: die quer gestreifte und die glatte Muskulatur. Zur quer gestreiften Muskulatur zählen die Skelettmuskulatur und die Herzmuskulatur, wobei Letztere noch einmal eine Sonderrolle einnimmt. Die glatte Muskulatur ist vor allem an den inneren Organen und den Blutgefäßen zu finden, deren Funktionen über unwillkürliche Bewegungen gesteuert werden. Die Skelettmuskulatur ist für die willkürliche, das heißt, vom Willen gesteuerte, aktive Bewegung des Körpers zuständig. Insgesamt besitzt der gesunde Mensch über 650 Muskeln, die sich in ihrer Gestalt und Funktion teils deutlich unterscheiden. So ist beispielsweise der große Gesäßmuskel (*Musculus gluteus maximus*) in der Regel der volumenmäßig größte Muskel im menschlichen Körper, während sich der stärkste Muskel im Bereich des Gesichts vom Jochbein bis zum Unterkiefer zieht und, meist als Kaumuskel (*Musculus masseter*) bezeichnet, maßgeblich an der Kaufunktion beteiligt ist.



Zu sehen ist die Bauweise der Muskulatur von der Ultrastruktur über die Muskelfaser bis hin zur Myofibrille sowie der Aktivitätsvorgang der Aktin- und Myosinfilamente bei der Muskelkontraktion.

Wie die Skelettmuskulatur klassifiziert werden kann

Die Skelettmuskulatur lässt sich nach verschiedenen Systemen klassifizieren, zum Beispiel nach der Lokalisation – wie Rumpf und Extremität –, aber auch nach Kriterien der makroskopischen Anatomie und der funktionellen Anatomie. In der makroskopischen Anatomie unterscheidet man nach der Anzahl der Muskelköpfe. Es wird unterschieden in:

- einköpfige Muskeln, wie den *Musculus soleus*, den Schollenmuskel,
- zweiköpfige Muskeln, zu denen der *Musculus biceps femoris*, der Beinbeuger, gehört,
- dreiköpfige Muskeln, etwa den *Musculus triceps brachii*, kurz Trizeps, und
- vierköpfige Muskeln, zum Beispiel den *Musculus quadriceps femoris*, kurz Quadrizeps.

Funktionell lassen sich Muskeln über die Anzahl der bewegten Gelenke einteilen, also ob sie ein- oder zweigelenkig sind, das heißt, ob sie sich über ein oder zwei Gelenke hinweg ziehen.

Entsprechend ihrer biomechanischen Funktion lassen sich Muskeln wiederum in drei verschiedene Kategorien einordnen:

- **Agonisten** sind die jeweils handelnden, die Bewegung hauptsächlich ausführenden, kontrahierenden Muskeln.
- **Antagonisten** fungieren als Gegenspieler der Agonisten, sie werden während der Bewegung durch den Agonisten gedehnt. Bei der Gegenbewegung werden sie dann zum Agonisten.
- **Synergisten** unterstützen den Agonisten, sie werden auch »Zusammenspieler«, genannt.

Nach der hauptsächlichsten Bewegungsrichtung werden Muskeln auch in die folgenden Gruppen eingeteilt:

- Flexoren, also Beuger
- Extensoren oder Strecker
- Rotatoren oder Dreher, die für eine Drehbewegung verantwortlich sind
- Adduktoren, welche einen Muskel zur Körpermitte heranführen
- Abduktoren, die ein Körperteil von dessen Mitte wegführen oder abspreizen

Der Aufbau von Muskeln und die verschiedenen Muskelfasertypen

Ein Skelettmuskel ist von einer Faszie umgeben, hierarchisch aufgebaut und besteht in der Regel aus mehreren Muskelfaserbündeln.⁵ Diese wiederum setzen sich aus mehreren Muskelfasern zusammen, wobei eine Muskelfaser einer Muskelzelle entspricht. In den Muskelfasern befinden sich Sarkomere, die als kleinste kontraktile Einheiten gelten. Die Sarkomere bestehen unter anderem aus den oben bereits besprochenen Aktin- und Myosinfilamenten, die den Ort der aktiven Kontraktion bilden. Die Muskelzellen werden von kleinen Blutgefäßen mit Energiesubstraten und Sauerstoff versorgt. Neben den Sarkomeren beinhalten sie ebenfalls Mitochondrien für die Energiebereitstellung und andere Zellorganellen, zum Beispiel zur Herstellung von Proteinen. Generell werden, je nach Enzymzusammensetzung und -aktivität, verschiedene Muskelfasertypen nach ihren Kontraktionseigenschaften oder nach der Farbe unterschieden.

Je nach enzymatischer Ausstattung der Zellen werden drei Muskelfasertypen unterschieden: Typ 1 und Typ 2 (a und x). Der Muskelfasertyp 1, der auch *slow-twitch*, langsam zuckend, genannt wird, zeichnet sich durch eine niedrige Kontraktionsgeschwindigkeit, Ermüdbarkeit und Maximalleistung bei gleichzeitiger hoher Mitochondriendichte und Kapillardichte aus.⁶ Er zeigt eine niedrige Kapazität zur Glykolyse bei hoher Kapazität zum aeroben Stoffwechsel, der, wie auf Seite 15 beschrieben, auf der aeroben Glykolyse und der Beta-Oxidation beruht. Damit ist ein Mensch mit einem großen Anteil an Muskelfasertyp-1-Anteilen der typische Ausdauerathlet.⁷ Ihm gegenüber steht der für Sprinter wichtige Muskelfasertyp 2 (*fast-twitch*, schnell zuckende Muskelfasern), der durch eine hohe Kontraktionsgeschwindigkeit, Ermüdbarkeit und Maximalleistung bei geringerer Mitochondriendichte und Kapillardichte charakterisiert ist. Grundsätzlich ist zu beachten, dass ein Muskel immer aus mehreren Muskelfasertypen besteht. Die Zusammensetzung der Muskelfasertypen beziehungsweise welcher Typ überwiegt, kann durch gezieltes Ausdauer- und Krafttraining beeinflusst werden.⁸

Dehnungsverkürzungszyklus und Arbeitsweisen der Muskulatur

Der beschriebene Querbrückenzyklus bildet die Grundlage der muskulären Arbeitsweisen. Bei ihm kommt es zum koordinierten Zusammenspiel zwischen zahlreichen Muskelfasern, die einen Zug an einer Sehne und hierüber eine Kraftübertragung auf den Knochen ermöglichen. Hierdurch entsteht Bewegung in einem oder mehreren Körpergelenken. Diese Muskelaktionen werden nach ihrer Wirkweise oder ihrer Längenänderung in die folgenden Formen unterteilt:

- Aktive Verkürzung (konzentrische Muskelaktion)
- Gleichbleibende Anspannung gegen einen Widerstand (isometrische Muskelaktion)
- Anspannung gegen einen den Muskel verlängernden Widerstand (exzentrische Muskelaktion)

Die dabei genutzte chemische Energie (ATP) wird in mechanische – oder anders gesagt: kinetische – Energie umgewandelt. Dabei entsteht außerdem Wärme zu einem Anteil von circa 80 Prozent.⁹ Bei der isometrischen Muskelanspannung kommt es durch Verengung der Blutgefäße zu einer reduzierten Sauerstoffzufuhr und notwendigerweise zu einer vermehrten anaeroben Glykolyse mit anfallendem Laktat.

Für einen Dehnungsverkürzungszyklus, der durch einen Dehnreflex ausgelöst wird und eine Rolle für die Flexibilität der Muskulatur spielt, ist eine aktive Verlängerung eines Muskels notwendig, die durch Antagonisten oder das Körpergewicht und eine etwaige Zusatzlast erreicht

wird. Ihm folgt die Kontraktion desselben Muskels, also die konzentrische Muskelaktion. Diese Form der Energieübertragung ist besonders effektiv, da Energie durch vorangegangene Bewegungen im Muskel-Sehnen-Komplex gespeichert werden kann. Ein effizienter Dehnungsverkürzungszyklus kann mittels Reaktivkrafttraining verbessert werden (ab Seite 52). Das Reaktivkrafttraining ist eine Sonderform des Schnellkrafttrainings. Die folgend beschriebenen Zusammenhänge zwischen Kraft, Muskellänge und Bewegungsgeschwindigkeit sind grundlegend für das Verständnis der Wirkung von funktionellem Krafttraining und der bereits beschriebenen Muskelaktionen.

Treppenläufe sind ein hervorragendes Training für Läufer, um die Reaktivkraft zu entwickeln – und sie lassen sich leicht ins Lauftraining integrieren.



Wie die Muskulatur arbeitet

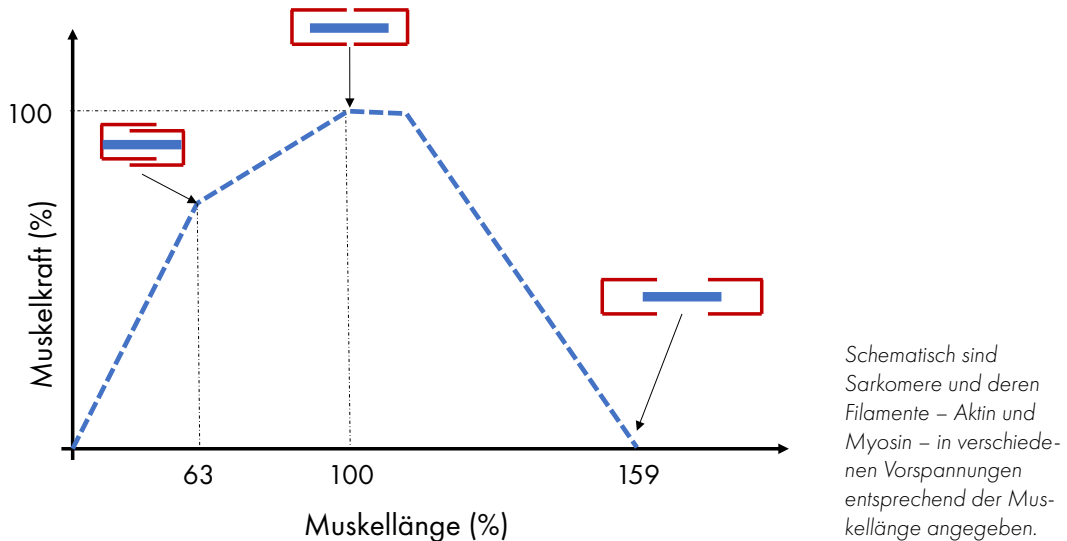
Sportartspezifische Bewegungsabläufe sind zumeist von ihrer Dynamik geprägt. Je nach Bewegung werden **konzentrische** von **exzentrischen** Arbeitsweisen der Muskulatur unterschieden. In der konzentrischen Muskelaktion verkürzt sich der Muskel zwischen Ursprung und Ansatz, zum Beispiel bei der Überwindung eines Widerstands oder beim Heben einer Last, während er sich bei der exzentrischen Muskelaktion verlängert, etwa der Trizeps beim Absenken der Langhantel im Bankdrücken, wenn die nachgebende beziehungsweise verlängernde Muskelaktion gegen eine zu große, nicht zu haltende Last erfolgt. Leistet die Muskulatur vorwiegend Haltearbeit, spricht man von **statischer** oder **isometrischer** Muskelaktion. Die Muskellänge bleibt – annähernd – gleich und die Muskelspannung verändert sich, beispielsweise beim Halten einer Last oder bei der Arbeit gegen einen unüberwindbaren Widerstand.

Zusammenhang von Kraft, Muskellänge und Geschwindigkeit

Der Muskel kontrahiert und erzeugt dabei Kraft, die nicht nur von den chemischen beziehungsweise energetischen Bedingungen abhängt, sondern auch von seiner jeweiligen Länge und von der Geschwindigkeit, mit der er die Kraft aufbringen soll. Diese Zusammenhänge sind in der Kraft-Längen-Funktion und Kraft-Geschwindigkeits-Funktion genauer beschrieben. Während die erste Funktion maßgeblich von der Segment- und Gelenkstellung bestimmt wird, also davon, wie ein Körperteil positioniert ist, hängt die zweite Funktion von der Bewegungsgeschwindigkeit und der zu bewegendenden Last ab.

Die Kraft-Längen-Funktion – wie viel Kraft ein Muskel erzeugen kann

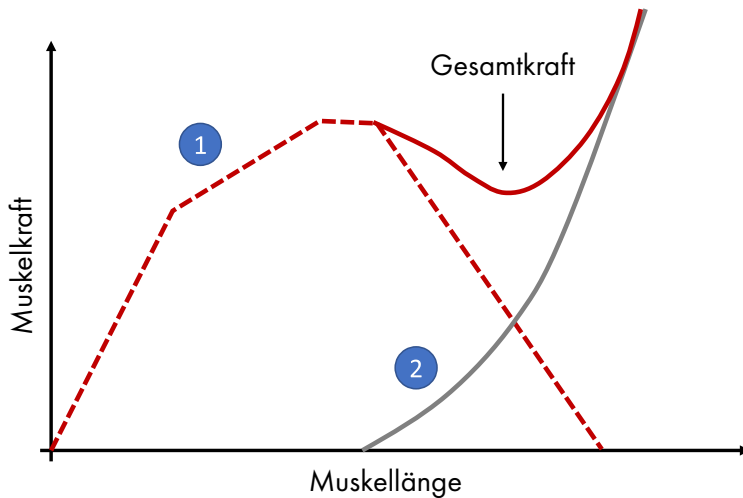
Wie bereits erläutert, bestehen Muskelfasern aus Sarkomeren, den kleinsten kontraktile Einheiten. Je mehr Myosinköpfe gleichzeitig an die Aktinfilamente andocken können, umso mehr Kraft wird erzeugt. Die Zahl der möglichen Andockstellen (der Querbrücken) hängt jedoch von der Distanz der beiden Aktinfilamente ab. Bei einer sogenannten optimalen Länge ist die Zahl der Querbrücken am größten. Der Muskel ist in der Lage, seine größte aktive Kraft zu generieren. Übersteigt die Muskellänge diesen Bereich, so sinkt die Zahl der möglichen Andockstellen. Da hierdurch weniger Querbrücken ausgeprägt werden können, kann der Muskel auch nicht mehr so viel Kraft generieren.



Ähnlich verhält es sich, wenn die Muskellänge auf unter das Maß der optimalen Länge reduziert wird. Dann sind zwar alle Myosinköpfe von Aktinfilamenten umgeben, jedoch überlagern sich die Andockstellen. Daher können nicht mehr alle Anheftungsstellen genutzt werden. Auch hier vermindert sich die Muskelkraft aufgrund der fehlenden Querbrückenverbindungen. Die Beziehung zwischen der Anzahl an Querbrücken und der Muskellänge nennt man Kraft-Längen-Funktion. Sie gibt Aufschluss darüber, wie viel Kraft der Muskel bei welcher Länge erzeugen kann.

Der Muskel besteht jedoch nicht nur aus den aktiven kontraktile Elementen, sondern auch passive Strukturen wie Sehnen und das Bindegewebe tragen ihren Teil zur Muskelfunktion bei. Diese passiven Elemente bewirken infolge ihrer mechanischen Verformung, dass die vom Muskel generierte Kraft mitunter deutlich höher ausfällt als die aktiv erzeugten Kräfte. Der Grund ist in den durch die passiven »Federn« ausgeübten Rückstellkräften zu finden, die bei entsprechender Verlängerung des Muskels zusätzlich Kräfte provozieren und besonders relevant sind für die einbeinige Stützphase im Laufen im Allgemeinen und für das Reaktivkrafttraining im Speziellen. Diese Extrakräfte addieren sich zum ursprünglich muskulär erzeugten Kraftpotenzial. Die folgende Abbildung zeigt ein solch additives Kräfteverhalten.

Das grundlegende Phänomen des Muskel-Längen-Verhältnisses zeigt sich uns in der Praxis dadurch, dass wir beispielsweise beim Tragen von »schweren« Gegenständen eine be-



- 1 Verlauf 1 zeigt die Kraft-Längen-Funktion des Muskels
- 2 Verlauf 2 zeigt die Kraft-Längen-Funktion der Sehne

Das Zusammenspiel von kontraktile Muskelkraft und passiv unterstützenden Funktionen der Sehne potenziert sich in der Kraftentwicklung.

stimmte Armposition einnehmen. Durch das Beugen der Arme ist dafür gesorgt, dass der Muskel in einem optimalen Längenbereich ausgerichtet wird. Bei eingelenkigen Muskeln, also Muskeln, die sich über nur ein Gelenk ziehen, steht die Kraft-Längen-Funktion unmittelbar in Relation zum Gelenkwinkel.

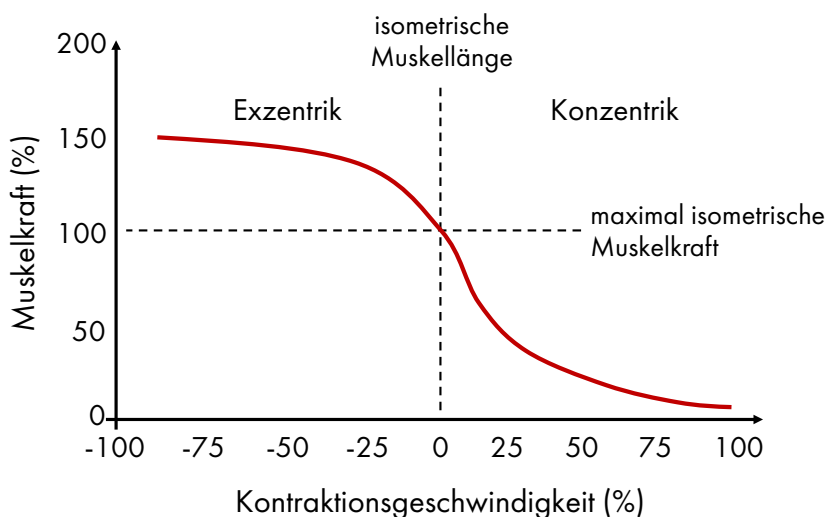
Die Kraft-Geschwindigkeits-Funktion – wie Muskeln Lasten bewegen

Im Alltag und vor allem im Sport wird neben der Abhängigkeit der Muskelkraft von der Muskellänge noch eine weitere elementare Funktion des Muskels ersichtlich: die Geschwindigkeit, mit der die zu bewegende Last – oder Kraft – bewegt wird. Ein hohes Gewicht lässt sich deutlich langsamer bewegen als ein geringeres Gewicht. Ebenso lässt sich ein geringes Gewicht nahe am Körper deutlich schneller bewegen, als wenn es weit entfernt vom Körper gehalten wird. Wer auf einem Ruderergometer mit einer geringen Geschwindigkeit trainiert, kann die Beine deutlich schneller strecken als beispielsweise im Stehen aus einer ähnlichen Position wie einer Kniebeuge oder aus einer Hockposition bei einem Streckersprung wie dem Squat Jump, da er das eigene Körpergewicht nicht tragen muss. Ein großer Mensch mit langen Beinen kann im Allgemeinen seine Beine nicht so schnell bewegen wie ein kleinerer Mensch mit kürzeren Beinen. Die Bewegungsgeschwindigkeit nimmt durch Belastung mit zusätzlichen Gewichten weiter ab und erreicht einen Wert von null, wenn wir

das Gewicht nicht mehr bewegen können. Wir generieren dann zwar die maximale Kraft des Muskels, sind aber nicht mehr in der Lage, das Gewicht zu bewegen.

Die Muskulatur arbeitet, wie bereits beschrieben, isometrisch. Sobald die Last jedoch verringert wird, ist der Muskel wieder in der Lage, sich aktiv zu verkürzen. Das Verhältnis zwischen Kraft und Geschwindigkeit ist jedoch nicht linear, sondern entspricht bei konzentrischer Muskelarbeit, also wenn sich der Muskel verkürzt, einer steilen Hyperbel, wie es in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Anhand dieser exemplarischen Kurven wird offensichtlich, dass bei circa 20 Prozent der maximalen Kontraktionsgeschwindigkeit nur noch 50 Prozent der maximalen Kraft realisierbar ist.

Die Realität zeigt, dass unsere Muskulatur dank ihrer passiven Strukturen deutlich mehr Kraft erzeugen kann, als es allein aufgrund ihrer aktiven kontraktile Elemente möglich ist. Dieses Phänomen besitzt eine elementare Bedeutung für die Kraft-Geschwindigkeits-Funktion. In Bewegungsphasen, in denen es zu einer Verlängerung des Muskels bei gleichzeitiger Kontraktion kommt, wie bei exzentrischer Muskelarbeit bei Reaktivkrafthanforderungen, kann die Muskelkraft in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit die maximal isometrische Kraft um 50 bis 100 Prozent übertreffen. Typische Bewegungsaufgaben, in denen derartige Effekte zum Tragen kommen, sind Landungen, abrupte Stoppbelastun-



Dargestellt ist das Zusammenspiel von konzentrischer und exzentrischer Muskelarbeit. Hierbei bestimmt die Kontraktionsgeschwindigkeit die Kraftentwicklung.

gen, Bergabläufe sowie insbesondere das Laufen auf dem Vorderfuß. Im Gegensatz zum Kraft-Geschwindigkeits-Verhalten bei konzentrischer Muskelarbeit nimmt während der exzentrischen Muskelarbeit die Muskelkraft mit Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit zu. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit erreicht die realisierbare Kraft jedoch ihren Maximalwert. Das Kraftniveau kann dabei auch bei steigender Geschwindigkeit nicht weiter gesteigert werden. Überraschenderweise konnte eine derartige Überhöhung der maximal isometrischen Kraft in Abhängigkeit zur Bewegungsgeschwindigkeit im exzentrischen Arbeitsbereich nur für gut trainierte Personen nachgewiesen werden.¹⁰ Bei weniger trainierten oder untrainierten Personen steigt während exzentrischer Muskelarbeit das Niveau der isometrischen Kraft unabhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit nur gering an. Erklärt werden kann dieser Unterschied durch Defizite in der Kraftfähigkeit der aktiven und kontraktile Elemente des Muskels.

Der grundsätzlich dargestellte Zusammenhang der Kraft-Längen- und Kraft-Geschwindigkeits-Funktionen zeigt, dass eine konzentrisch erzeugte Muskelkraft auf identischem Level auch exzentrisch, aufgrund der Überlagerung passiver Kräfte mit deutlich geringerer Muskelaktivierung generiert werden kann. Typischerweise gehen in der Praxis exzentrische Muskelbelastungen immer mit hohen Kräften einher. Hohe Kräfte bedeuten wiederum immer ein gesteigertes Risiko für Verletzungen. Das gilt auch, wenn die exzentrische Muskelkraft nicht maximal ist, wie beispielsweise beim Bergablaufen. In solchen Fällen kann insbesondere bei untrainierten Personen starker Muskelkater auftreten.

Ein funktionelles Krafttraining für Läufer sollte immer auch explosive (rechter Teil der Abbildung auf Seite 24) und reaktive Belastungen (linker Teil der Abbildung auf Seite 24) enthalten. Das funktionelle Krafttraining, das zum Beispiel aus Squats, Deadlifts, Lunges besteht, wird zumeist mit geringer Bewegungsgeschwindigkeit bei mittleren bis sehr hohen Lasten ausgeführt. Dies entspricht dem steil aufsteigenden Teil der Kraft-Geschwindigkeits-Funktion im konzentrischen Bereich. Zielführend ist es hier auch, isometrische Haltearbeit einzubauen, beispielsweise am Umkehrpunkt zwischen konzentrischer und exzentrischer Bewegungsphase eines Bewegungszyklus. Ein klassisches Beispiel ist der Squat, wenn nach dem exzentrischen Nach-unten-Bewegen eine isometrische Haltephase folgt, bevor die konzentrische Phase beim Nach-oben-Bewegen eingeleitet wird. Weitere Details findest du bei den Ausführungen zur Bewegungsfrequenz (ab Seite 195).

Ermüdung der Muskulatur

Die Ermüdung ist ein physiologischer Schutz vor Überlastung, im Sport und insbesondere im Ausdauersport ist sie jedoch ein leistungslimitierender Prozess. Hier wird von Ermüdung gesprochen, wenn sich die Leistungsfähigkeit durch reversible, das heißt wieder umkehrbare, Mechanismen reduziert. Die Ursachen können physischer oder psychischer Art sein. Bei der physischen Ermüdung steht eine belastungs- beziehungsweise beanspruchungsinduzierte Minderung der Kraft einzelner oder mehrerer Muskeln im Vordergrund. Beginnt ein Muskel zu ermüden, kann seine Funktion gegebenenfalls noch von einem anderen, allerdings weniger effektiven, Muskel übernommen werden. Doch auch die Hilfsmuskulatur, die bereits genannten Synergisten, werden relativ schnell ermüden. Diese muskulären Ermüdungserscheinungen werden recht genau klassifiziert: Wenn weniger als ein Siebtel der gesamten Muskulatur nicht mehr die gewohnte Kraft ausüben kann, spricht man von lokaler, wenn dies bei mehr als einem Siebtel der gesamten Muskulatur der Fall ist, von allgemeiner Ermüdung.

Für den Laufsport ist Ermüdung ein besonders relevanter Faktor, da sie sich negativ auf wichtige biomechanische Kenngrößen auswirkt¹¹ und dadurch die Leistung mindert sowie die Wahrscheinlichkeit für Verletzungen erhöht.^{12, 13} So konnte gezeigt werden, dass eine Ermüdung zu einer Verringerung der Laufgeschwindigkeit, der Schrittfrequenz und Schrittlänge sowie zu einer Erhöhung der Bodenkontaktzeit führt. Die Ermüdung spezifischer Muskelgruppen kann zu einer Fehlbelastung anderer Strukturen wie Sehnen oder Knochen führen und hier ebenfalls akute Überlastungsverletzungen begünstigen.

Warum Muskeln ermüden – und wie Krafttraining dem vorbeugen kann

Die Gründe für Ermüdung sind zahlreich. Sie reichen von einer Verringerung der Energiereserven, zum Beispiel Kreatinphosphat, Glukose, Glykogen, über die Anhäufung von Stoffwechselzwischenprodukten wie Übersäuerung und eine Ansammlung von Pyruvat beziehungsweise Laktat sowie über die Verringerung von Elektrolyten, beispielsweise Kalzium, Kalium, Magnesium, bis hin zu einer substanziellen Reduktion von für die Leistungsfähigkeit benötigten Enzymen oder Hormonen wie Adrenalin und Noradrenalin.

Wie schnell die Muskulatur ermüdet, ist abhängig vom Trainingsstatus einer Person und kann durch gezieltes Training kompensiert werden. Allen voran steht hier die Erweiterung der Energiespeicher Kreatinphosphat und Glykogen sowie die Ökonomisierung der Ener-

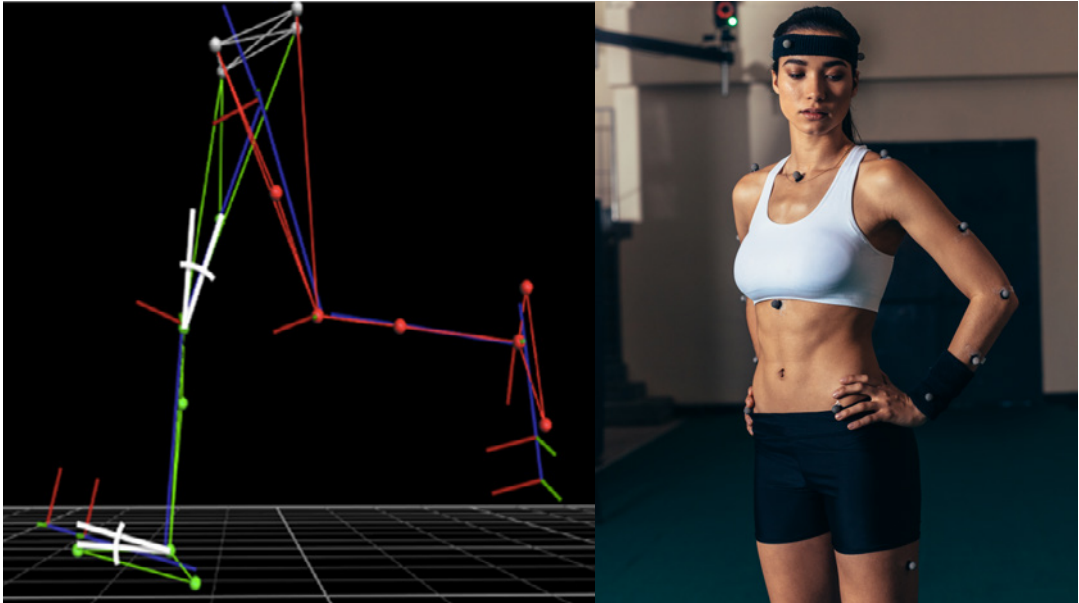
giebereitstellung durch Vermehrung von Enzymen des Energiestoffwechsels im Mittelpunkt. Darüber hinaus werden neue kleinste Blutgefäße, sogenannte Kapillaren, ausgebildet, die mit einer Verbesserung der Nährstoff- und Sauerstoffversorgung in Zusammenhang stehen. Mithilfe von Krafttraining soll erreicht werden, dass im Muskel eine Anpassung an die spezifische Beanspruchung angestoßen wird. Hier unterscheidet man die Hypertrophie, also das Wachstum der Muskelzelle, und die Hyperplasie, das ist die Vermehrung der Muskelzellen, die – zusammen mit einer verbesserten intra- und intermuskulären Koordination – zu einer verbesserten und effizienteren Kraftentwicklung führen kann.

Weitere Vorteile, die aus dem Krafttraining resultieren, werden außerdem in einer besseren mechanischen Effizienz der Bewegungen gesehen und in der höheren Anzahl der für eine Bewegung rekrutierten Muskelfasern diskutiert. Alle genannten Parameter münden in eine verbesserte Laufökonomie.¹⁴ Vor diesem Hintergrund kann funktionelles Krafttraining dazu beitragen, Bewegungsabläufe zu ökonomisieren.

GRUNDLAGEN DER BIOMECHANIK

Die Biomechanik ist eine wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der Beurteilung und Analyse von Bewegungen in biologischen Systemen beschäftigt. Sie ist ein interdisziplinäres Fach an der Schnittstelle von Anatomie, Physiologie, Medizin und Sportwissenschaft. In der Forschung kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz, wie beispielsweise das *Motion Capture*, ein Trackingverfahren zur Aufzeichnung von Bewegungen, die Messung von auftretenden Drücken und Kräften oder die Ableitung von Muskelaktivität über Elektromyografie (EMG). Seit jüngerer Zeit können auch tragbare Sensoren, sogenannte Wearables, genutzt werden, um Informationen zur individuellen Laufbiomechanik außerhalb eines Biomechaniklabors zu erhalten, wie nachfolgend beschrieben wird.

Diese Messverfahren werden eingesetzt, um Aussagen zur Bewegung, der Kinematik, oder zum Auftreten von Kräften, der Kinetik, zu treffen. Die Kinematik ist die Lehre von der Bewegung von Punkten im dreidimensionalen Raum. Diese Punkte werden hinsichtlich ihrer Position im Raum, ihrer Geschwindigkeit und Beschleunigung beurteilt und in der Zusammenschau beispielsweise genutzt, um Aussagen zu Gelenkwinkeln zu treffen. Während hierfür in der wissenschaftlichen Forschung aufwendige Systeme mit Infrarotkameras und speziellen reflektierenden Markern genutzt werden, können mittlerweile auch normale



Markerbasiertes Trackingsystem zur Analyse von Bewegungen: Die Marker an den unteren Extremitäten sind durch Punkte gekennzeichnet (linke Seite).

Hochgeschwindigkeitskameras, die mit Systemen des maschinellen Lernens gekoppelt werden, sehr gute Messwertergebnisse erzielen. Die kinematischen Daten werden neutral erfasst und gemessen, ohne die Ursachen der Bewegung, also der auftretenden Kräfte, einzubeziehen.

Für die Messung von Kräften, was Aufgabe der Kinetik ist, werden spezielle Kraftmessplatten eingesetzt, die typischerweise entweder in den Boden eingelassen sind oder unter einem Laufband installiert werden. Diese Kraftmessplatten zeichnen die auftretenden Kräfte mit einer hohen Tastfrequenz von mindestens 1000 Hertz auf und werden genutzt, um die einwirkenden Kräfte und die Masse, aber auch Drehmomente, Impulse und Trägheitsmomente zu berechnen. Zusammen mit den kinematischen Variablen können so beispielsweise Kniegelenkmomente bestimmt werden, anhand derer die Belastung einzelner Strukturen beurteilt werden kann. Darüber hinaus ist es möglich, räumlich-zeitliche Parameter wie die Schrittlänge, die Schrittfrequenz und Bodenkontaktzeiten zu bestimmen.

Die Rolle der Biomechanik für die Lauftechnik

Das Laufen unterscheidet sich vom Gehen vor allem dadurch, dass eine zusätzliche Flugphase existiert, eine Zeit, in der kein Fuß den Boden berührt, beide Füße also gleichzeitig in der Luft sind. Um die individuelle Lauftechnik beurteilen zu können, liefert die Biomechanik wertvolle Messtechniken. Und da die Lauftechnik relevant für die Leistung ist, aber auch im Hinblick auf das Auftreten oder Vermeiden von Verletzungen eine Rolle spielt, sind biomechanische Messungen in vielerlei Hinsicht interessant.

Die Laufleistung, also die Geschwindigkeit, wird bestimmt aus dem Produkt der Raum-Zeit-Parameter Schrittlänge und Schrittfrequenz. Schrittlänge ist definiert als die Distanz zwischen den beiden Punkten, an dem die Füße jeweils Bodenkontakt haben. Die Schrittfrequenz ist die Anzahl der Schritte pro Minute. Beide sind abhängig von den auftretenden Kräften und auch von den Bodenkontakt- und Flugzeiten.¹⁵ Die Schrittlänge und die Schrittfrequenz können willentlich beeinflusst werden und es ist davon auszugehen, dass sich mit der Lauf Erfahrung automatisch ein ökonomischeres Verhältnis dieser beiden Parameter einstellt.

Für die Schrittlänge sind vor allem die von der Wadenmuskulatur (*Musculus triceps surae*) generierten Kräfte verantwortlich, während die Schrittfrequenz vor allem über die Funktion der Hüftflexoren und Hüftextensoren bestimmt wird. Wer seine Laufgeschwindigkeit steigern will, dem stehen beide Parameter zur Verfügung: Bis zu einer Beschleunigung von circa 20 Kilometern pro Stunde (km/h) ist die Erhöhung der Schrittlänge maßgeblich, bei einer Geschwindigkeit von über 20 km/h trägt die Erhöhung der Schrittfrequenz zur Temposteigerung bei.¹⁶ Um die jeweilige Muskulatur für die spezifische Belastung vorzubereiten – vor allem die unteren Extremitäten sowie die rumpfstabilisierende Muskulatur –, ist das funktionelle Krafttraining hervorragend geeignet.

Die spezifischen muskulären Funktionen spielen sowohl bei der Prävention als auch bei der Rehabilitation von laufbedingten Verletzungen eine große Rolle. So sind viele beim Laufen entstandene Verletzungen mit ähnlichen biomechanischen Mustern assoziiert.¹⁷ Das iliotibiale Bandsyndrom am Knie ist beispielsweise mit einem zu stark nach vorn oder nach hinten gekippten Becken und einer erhöhten Hüftadduktion beim Fußaufsatz assoziiert. Ebenfalls am Kniegelenk ist das patellofemorale Schmerzsyndrom bei Läufern eine häufige Verletzung, die ebenfalls mit einem zu stark nach vorn gekippten Becken bei gleichzeitigen zu schwachen Hüftabduktoren in Zusammenhang steht.

Laufbedingte Verletzung	Assoziierte Biomechanik				
	Becken	Hüfte	Knie	Sprunggelenk	Fuß
Patellasehnen-Tendinopathie			Varusstellung (O-Bein) oder Valgusstellung (X-Bein)		
Rückenschmerzen	starke Kippung nach vorn	Beinlängendifferenz			
Plantarfasziitis				Pes equinus (Spitzfuß)	Überpronation
Iliotibiales Bandsyndrom	starke Kippung nach vorn oder hinten	starke Hüft-Adduktion	Varusstellung (O-Bein)		
Mediales tibiales Belastungssyndrom (»Shin Splints«)					Überpronation
Achillessehnen-Tendinopathie			starke Außendrehung des Schienbeins	Pes equinus (Spitzfuß)	Überpronation
Hamstring-Muskelverletzung	starke Kippung nach vorn			Pes equinus (Spitzfuß)	
Patellofemorales Syndrom	starke Kippung nach vorn	schwache Hüft-Abduktoren	hoher Q-Winkel, Varusstellung (O-Bein)		Überpronation
Tibia-Stressfraktur		erhöhte Hüft-Adduktion	Varusstellung (O-Bein)		Überpronation oder Übersupination

Tabelle adaptiert nach: Nicola, T. L.; Jewison, D. J. (2012): »The Anatomy and Biomechanics of Running«. Clinics in Sports Medicine, 31 (2), S. 187–201

Neben den Knien bereiten oft auch Unterschenkel und Füße Probleme. Knöcherne Stressreaktionen am Schienbein, die früher »Shin Splints« oder Schienbeinkantensyndrom genannt wurden, oder an den Mittelfußknochen sind eine relativ häufige Verletzung. Als Risikofaktoren für solche Stressreaktionen wurden beispielsweise starke Pronations- oder Supinationsbewegungen, also Einwärts- oder Auswärtsrotationen, im Sprunggelenk erkannt. Neueste Studien aus dem Biomechaniklabor zeigten außerdem einen Zusammenhang von Achillessehnenüberlastungen mit einem bestimmten Fußaufsatzverhalten, nämlich wenn Ballen und Ferse gleichzeitig auf dem Boden aufkommen, dem sogenannten Mittelfußaufsatz.¹⁸

Die wichtigsten biomechanischen Parameter, die mit laufbedingten Verletzungen assoziiert werden und durch funktionelles Training der Muskulatur potenziell vermeidbar und therapierbar sind, werden ab Seite 44 im Detail vorgestellt.

Einfache Messmethoden für die Bestimmung der individuellen Biomechanik

Bei der wissenschaftlichen Bearbeitung von Fragen nach biomechanischen Messmethoden werden oft Untersuchungen in hoch spezialisierten BewegungsanalySELaboren durchgeführt. Diese helfen auch bei der differenzierten Beurteilung von schwereren oder chronischen laufbedingten Verletzungen. Für den alltäglichen Gebrauch und die individuelle Bestimmung der eigenen Biomechanik braucht es diese umfangreichen Messungen jedoch nur selten.

In den letzten Jahren haben technische Innovationen aus dem Bereich der Hardware, aber auch aus dem Bereich der Software die Messmöglichkeiten erweitert und verfeinert. Die Entwicklung der tragbaren Sensoren, der Wearables, ist zuvorderst zu nennen. Kleine Sensoren, sogenannte Inertialsensoren, die mit Beschleunigungs-, Drehraten- und magnetischen Sensoren ausgestattet sind, können am Körper angebracht werden. Gekoppelt mit GPS-Signalen, generieren sie zuverlässig Daten zur Geschwindigkeit, zur Schrittfrequenz und Schrittlänge. Außerdem zeichnen sie die Bodenkontaktzeiten auf und erfassen die Bewegung des Körperschwerpunkts. Solche Sensoren finden sich beispielsweise im Smartphone, in vielen Laufuhren oder im Herzfrequenz-Brustgurt. Auch wenn die Genauigkeit der Wearables der Messung im Biomechaniklabor etwas nachsteht, überwiegen die Vorteile einer kontinuierlichen Messung jeder Laufeinheit – zudem sind sie relativ einfach anzuwenden. Auch eine übersichtliche Auswertung dieser Daten auf der Uhr oder in einer App – je nach Anbieter – ermöglichen eine einfache Bestimmung individueller biomechanischer Parameter.¹⁹



Wearables sind einfach zu bedienen und unterstützen mit den erfassten Daten jeden Läufer beim Techniktraining und bei der Trainingssteuerung.

Wenn es über diese Daten hinausgehen soll, gibt es spezielle Sensoren, die entweder zusätzlich getragen werden können oder als Sohle in den Laufschuh gelegt werden. Diese Sohlen haben beispielsweise Drucksensoren und können darüber sehr genau die Bodenkontaktzeiten und Zeiten der Flugphase bestimmen sowie die Verteilung des Druckes mit Bestimmung des Fußaufsatzverhaltens erfassen.

Aufseiten der Software sind Verfahren der künstlichen Intelligenz oder des maschinellen Lernens zu nennen, die sicherlich in den kommenden Jahren einen immer wichtigeren Platz in der Datenanalyse und der Prognostik hinsichtlich Laufleistung und der Prävention von laufbedingten Verletzungen einnehmen werden.

Lauftechnik: Das Fußaufsatzverhalten – Pronation und Supination

Die Art und Weise, wie der Fuß beim Laufen auf dem Boden aufsetzt, wird dahingehend unterteilt, ob der Fuß zuerst mit dem Vorfuß, dem Mittelfuß oder dem Rückfuß auf dem Boden aufkommt. Darüber hinaus kann der Winkel bestimmt werden, den der Fuß beziehungsweise das Sprunggelenk im Moment des Fußaufsatzes zeigt, und so auf einer kontinuierlichen Skala erfasst werden. In einer aktuellen Übersichtsarbeit in der *Deutschen Zeitschrift für Sportmedizin*²⁰ wurde der wissenschaftliche Stand zum Fußaufsatzverhalten zusammengefasst.

Für diese Messungen stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Während nach wie vor der Goldstandard die dreidimensionale Bewegungsanalyse im Biomechaniklabor ist, gibt es auch zahlreiche Methoden, diese Parameter über Kraft- oder Druckmessplatten zu bestimmen oder sogar unabhängig von Laboren mittels visueller, kameragestützter oder sogenannter inertialsensoren-basierter Analyse.

Der Fußaufsatz lässt sich bewusst und willentlich durch gezieltes Training oder den Einsatz bestimmter Schuhe beeinflussen. Außerdem bestimmt das Lauftempo, wie der Fuß auf dem Boden aufsetzt – eine Erhöhung der Laufgeschwindigkeit begünstigt den Vorfußaufsatz, kaum ein Sprinter wird zuerst mit dem Rückfuß auf dem Boden aufkommen. Während die Verfahren zur Bestimmung des Fußaufsatzes in den letzten Jahren deutlich besser geworden sind und sich auch zahlreiche wissenschaftliche Publikationen mit diesem Thema beschäftigen, ist die wissenschaftliche Evidenz zur Verbesserung der Laufleistung oder Reduktion von laufbedingten Verletzungen durch aktive Änderung des Fußaufsatzes aktuell, während dieses Buch entstand, noch nicht abschließend geklärt.

Allgemein gilt der Vorfußaufsatz als der effizientere und wird häufig mit einer besseren Laufleistung assoziiert. Gründe hierfür können zum Beispiel darin liegen, dass der Sprint als Leitbild für den schnellen Lauf gesehen wird. Wenn man sich Eliteläufer anschaut, so hat beispielsweise eine Analyse des Finallaufs über 10 000 Meter der Männer während der Leichtathletik-Weltmeisterschaft in London 2017 gezeigt, dass zu keinem Zeitpunkt des Rennens einer der Athleten mit dem Rückfuß auf dem Boden aufgekommen wäre.²¹ Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass die durchschnittliche Laufgeschwindigkeit bei circa 22 km/h lag. Wenn man sich hingegen die Daten aus einem Elitehalbmarathon anschaut, so setzen dort bereits 80 Prozent der Läuferinnen und 74 Prozent der Läufer mit dem Rückfuß auf.²² Außerhalb von Wettkämpfen setzten Läufer sogar zu über 95 Prozent mit dem Rückfuß zuerst auf dem Boden auf.²³

Wenn der Laufstil kurzfristig von einem Rückfußaufsatz zu einem Vorfußaufsatz geändert wird, dann zeigen mehrere Analysen eine Verschiebung der Bodenreaktionskräfte, das heißt, dass sich die Kräfte zwischen Fuß, Schuh und dem Untergrund ändern. Diese Tatsache wird häufig herangezogen, um die suggerierte verletzungspräventive Funktion des Vorfußaufsatzes zu begründen. Allerdings gibt es weder eine klare Beweisgrundlage dafür, dass diese veränderten Bodenreaktionskräfte überhaupt mit Verletzungen assoziiert sind, noch dafür, dass sich die Bodenreaktionskräfte langfristig ändern lassen. Möglicherweise sind bestimmte Bodenreaktionskräfte mit spezifischen laufbedingten Verletzungen assoziiert, etwa der knöchernen Stressverletzung des Schienbeins und der plantaren Fasziopathie, allerdings konnte das bisher nur in wenigen Studien gezeigt werden. Eine aktuelle Übersichtsarbeit der wissenschaftlichen Lage zeigt,²⁴ dass noch nicht abschließend geklärt ist, wie das eine mit dem anderen zusammenhängt.

Daher gibt es aktuell keine wissenschaftliche Empfehlung, das Fußaufsatzverhalten zu ändern, um die Laufleistung zu verbessern oder das Risiko von laufbedingten Verletzungen zu reduzieren.²⁵ Als gesichert gilt aber, dass die an der Bewegung beteiligte Muskulatur spezifisch und funktionell vorbereitet und trainiert werden sollte. So ist beispielsweise der Vorfußaufsatz mit einer starken exzentrischen Belastung der Wadenmuskulatur (*Musculus triceps surae*) und der Achillessehne assoziiert und sollte entsprechend trainiert werden.

Wenn man beobachtet, wie ein Läufer den Fuß aufsetzt, dann ist neben der Beurteilung, welcher Bereich des Fußes zuerst Bodenkontakt hat, wichtig zu erkennen, ob der Fuß nach außen oder innen dreht beziehungsweise »knickt«, in der Fachsprache: ob er supiniert oder proniert. Von Supination spricht man beim Absenken des äußeren Fußrandes, dem »Abknicken nach außen«, während die Pronation ein Absenken des inneren Fußrandes, ein »Abknicken nach innen«, bezeichnet. Seit vielen Jahren bringen Laufanalysten solche Drehbewegungen mit laufbedingten Verletzungen in Zusammenhang, und zahlreiche Hersteller von Laufschuhen haben Modelle im Angebot, die diesen Bewegungen durch sogenannte Pronationselemente und -stützen, die im Sohlenmaterial der Schuhe verbaut sind, entgegenwirken sollen.

Im Jahr 2015 hat Benno Nigg, ein inzwischen emeritierter Biomechanikprofessor, der rund 40 Jahre an der Schnittstelle zwischen Laufschuh und laufbedingten Verletzungen geforscht hat, eine Zusammenstellung seiner langjährigen Forschungen im renommierten *British Journal of Sports Medicine* publiziert und dadurch mit durch die Sportwelt geisternden Mythen aufgeräumt.²⁶ Ein solcher Mythos, der sich seit Langem hält, ist die Unterstellung, Supination und Pronation würden mit laufbedingten Verletzungen einhergehen. Interessanterweise ist sogar das Gegenteil der Fall, denn in einer Untersuchung von über 1800 Läuferinnen und Läufern zeigte sich, dass sich diejenigen mit einer pronierten Fußstellung sogar seltener verletzten.²⁷ Aus dieser Erkenntnis lässt sich ableiten, dass eine Versorgung mit sogenannten Pronationselementen oder korrigierenden Einlagen in Schuhen nicht notwendigerweise vor Verletzungen schützt. Lediglich eine Überpronation oder Übersupination, also sehr extreme Bewegungen im Sprunggelenk, können nachweislich mit bestimmten Verletzungen wie Stressfrakturen oder Achillessehnenverletzungen zusammenhängen.

Besser scheint es zu sein, die Abknickbewegung des Fußes durch spezifisches Training der extrinsischen Fußmuskulatur – alle Muskeln, die vom Unterschenkel über das Sprunggelenk am Fuß ansetzen – zu minimieren und die Muskulatur damit adäquat vorzubereiten. Hier



Ob und wie das Fußaufsatzverhalten beim Laufen eine Rolle für das Verletzungsrisiko spielt, ist noch nicht abschließend geklärt.

gilt insbesondere den Wadenbeinmuskeln (*Musculus fibularis longus* und *brevis*) und dem vorderen und hinteren Schienbeinmuskel (*Musculus tibialis anterior* und *posterior*) ein besonderes Augenmerk.

Schrittlänge und Schrittfrequenz

Wie bereits angesprochen, sind die Schrittlänge und die Schrittfrequenz biomechanische Parameter, die ebenfalls mit laufbedingten Verletzungen in Verbindung stehen sollen. So konnte eine Studie mit US-amerikanischen Highschool-Läuferinnen und -Läufern zeigen, dass eine höhere Schrittfrequenz von über 174 bis 178 Schritten pro Minute mit einer verringerten Anzahl an Verletzungen am Schienbein in Zusammenhang steht.²⁸ Vor diesem Hintergrund wird das Potenzial einer Erhöhung der Schrittfrequenz zur Reduktion dieser laufbedingten Verletzungen diskutiert. Möglicherweise liegt es daran, dass die Bodenre-

aktionskräfte, die bei jedem Schritt auftreten, geringer ausfallen. Diese Kräfte sind nicht zu unterschätzen, sie betragen bei jedem Schritt das Vielfache des Körpergewichts.

Da die Schrittfrequenz erfreulicherweise willentlich beeinflusst werden kann, scheint deren Erhöhung eine Erfolg versprechende Präventions- oder Rehabilitationsstrategie der bereits genannten Verletzungsmuster zu sein. Allerdings müssen immer die individuellen biomechanischen Voraussetzungen und Fähigkeiten der Muskulatur berücksichtigt werden. Während für die Erhöhung der Schrittlänge vor allem die Wadenmuskulatur (*Musculus triceps surae*) verantwortlich ist, wird die Schrittfrequenz über die Hüftmuskulatur gesteigert. In der Flugphase werden die Hüftbeuger (*Musculus psoas major*, *Musculus rectus femoris* und *Musculus tensor fasciae latae*) genutzt, um das Bein schnell nach vorn zu heben. Wie wichtig diese Muskeln sind, zeigt sich nicht zuletzt darin, dass der *Musculus tensor fasciae latae* auch Sprintermuskel genannt wird. Gleichzeitig treiben die Hüftstrecker (*Musculus gluteus maximus* und die Muskelgruppe der sogenannten Hamstrings) den Körper in der Standphase nach vorn.

Da unter normalen Bedingungen die Erhöhung der Laufgeschwindigkeit bis circa 20 km/h eher über die Schrittlänge und über 20 km/h eher über die Schrittfrequenz reguliert wird, sind hier auch die Ursachen für die beobachtbaren unterschiedlichen Verletzungsmuster zu sehen. So zeigte eine 2021 publizierte wissenschaftliche Untersuchung,²⁹ dass in einer Kohorte von über 12 000 Eliteleichtathletinnen und -athleten die benötigte Laufgeschwindigkeit starke Auswirkungen darauf hat, welche Muskeln von Verletzungen betroffen waren. Für (Langstrecken-)Läuferinnen und -Läufer, die in der Regel mit einer Geschwindigkeit von unter 20 km/h laufen, sollte etwa ein besonderer Fokus auf die Prävention von Verletzungen der Wadenmuskulatur gelegt werden. Durch funktionelles Krafttraining insbesondere im Reaktivkraftbereich lässt sich diese Muskulatur gut auf die beim Laufen entstehende Beanspruchung vorbereiten.

Die Rolle der beinabspreizenden Muskeln an der Hüfte

Die Hüftabduktion bezeichnet das Abspreizen des Beines in der Hüfte. In der Standphase der Laufbewegung, bei der das Bein quasi fest mit dem Boden fixiert ist, ist die Hüftabduktion allerdings dafür zuständig, das Becken in der horizontalen Position zu halten.

Sind die Hüftabduktoren zu schwach, sinkt das Becken ab, die Knie knicken nach innen und es entsteht eine funktionelle X-Bein-Stellung. Der wichtigste Abduktor – der von der Körpermitte abspreizende Muskel – der Hüfte ist der »mittlere Gesäßmuskel« (*Musculus gluteus medius*), und genau dieser ist bei Läuferinnen und Läufern häufig zu schwach ausgebildet. Es hat sich herausgestellt, dass sowohl eine zu starke Hüftadduktion während der Standphase als auch die damit in Zusammenhang stehende reduzierte Kraft der Hüftabduktoren wichtige Risikofaktoren für die Ausbildung von laufbedingten Verletzungen am Knie darstellen und es aufgrund dieser Gegebenheiten zu einem iliotibialen Schmerzsyndrom oder einem patellofemoralel Schmerzsyndrom kommen kann.³⁰ Daher ist das funktionelle Krafttraining ebendieser oft zu schwach ausgeprägten Muskulatur, insbesondere zur Stabilisierung der Beckenposition, sehr vielversprechend – sowohl für die Prävention als auch für die Rehabilitation von laufbedingten Verletzungen.