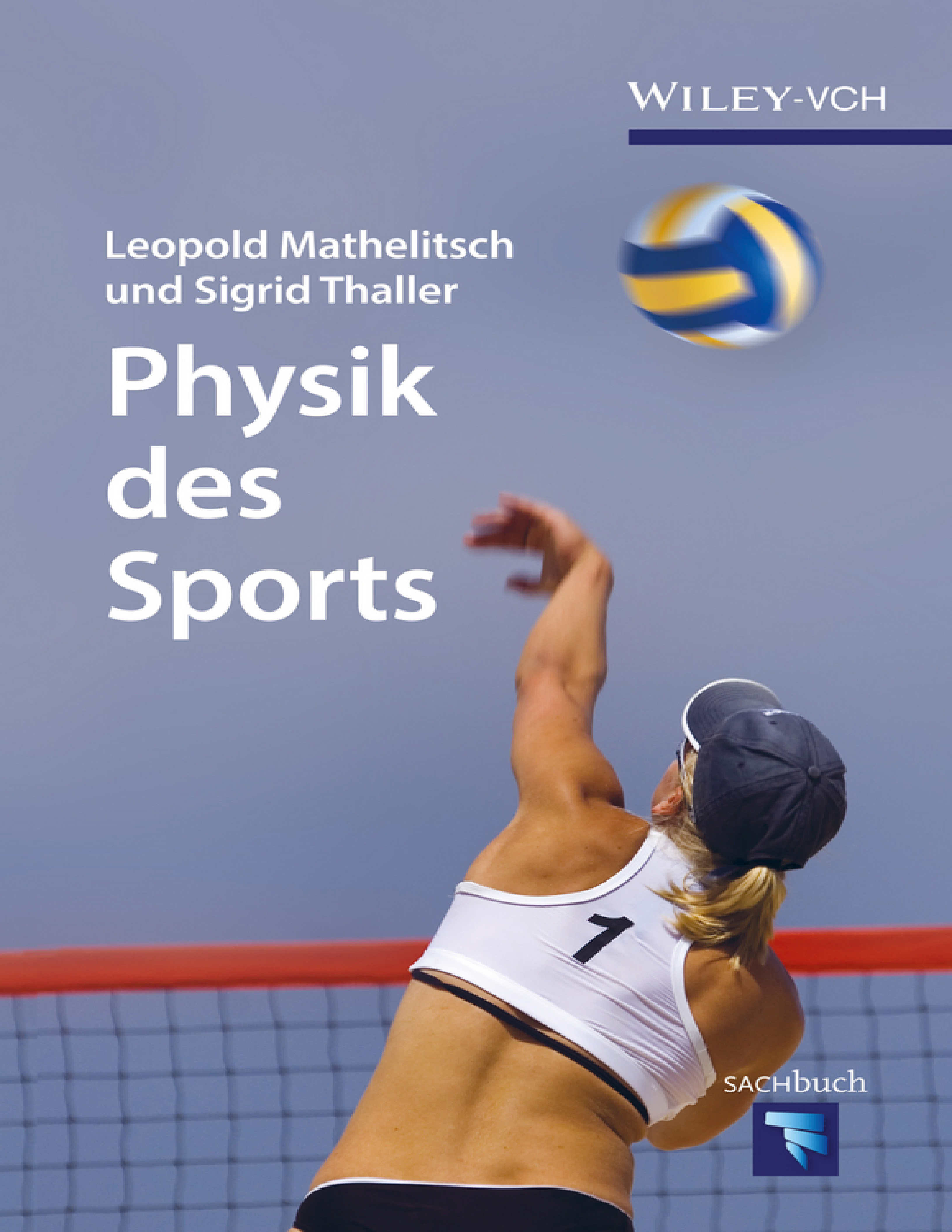
WILEY-VCH

Leopold Mathelitsch
und Sigrid Thaller

Physik des Sports



SACHbuch

Vorwort

Als vor etwa zehn Jahren die Redaktion der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit” bei uns anfragte, ob wir nicht einige Artikel zum Thema Sport und Physik verfassen möchten, haben wir nicht erwartet, dass „einige” auch die Zahl achtzehn enthalten kann. Dies führte zu einem breiten Bogen von Themen, vom ersten Artikel über die Physik des Skifahrens, naheliegend für österreichische Autoren, bis zum derzeit letzten über die hierzulande eher exotische Sportart Baseball. Ziel dieses Buches ist es, die vielfältigen Inhalte der einzelnen Beiträge in eine kompakte Darstellung zusammenzuführen.

Zu diesem Zweck wurden die Artikel thematisch geordnet, aktualisiert und überarbeitet. Die Behandlung mehrfach vorkommender Inhalte wurde vereinheitlicht, wodurch sich in Einzelfällen inhaltliche Verschiebungen ergaben. Die Themen der einzelnen Abschnitte entsprechen jedoch den Originalartikeln, was zu einer breiten Palette von physikalischen Ansätzen und sportlichen Inhalten führte, eine systematische Vollständigkeit aber nicht erwarten lässt.

Die Liste der Originalartikel findet sich nach dem Vorwort, denn es mag für den Leser, die Leserin eventuell auch interessant sein, die einzelnen Beiträge in der ursprünglichen, in sich geschlossenen Fassung nachzulesen.

Nach der Einleitung beinhaltet das zweite Kapitel grundlegende Themen. Hier wurden Beiträge zusammengefasst, die sich auf mehrere Sportarten beziehen. Dadurch werden insgesamt wesentlich mehr Sportarten besprochen, als im Inhaltsverzeichnis ersichtlich sind. So werden u. a. Fragestellungen physikalischer und sportlicher Natur im Gewichtheben, Stabhochsprung und Dart behandelt. Die grundlegenden Abschnitte gehen sogar weit über die reine Sportphysik hinaus, ihre Themen reichen von der Sportphysiologie bis zu Fragen der Motorik.

In den weiteren Kapiteln werden einzelne Sportarten behandelt. Kapitel 3 widmet sich den Ballsportarten, danach folgen Kapitel über Geräteturnen, Wassersportarten und Wintersport.

Den Abschluss bilden Kampfsportarten und Reiten.

Um ein zügiges Lesen zu ermöglichen, wurden ausführlichere, meist physikalische Erklärungen in sogenannten Infoboxen zusammen gefasst. Zwei mathematisch anspruchsvollere Ableitungen von Gleichungen wurden in den Anhang verschoben. Ein Stichwortverzeichnis soll ein gezieltes Suchen nach bestimmten Begriffen erleichtern.

Wir möchten uns bei den vielen Personen bedanken, die uns bei der Arbeit unterstützt haben und ohne die dieses Buch nicht möglich gewesen wäre: Roland Wengenmayr von „Physik in unserer Zeit" hat jahrelang die ursprünglichen Artikel sorgfältig redigiert und viele hervorragende Ideen eingebracht. Tatjana Gigler, Studienassistentin am Institut für Sportwissenschaft, Universität Graz, hat die ersten Fassungen dieses Buches sorgfältig durchgelesen. Univ. Prof. Markus Tilp, Universität Graz, hat wesentlich zum Abschnitt Volleyball beigetragen, Prof. Theodor Duenbostl, Universität Wien, und Mag. Norbert Schrapf, Universität Graz, haben bei Fotos und Abbildungen geholfen. Zum Abschluss möchten wir uns bei Waltraud Wüst bedanken, die dieses Buch seitens des Wiley-Verlags bestens betreut hat und dem Team von le-tex publishing services GmbH.

Graz, im September 2015

Leopold Mathelitsch und Sigrid Thaller

Physik in unserer Zeit

Die einzelnen Kapitel dieses Buches basieren auf Artikeln in der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit". Im Folgenden sind die Artikel gemäß der Abfolge in diesem Buch zitiert.

- Abschnitt 2.1 (2006) Was leistet ein Sportler? *PhiuZ*, **37/2**, 86.
- Abschnitt 2.2 (2010) Der Ball ist nicht immer rund. *PhiuZ*, **41/1**, 88.
- Abschnitt 2.3 (2011) Steiler oder flacher. *PhiuZ*, **42/1**, 40.
- Abschnitt 2.4 (2007) Jeder Schuss ein Treffer. *PhiuZ*, **38/1**, 30.
- Abschnitt 2.5 (2012) Olympische Rekorde. *PhiuZ*, **43/4**, 186.
- Abschnitt 3.1 (2006) Fußball mit Wissenschaftlichem Maß. *PhiuZ*, **37/3**, 122.
- Abschnitt 3.2 (2007) Spiel, Satz und Sieg. *PhiuZ*, **38/3**, 124.
- Abschnitt 3.3 (2009) Tückisches Einlochen. *PhiuZ*, **40/5**, 252.
- Abschnitt 3.4 (2011) Schläge, Sprünge, Taktik. *PhiuZ*, **42/4**, 248.
- Abschnitt 3.5 (2015) Der Homerun. *PhiuZ*, **46/3**, 140.
- Abschnitt 4.1 (2013) Kraftvolle Eleganz. *PhiuZ*, **44/1**, 40.
- Abschnitt 4.2 (2013) Die Sache mit dem Dreh. *PhiuZ*, **44/5**, 236.

- Abschnitt 5.1 (2006) Möglichst keine Wellen schlagen. *PhiuZ*, **37/4**, 180.
- Abschnitt 5.2 (2009) Tief Luft holen. *PhiuZ*, **40/5**, 90.
- Abschnitt 6.1 (2006) Kräftespiel auf der Piste. *PhiuZ*, **37/1**, 41.
- Abschnitt 6.2 (2012) Menschliche Adler. *PhiuZ*, **43/1**, 26.
- Abschnitt 6.3 (2010) Heiße Action dank cooler Physik. *PhiuZ*, **41/3**, 144.
- Abschnitt 7.1 (2009) Mit Willensstärke und Physik. *PhiuZ*, **40/1**, 36.
- Abschnitt 7.2 (2014) Schritt, Trab und Galopp. *PhiuZ*, **45/6**, 288.

1
Einleitung

Die Physik und ihre Gesetze spielen im Sport und auch in der Sportwissenschaft eine große Rolle. Dabei kann man generell zwei Bereiche unterscheiden: die Anwendung der Physik auf das Verhalten von leblosen Körpern und die Einbeziehung des Menschen in seiner Komplexität. Im ersten Fall geht es um die physikalischen Eigenschaften von Sportgeräten, Materialeigenschaften wie die Elastizität von Bällen, die Taillierung von Carving-Skiern, das Gewicht von Wurfgeräten oder die Schwingungseigenschaften eines Baseballschlägers. Andererseits sind Fragen zur Wechselwirkung von Gerät und Umgebung, zum Beispiel die Reibung zwischen Ski und Schnee, der Einfluss des Luftwiderstands auf die Flugkurve eines Balles oder die Größe der Zentrifugalkraft beim Hammerwurf, zentrale Themen. Physikalische Prinzipien wie Energieerhaltung, Impulserhaltung oder die Newton'schen Gesetze können systematisch angewandt werden und liefern wichtige Aussagen.

Bezüglich des zweiten Bereichs hört man manchmal (von Nichtphysikern) Aussagen, dass sich die Physik nicht ohne Einschränkung auf den Menschen anwenden ließe, oder noch stärker, dass für lebende Objekte andere Gesetze gelten würden. Wie kommt es zu solchen Meinungen? Nehmen wir als Beispiel den optimalen Wurfwinkel, um einen Gegenstand möglichst weit zu werfen (siehe Abschn. 2.3). Die Physik sagt, dass der Winkel bei 45° liegt, eventuell etwas weniger wegen des Luftwiderstandes oder wenn die Abwurfhöhe nicht gleich der Höhe des Aufpralls ist. Messungen ergeben aber, dass Spitzenathleten bei einem Wurf geringere Winkel verwenden. Der

Absprungwinkel beim Weitsprung liegt sogar sehr weit von den errechneten 45° entfernt. Gelten hier die physikalischen Gesetze nicht mehr? Doch, natürlich gelten sie uneingeschränkt, aber es müssen gleichzeitig auch die biologischen Bedingungen beachtet werden. Der optimale Abwurfwinkel von 45° wird unter der Voraussetzung berechnet, dass die Abwurfgeschwindigkeit für alle Winkel gleich wäre. Der Körperbau eines Menschen lässt aber bei manchen Winkeln eine höhere Geschwindigkeit und daher ein besseres Gesamtergebnis zu.

In den Sportwissenschaften ist die Biomechanik die Disziplin, die sich mit der Anwendung der Gesetze der Mechanik auf den lebenden Organismus beschäftigt. Die Anfänge der Biomechanik reichen weit zurück. Schon Aristoteles (384–322 v. Chr.) hat sich mit Fragen zur Bewegung beschäftigt und zum Beispiel die Abhängigkeit einer Wurfbewegung vom Gewicht des geworfenen Gegenstandes thematisiert. Leonardo da Vinci (1452–1519) untersuchte mechanische Eigenschaften von Maschinen und Lebewesen und die Körperproportionen. Einen großen Fortschritt in der Untersuchung von Bewegungsabläufen brachten die technischen Möglichkeiten der Photographie im 19. Jahrhundert. Eadweard Muybridge (1830–1904) konnte durch schnell hintereinander aufgenommene Fotos Bewegungen erstmals sichtbar machen und so etwa den Flügelschlag von Vögeln und die Gangarten von Pferden untersuchen (siehe Abschn. 7.2, Reiten).

Im Laufe des 20. Jahrhunderts verfeinerten sich die Messmethoden. Kraftmessplatten und spezielle Dynamometer lieferten immer genauere Daten während der Bewegungen, die Elastizität von Sehnen wurde auch in vivo vermessen. Mit Videoaufnahmen konnten dreidimensionale kinematische Daten erhoben werden, Messungen mittels Elektromyogramm (EMG) lieferten Auskünfte über die Ansteuerung der Muskulatur. Mit mathematischen Modellen konnten Bewegungen nicht nur simuliert werden (direkte Dynamik), sondern auch manche Eigenschaften des Menschen, die nicht direkt messbar sind, errechnet werden.

In den letzten Jahrzehnten hat sich der Fokus der Biomechanik gewandelt: Die Biomechanik wird nicht mehr nur als Anwendung der Mechanik allein betrachtet, sondern auch weitere Wissenschaften wie die Physiologie, die Anatomie oder die Neurowissenschaften spielen eine große Rolle. Die Biomechanik beschäftigt sich also mit dem Zusammenwirken von physikalischen Grundgesetzen und biologischen Gegebenheiten.

Die Betrachtung dieser Wechselwirkung der Physik mit dem Menschen kann auf verschiedenen Strukturebenen erfolgen, von Molekülen und Molekülverbindungen über Muskeln, Sehnen und Knochen, den gesamten Körper eines Menschen bis zum Zusammenspiel mehrerer Sportler.

Auf molekularer Ebene geht es zum Beispiel um die Energiebereitstellung im Körper, also welche chemischen Reaktionen dem Muskel die Energie zur Kontraktion liefern und wie viel Energie pro Zeit die einzelnen Arten des Stoffwechsels liefern können. Diese Energieraten beeinflussen auch die möglichen Rekorde (Abschn. 5.1, Schwimmen). Ein weiteres Beispiel auf molekularer Ebene ist die Sauerstoffaufnahme, die vom Außendruck abhängt (Abschn. 5.2, Tauchen).

Eine Ebene höher ist die Erzeugung von Kraft und Leistung im Muskel (Abschn. 2.1, Sportliche und physikalische Leistung) zu betrachten. Die Muskelkräfte sind letztendlich die Ursache jeder sportlichen Bewegung. Je nach Geschwindigkeit können unterschiedliche Kräfte erzeugt werden (Abschn. 2.1), was wiederum auf molekularer Ebene basiert, aber sich makroskopisch auswirkt. Die Sehnen und Knochen übertragen diese Kräfte, müssen in ihrer Festigkeit aber auch den von außen einwirkenden Kräften standhalten (Abschn. 6.1, Skifahren; Abschn. 4.2, Rotationen im Geräteturnen; Abschn. 7.1, Kampfsport; Abschn. 7.2, Reiten).

Auf der Ebene des gesamten Körpers kommen Fragen der Koordination und neuronalen Ansteuerung dazu. Im Sport ist meist eine möglichst erfolgreiche Durchführung einer Bewegungsaufgabe gefragt, sei es eine große Weite, eine bestimmte Geschwindigkeit oder eine präzise Ausführung (Abschn. 2.4, Treffersicherheit). Um dieses Ziel zu erreichen, muss die Bewegung so exakt wie möglich gesteuert werden. Die Physik gibt Auskunft, welcher Spielraum dabei das biologische System hat. Die motorische Kontrolle wiederum hängt u. a. davon ab, welche mechanischen und physiologischen Voraussetzungen herrschen. So wählen etwa Radfahrer die Trittfrequenz in Abhängigkeit von der Steigung, aber auch je nach Faserverteilung und Ermüdung des Muskels.

Auf der Ebene des Zusammenspiels von Menschen können statistische Aussagen über Spielausgänge gemacht werden (Abschn. 3.1, Fußball) oder Spielzüge mit Videoanalysen und mathematischen Modellen untersucht werden (Abschn. 3.4, Volleyball).

Die Physik des Sports wird in den folgenden Kapiteln daher von einem interdisziplinären Standpunkt aus betrachtet, der auch die Einflüsse der biologischen Eigenschaften des Menschen thematisiert.

2
Grundlagen

Zu Beginn dieses Buches wollen wir einige allgemeine Themen behandeln: Energie und Leistung bei sportlichen Aktivitäten, das Verhalten von Bällen im Flug und im Kontakt mit verschiedenen Materialien, Exaktheit von Bewegungen und letztlich Höchstleistungen. Um diese grundlegenden Erörterungen anschaulicher zu gestalten, haben wir sie mit vielen Anwendungsbeispielen ergänzt. Dadurch werden in dem Kapitel mehr Sportarten angesprochen als in den weiteren: Gewichtheben, Dart, Stabhochsprung, Bowling, Kugelstoßen, …

Den Anfang bilden der Muskel und seine Fähigkeit zur Kraftentwicklung, weil dies wohl Grundlage jeden Sports ist. Ohne Kraft gibt es keine Beschleunigungen und daher auch keine sportlichen Bewegungen. Aber wie arbeitet ein Muskel und was unterscheidet Muskeln von mechanischen Federn? Wie hängt die mechanische Leistung mit der sportlichen Leistung zusammen?

Danach betrachten wir Bälle und ihr Reflexionsverhalten. Ob Tennis- oder Basketball: Alle Bälle werden beim Aufprall auf einer Fläche reflektiert, doch die einfache Regel »Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel« gilt nur in Spezialfällen. Die verschiedenen Bälle unterscheiden sich stark im Sprungverhalten, im Besonderen wenn die Bälle einen Drall haben.

Die Physik des Wurfs ist ein zentrales Element in vielen Sportarten. Dabei treten verschiedene Varianten auf: Wurf, Stoß oder Schleudern eines Gerätes. Sogar ein Sprung kann in gewissem Sinn als Wurf, nämlich als Abstoßen oder Werfen des eigenen Körpers, betrachtet werden. Je nach erwünschtem Ergebnis eines Wurfes – maximale Weite, genaues Treffen eines Ziels oder Gestalt der Flugkurve – müssen Geschwindigkeit und Abwurfwinkel den äußeren Bedingungen und den eigenen physiologischen Möglichkeiten angepasst werden.

Wovon die Treffgenauigkeit abhängt und wie man sie verbessern kann, wird danach behandelt. Ob Basketball, Schießsport oder Bowling: Bei der Treffsicherheit zählen nicht Kraft oder Schnelligkeit, sondern präzise Bewegungen.

Der Abschluss dieses Kapitels ist sportlichen Rekorden gewidmet. Wie viel Verbesserung ist noch möglich und kann man zukünftige Bestleistungen und deren Grenzen vorhersagen?

2.1 Sportliche und physikalische Leistung

Im Sport wird die Leistung meist mit dem Erreichen eines ehrgeizigen Ziels assoziiert, mit außergewöhnlichem Können oder dem Leistungspotenzial eines Sportlers. In der Physik ist der Begriff der Leistung dagegen eindeutig definiert. Die durchschnittliche Leistung P ist die in einer Zeitspanne Δt umgesetzte Arbeit W

$$P = \frac{W}{\Delta t} \ . \tag{2.1}$$

Die Einheit der Leistung ist Watt oder Joule pro Sekunde. Verrichtet eine konstante Kraft F über eine Strecke s mechanische Arbeit W, dann gilt

$$W = F \cdot s \ , \tag{2.2}$$

sofern die Richtung der Kraft in Richtung des Wegs zeigt.

Wenden wir diese einfachen Formeln auf einige Sportarten an:

Einer der extremsten Treppenläufe ist der SkyRun auf den Messeturm in Frankfurt. Dabei müssen 222 Höhenmeter über 1202 Stufen bewältigt werden. 2014 gewann der Pole Piotr Lobodzinski mit neuer Rekordzeit von 6 Minuten und 27 Sekunden. Wenn wir für seine Körpermasse $m = 70$ kg annehmen, war seine (mittlere) Leistung rein physikalisch nur

$$P = \frac{m \cdot g \cdot h}{\Delta t} = 390\,\mathrm{W}\,. \tag{2.3}$$

Der Superschwergewichtler Hossein Rezazadeh hält den Weltrekord im Gewichtheben. In der Disziplin des Stoßens hob Rezazadeh 263 kg um eine Höhe von 0,9 m und benötigte dazu 0,9 s. Mit gleicher Rechnung ergibt sich dabei eine Leistung von $P = 2600$ W.

Ein Tennisball hat beim Schlag nur etwa 5 ms lang Kontakt mit der Schlägerbespannung (siehe Abschn. 3.2). Profis beschleunigen ihn in dieser Zeit auf sehr hohe Geschwindigkeiten: Die bei einem offiziellen Turnier gemessene Höchstgeschwindigkeit beträgt 263 km/h! Sie wurde von dem australischen Tennisspieler Samuel Groth am 2. Mai 2012 bei einem Challengerturnier in Busan (Südkorea) erzielt. Der 58 g schwere Ball wurde damit von Groth mit folgender Leistung beschleunigt:

$$P = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot \Delta t} = 31\,000\,\mathrm{W}\,. \tag{2.4}$$

Allerdings wird diese enorme Leistung hauptsächlich von der Bespannung des Tennisschlägers und dem Ball aufgebracht. Die Muskeln haben zuvor den Arm über einen längeren Zeitraum mit weit geringerer Leistung beschleunigt. Also sagt die so errechnete hohe Wattzahl nur sehr wenig über die Fähigkeit unserer Muskeln aus, eine bestimmte Leistung zu erbringen.

Welche Energie setzen Muskeln um?

Messungen der Muskelleistung zeigen, dass ein 70 kg schwerer Mensch im Sitzen etwa 80 W und im Stehen fast 100 W verbraucht. Gehen mit 4,5 km/h benötigt etwa 280 W, langsames Radfahren 300–500 W, Laufen mit 12 km/h ungefähr 1100 W. Aber nur etwa ein Viertel bis maximal ein Drittel dieser im Muskel erbrachten Leistung wird in mechanische Leistung umgesetzt, der Rest geht als Wärme verloren. Zusätzlich zu diesem Leistungsumsatz benötigt der Körper noch Energie für den Grundumsatz. Bei Männern beträgt er pro Kilogramm Körpergewicht etwa 1 kcal/h. Mit einem Umrechnungsfaktor von 1 cal = 4,1868 J sind das 1,2 W. Der Grundumsatz beträgt daher für einen Mann mit 70 kg Masse etwa 80 W, bei Frauen ist er um etwa 5–10 % niedriger.

Bei Langstreckenläufern steigt die Leistung proportional zur Geschwindigkeit ($P \propto v$) (Griffing, 1988). Ähnliche Messungen beim Gehen ergaben, dass dort die Leistung weit stärker, nämlich mit der dritten Potenz, von der Geschwindigkeit abhängt ($P \propto v^3$). Man kann die Energiewerte nicht nur pro Zeiteinheit – also als Leistung – betrachten, sondern auch pro Wegeinheit. Dann zeigt sich, dass man für dieselbe Distanz beim Gehen weniger Energie als beim Laufen braucht. Das leuchtet ein, denn beim Laufen stößt sich der Körper völlig vom Boden ab. Sein Schwerpunkt wird zwischenzeitlich höher angehoben als beim Gehen.

Während jedoch beim Gehen die Energie pro Wegstrecke stark mit der Geschwindigkeit steigt, bleibt sie für das Laufen nahezu konstant. Da beim Laufen die Leistung zur Geschwindigkeit proportional ist, ist aufgrund von Formel

(2.1) die Energie (oder Arbeit) wiederum proportional zum zurückgelegten Weg – also unabhängig von der Laufgeschwindigkeit. Für einen Kilometer Laufen verbraucht eine 70 kg schwere Person ungefähr 300 kJ. Betreibt man Sport, um Gewicht zu reduzieren, so muss man daher beim Gehen auf eine möglichst hohe Geschwindigkeit achten (Power Walking). Beim Joggen spielt die Geschwindigkeit dagegen eine weit geringere Rolle.

Muskelleistung

Bei einer Feder hängt die Kraft nach dem Hooke'schen Gesetz nur von der Auslenkung ab, d.h. eine größere Auslenkung erzeugt eine größere rücktreibende Kraft. Bei Muskeln hängt die Kraft jedoch von der Geschwindigkeit ab: Je schneller ein Muskel kontrahiert, desto weniger Kraft kann er aufbringen. Diese Kraft-Geschwindigkeits-Beziehung wurde in den 1930er-Jahren von dem Physiologen Archibald Vivian Hill (1886–1977) untersucht, der 1922 den Nobelpreis für Medizin erhalten hatte. Sie kann durch folgende Hyperbelgleichung beschrieben werden (Abb. 2.1):

$$f = \frac{c}{v + b} - a \, , \tag{2.5}$$

wobei *v* die Kontraktionsgeschwindigkeit des Muskels ist; *a*, *b* und *c* sind positive Konstanten, deren Werte von Mensch zu Mensch variieren. Zum Beispiel liegen für die Knie streckenden Muskeln (im Wesentlichen musculus quadriceps) die Durchschnittswerte bei etwa a = 500 N, b = 0,44 m/s und c = 1500 W (Thaller und Wagner, 2004). Diese drei Konstanten bestimmen also die Form der Kraft-Geschwindigkeits-Kurve. Kraftsportler haben eine flachere Kurve als Ausdauersportler, denn die Krümmung der Kurve hängt mit dem Wirkungsgrad des Muskels zusammen.

Die mechanische Leistung ist das Produkt von Kraft und Geschwindigkeit (gestrichelte Kurve in Abb. 2.1). Sie erreicht ihr Maximum bei einem optimalen Geschwindigkeitswert v_{opt}, den man aus der Leistungskurve

$$P = f \cdot v = \left(\frac{c}{v+b} - a\right) \cdot v \tag{2.6}$$

erhält. Dazu differenziert man nach der Geschwindigkeit v und erhält nach Nullsetzen des resultierenden Ausdrucks:

$$v_{opt} = \sqrt{\frac{b \cdot c}{a}} - b\,. \tag{2.7}$$

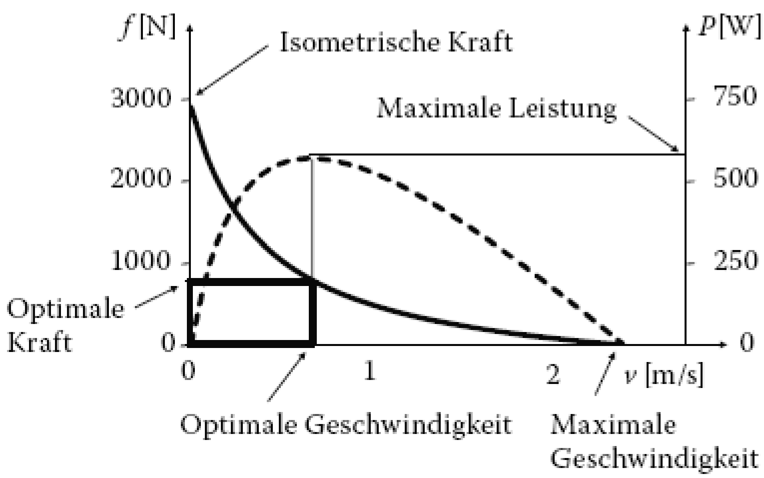


Abb. 2.1 Kraft und Leistung im Muskel: Kraft-Geschwindigkeits-Relation (durchgezogene Kurve, linke Skala) und Leistungs-Geschwindigkeits-Relation (gestrichelte Kurve, rechte Skala) in der Kniestreckmuskulatur. Das Maximum der Leistungskurve entspricht der Fläche des Rechtecks unter der Kraftkurve.

Bei vielen Sportarten versucht der Athlet, im optimalen Kraft- und Geschwindigkeitsbereich zu bleiben. Ein Radfahrer kann durch die Wahl des für ihn richtigen Ganges die Bewegungsgeschwindigkeit beeinflussen. Individuelle Unterschiede zeigen sich auch deutlich bei den

Radprofis: Obwohl sie auf Bergstrecken annähernd die gleiche Leistung erbringen, kann sich die Trittfrequenz, und damit auch der Krafteinsatz, beträchtlich unterscheiden.

Energiebereitstellung im Muskel

Die Energie für die Muskelkontraktionen wird aus der Überführung von Adenosintriphosphat (ATP) in Adenosindiphosphat (ADP) gewonnen. Der Vorrat an ATP im Muskel reicht allerdings nur für einige Sekunden aus. Für längere Muskelbeanspruchung muss ATP laufend aus anderen Energiequellen erzeugt werden. Diese Quellen sind erstens der anaerobe, also sauerstofffreie, Abbau von Kreatinphosphat (KP) oder Zucker und zweitens die oxidative Umwandlung von Zucker und Fett (siehe Infobox 2.1). Sportlich gesehen reicht der geringe ATP-Vorrat der Muskeln nur für Wurfbewegungen beim Speerwerfen, Kugelstoßen oder in den Ballsportarten. Die Ausschöpfung des KPSpeichers spielt auch bei Hundertmetersprintern, beim Gewichtheben und Hammerwerfen eine große Rolle. Sportarten, die im anaeroben Bereich ausgeübt werden, sind unter anderem Laufwettbewerbe bis zum Zweihundert- und Vierhundertmeterlauf.

Infobox 2.1: Muskelenergie

Die für die Muskeln benötigte Energie wird durch Abspaltung eines Phosphoratoms vom Molekül Adenosintriphosphat (ATP) gewonnen:

$$\mathrm{ATP} \rightarrow \mathrm{ADP} + \mathrm{P} + \mathrm{Energie}\ .$$

Dabei entsteht Adenosindiphosphat (ADP). Es kann durch drei Prozesse wieder zu ATP umgewandelt werden (Abb. 2.2).

1. KP-Prozess: Kreatinphosphat (KP) ist ein Energiespeicher des Muskels. Er kann kurzfristig ATP unter Abgabe des Phosphoranteils und Umwandlung zu Kreatin (K) aufbauen:

   $$\mathrm{ADP} + \mathrm{KP} \rightarrow \mathrm{ATP} + \mathrm{K}\ .$$

   Bei maximaler Belastung reicht der KP-Vorrat etwa für 30 s, sonst bis zu einigen Minuten. Ist er leer, braucht er zur Regeneration zwei bis fünf Minuten.

2. Anaerobe Glykolyse: Nach einer halben Minute wird ATP hauptsächlich durch Abbau von Zucker erzeugt. Dies kann ohne (anaerob) oder mit (aerob) Sauerstoffzufuhr ablaufen. Die anaerobe Variante ist die schnellere, wobei Glucose in Milchsäure (Lactat) umgewandelt wird:

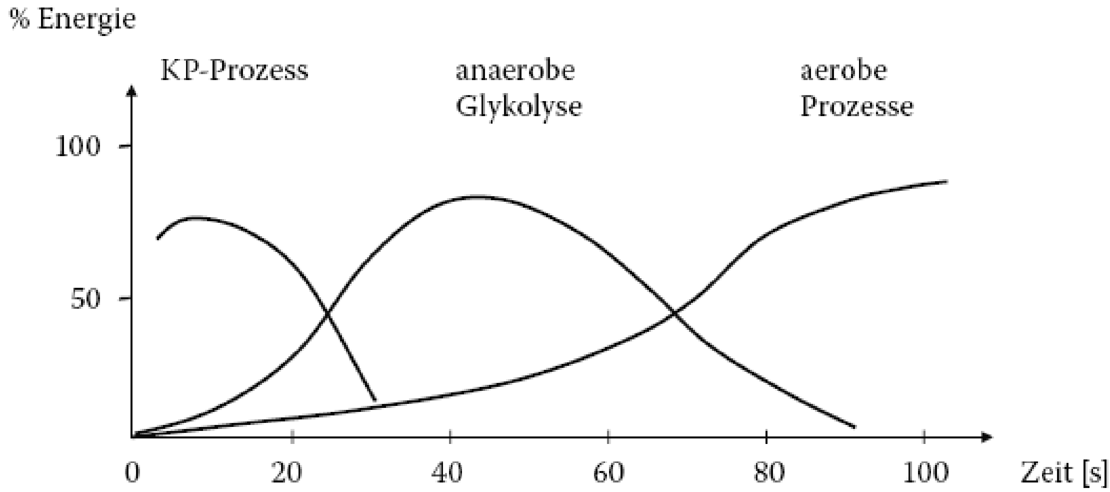


Abb. 2.2 Prozentualer Anteil der Energie liefernden Prozesse an der Energiegewinnung im Muskel.

$$1\,\text{Glucose} + 2\,\text{Phosphat} + 2\,\text{ADP} \rightarrow \text{Lactat} + 2\,\text{ATP}\ .$$

Dieser Prozess ist der dominierende in einem Zeitintervall von etwa 20–60 s nach Beginn der Aktivität.

3. Aerobe Glykolyse und Lipolyse: Der aerobe Prozess ist nach etwa einer Minute vorherrschend. Bei genügend Sauerstoff werden Zucker (durch Glykolyse) oder Fettsäuren (durch Lipolyse) vollständig zu Kohlendioxid und Wasser verbrannt:

$$\begin{aligned}
&1\,\text{Glucose}(C_6H_{12}O_6) + 38\,\text{P} + 38\,\text{ADP} + 6\,O_2 \\
&\quad \rightarrow 6\,CO_2 + 6\,H_2O + 38\,\text{ATP} \\
&1\,\text{Palmitinsäure}(C_{16}H_{32}O_2) + 130\,\text{P} + 130\,\text{ADP} + 23\,O_2 \\
&\quad \rightarrow 16\,CO_2 + 16\,H_2O + 130\,\text{ATP}\ .
\end{aligned}$$

Das Kohlenhydrat Glucose ist in den Muskeln und in der Leber in Form von Glykogen gespeichert. Die aerobe Umwandlung der Glucose aus den Muskeln reicht für eine starke Ausdauerbelastung bis etwa eineinhalb Stunden. Bei niedriger Belastung wird Muskelenergie dagegen fast ausschließlich aus Fett gewonnen. Läuft man wie beim Joggen bei niedriger Belastung, so wird Energie vornehmlich über Fettverbrennung zugeführt. Deren Energierate ist zwar geringer als bei der Oxidation von Kohlenhydraten, aber die Vorräte sind größer. Selbst bei schlanken Menschen beträgt die in den Fettdepots gelagerte Energiemenge mehr als 70 000 kcal, die in Glykogen gespeicherte Energie etwa 2500 kcal.

Für die aerobe Leistung ist entscheidend, wie viel Sauerstoff dem Muskel zur Verfügung gestellt wird. Der limitierende Faktor dabei ist meist nicht die Sauerstoffzufuhr über die Atmung, sondern der Transport über das Herz-Kreislauf-System und die Aufnahme im Muskel. Der Transport wird von der Pumpleistung des Herzens und von der Anzahl der roten Blutkörperchen als Sauerstoffträger bestimmt. Der Übergang von Sauerstoff auf die Muskelzellen erfolgt über feine Blutgefäße. Ein Ausdauertraining erweitert und vermehrt diese Kapillaren und macht sie effizienter.

Ist nicht genügend Sauerstoff vorhanden, läuft parallel der anaerobe Prozess ab. Dabei entsteht Milchsäure. Kann diese nicht schnell genug abgebaut werden, kommt es zur Übersäuerung des Muskels und auch zu einem Erliegen der Glykolyse. Früher galt diese Übersäuerung als Ursache für Muskelkater. Neue Untersuchungen zeigen, dass Mikrorisse in den Muskeln dafür verantwortlich sind (Wilmore und Costill, 2004).

Kraftfutter

Nicht allein durch Training kann man seine Leistung steigern, sondern auch durch die Nahrung. Die Auswahl reicht von üblichen Nahrungsmitteln über Nahrungsmittelzusätze bis zu Dopingmitteln.

Zwei wichtige Nahrungskomponenten sind Eiweiße und Kohlenhydrate. Fleischgerichte sorgen vorwiegend für die natürliche Eiweißzufuhr, Getreideprodukte wie Nudeln, Haferflocken, Müsli und Brot liefern Kohlenhydrate. Verschiedene Sportarten brauchen von diesen Komponenten unterschiedliche Mengenverhältnisse. Kraftsportler benötigen 30 % und auch mehr an Eiweiß zum Muskelaufbau. Bei Sportarten, die auf Kraftausdauer (Rudern) oder Schnellkraft (Sprint, Karate) setzen, sinkt dieser Anteil auf etwa 15 %, bei Ausdauersportarten auf bis zu 10 %. Im gleichen Ausmaß steigt die nötige Kohlenhydratzufuhr, von etwa 55 % der Energieaufnahme bei Kraftsportarten bis über 70 % bei Ausdauersport. Der Fettanteil sollte in der Sportlernahrung bei etwa 25 % der Energieaufnahme liegen.

Muskeln können aus Glykogen pro Liter eingeatmeten Sauerstoffs mehr Leistung gewinnen als aus Fettsäuren. Die Glykogenvorräte sind also besonders wichtig, und sie lassen sich durch folgende Prozedur steigern: Zuerst entleert man durch intensivste Dauerbelastung den Glykogenspeicher völlig. Dann führt man etwa drei Tage lang Kohlenhydrate in großer Menge zu (»Carbo Loading«). Nach dem ersten Tag erreicht der Glykogenhaushalt ungefähr den Stand vor der Entleerung, nach zwei weiteren Tagen steigt er auf etwa das Dreifache.

Nahrungsmittelzusätze ermöglichen es, die für hohe Sportleistungen notwendigen Stoffe in konzentrierter Form aufzunehmen. Ein Beispiel ist das Kreatin, das in Fisch und Fleisch vorkommt. Für die erste Phase einer intensiven Bewegung ist der Vorrat an Kreatin wesentlich, doch er ist relativ bald erschöpft. Zweihundertmeterläufer werden zum Beispiel auf den letzten 30–40 m langsamer, was vermutlich durch den Rückgang des Kreatinvorrats verursacht wird. Bei einigen Sportarten nehmen die Sportler deshalb vor Wettkämpfen massiv Kreatin zu sich.

Diese Kreatinsupplementierung hat aber auch Nachteile. Unter anderem nimmt das Gewicht zu, weil Kreatin Wasser im Muskel bindet.

Dringend abzuraten ist von Doping. Um massivere Muskeln aufzubauen, werden Steroide und Wachstumshormone verwendet. Blutdoping führt zu einer verbesserten Sauerstoffzufuhr. Heute wird dazu Erythropoietin (EPO) verwendet, das die Bildung roter Blutkörperchen im Rückenmark anregt. Dabei verdickt sich allerdings das Blut, was die Gesundheit schädigt und sogar zum Tod führen kann (Wilmore und Costill, 2004).

2.2 Bälle

Viele Ballsportarten nutzen das Reflexionsverhalten von Bällen gezielt aus. Ganz offensichtlich ist das beim Billard oder Squash. Basketballer geben dem Ball beim Wurf einen Backspin (Rückwärtsdrehung), damit er nach dem Abprall vom Brett eher in den Korb trifft. Tennis- und Tischtennisspieler versuchen ihre Gegner zu überraschen, indem sie dem Ball einen Spin verleihen, der dadurch zunächst seine Flugkurve und dann sein Abspringverhalten vom Boden verändert.

Reflexion

Lässt man einen Ball senkrecht ohne Drehung auf den Boden fallen, so springt er wieder senkrecht zurück. Für die folgenden Überlegungen wollen wir zuerst nur die Beträge der Geschwindigkeiten betrachten: Ein Maß für die Sprungfähigkeit ist der Restitutionskoeffizient *e*, der als Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit des Balles nach (v_2) und vor dem Aufprall (v_1) definiert ist:

$$e = \frac{v_2}{v_1} \,. \tag{2.8}$$

Bei einem vollkommen elastischen Stoß ohne Energieverlust gilt $e = 1$, bei einem völlig unelastischen Stoß $e = 0$.

Fällt ein Ball ohne Luftwiderstand aus einer Höhe h, so kommt er am Boden mit einer Geschwindigkeit v an:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}\ . \tag{2.9}$$

Springt der Ball nach dem Aufprall mit einer Geschwindigkeit v ab, so erreicht er wieder dieselbe Höhe, die durch Gl. (2.9) gegeben ist.

Damit kann man den Restitutionskoeffizienten auch näherungsweise durch folgende Relation bestimmen:

$$e = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}\ . \tag{2.10}$$

Dabei wird der Ball aus einer Höhe h_1 fallen gelassen und springt danach auf die Höhe h_2 hoch.

Fällt ein Tennisball aus einer Höhe $h = 1$ m, dann trifft er mit der Geschwindigkeit $v1 = 4{,}4$ m/s senkrecht auf den Boden auf. Der Restitutionskoeffizient e für einen Tennisball beträgt etwa 0,8 und die Kontaktzeit $\tau = 5$ ms (Brody, 1984). Die vertikale Geschwindigkeitsdifferenz vor und nach dem Stoß ist

$$\Delta v = v_2 - (-v_1) = v_1 \cdot (1 + e)\ . \tag{2.11}$$

Für den Tennisball ist der Betrag dieser Differenz $\Delta v = 8$ m/s.

Damit beträgt die durchschnittliche Beschleunigung in vertikaler Richtung beim Aufprall

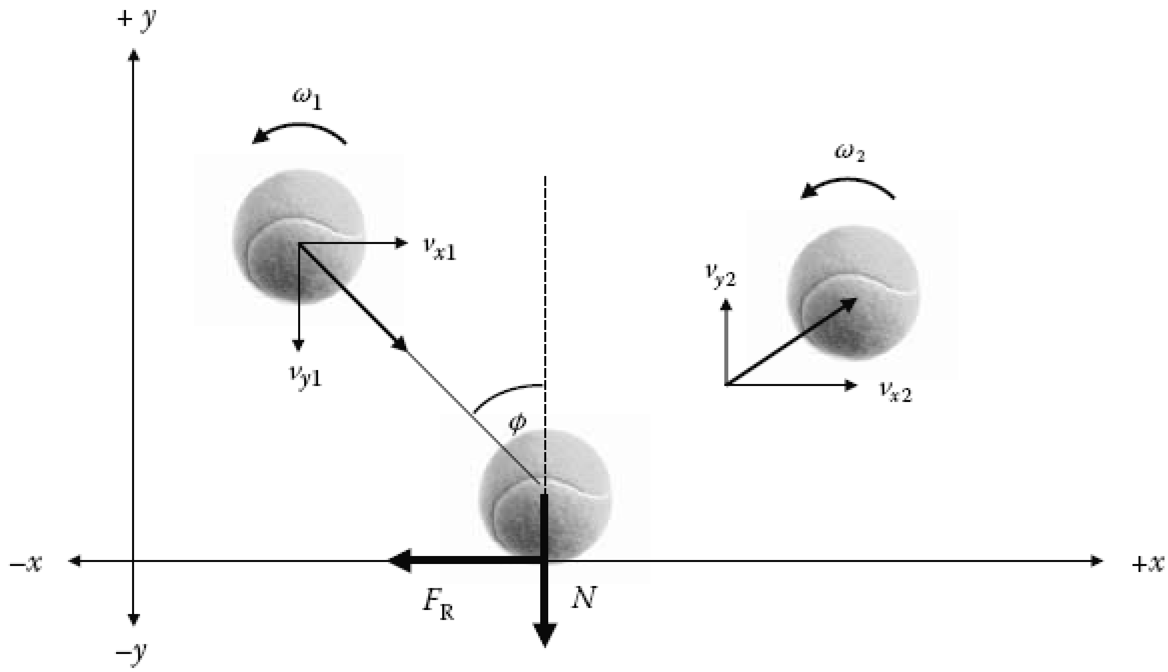
$$a_y = \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\tau}\ , \tag{2.12}$$

etwa a_y = 1600 m/s^2. Dies ist mehr als das 150-fache der Erdbeschleunigung. Daher können wir die Gewichtskraft bei den folgenden Betrachtungen außer Acht lassen.

Von nun an wollen wir auch die Vorzeichen der Geschwindigkeiten berücksichtigen. Betrachten wir zuerst das Auftreffen eines Balles mit Einfallswinkel φ auf eine waagerechte Fläche. Seine Geschwindigkeit vor dem Aufprall ist in eine waagerechte (v_{x1}) und in eine senkrechte (v_{y1}) Komponente zerlegbar (Abb. 2.3). Weil wir ein rechtshändiges Koordinatensystem verwenden, ist v_{y1} negativ. Eine Drehung des Balles im Uhrzeigersinn führt dementsprechend zu einer negativen Winkelgeschwindigkeit ω_1, während der positive Drehsinn gegen den Uhrzeigersinn läuft.

Wenn ein Ball rollt, ist der Berührungspunkt des Balls mit dem Boden in Ruhe. Die Translationsgeschwindigkeit v und die Winkelgeschwindigkeit ω hängen miteinander zusammen. Rollt der Ball auf einer horizontalen Unterlage, gilt die Beziehung die auch Rollbedingung genannt wird.

$$v_x = -r\omega \ , \qquad (2.13)$$



[Abb. 2.3](#) Reflexion eines Balles an einer waagrechten Ebene.

Dreht sich der Ball schneller oder langsamer, hat der Berührungspunkt eine Relativgeschwindigkeit zum Boden: der Ball gleitet. Dies gilt, wenn der Ball mit beliebiger Geschwindigkeit und Drehung auf den Boden auftrifft. Allerdings kann der Ball, obwohl er eigentlich gleiten sollte, durch seine Materialeigenschaften am Boden haften. Die abrupte Geschwindigkeitsänderung verformt ihn dann (eine geringe Verformung tritt immer auf), und seine elastischen Eigenschaften beeinflussen sein Reflexionsverhalten wesentlich.

Gleiten

Tennisbälle ziehen beim Aufprall oft eine längliche Spur im Sand. Während des Kontakts mit dem Platz gleiten sie also – zudem rollen sie eventuell. Betrachten wir zuerst einen Aufprall, bei dem der Ball über die Oberfläche gleitet. Die Reibung ist also so klein, dass der Ball nicht genug Winkelgeschwindigkeit erreicht, um zu rollen. Beim

Aufprall wirken auf ihn drei Kräfte: die Gewichtskraft, die Normalkraft und eine Reibungskraft.

Trifft ein Ball schräg auf eine Unterlage, kann seine Bewegung in die x- und die y-Richtung zerlegt werden (Abb. 2.3). Die senkrechte Geschwindigkeit v_{y2} nach dem Aufprall ist von einer waagerechten Reibungskraft unabhängig und ergibt sich wie beim senkrechten Aufprall direkt aus dem Restitutionskoeffizienten:

$$v_{y2} = -e \cdot v_{y1} \ . \qquad (2.14)$$

Die Geschwindigkeit und der Impuls in x-Richtung ändern sich durch Reibungskräfte

$$|F_\mathrm{R}| = \mu \cdot N \ , \qquad (2.15)$$

die vom Reibungskoeffizient μ und von der Normalkraft N abhängen. Je nach Drehgeschwindigkeit des Balles ist F_R positiv oder negativ, denn entweder bremst seine Drehung ihn beim Bodenkontakt ab oder beschleunigt ihn. Wie schnell der Ball rotiert, geht nicht in Formel (2.15) ein – die Reibung ist geschwindigkeitsunabhängig. Ein Tennisball hat übrigens auf einer glatten Oberfläche einen Reibungskoeffizient von zirka $\mu = 0{,}3$, auf einer rauen Oberfläche etwa $\mu = 0{,}7$ (Cross, 2002).

Die Normalkraft N hängt über das zweite Newton'sche Gesetz

$$F = m \cdot a \qquad (2.16)$$

von der Beschleunigung in y-Richtung ab:

$$N = m \cdot \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} \ . \qquad (2.17)$$

Sie kann zusammen mit der Gewichtskraft als Bodenreaktionskraft gemessen werden. Dieses

Newton’sche Bewegungsgesetz kann auch in folgender Form angeschrieben werden:

$$m \cdot (v_{y2} - v_{y1}) = \int N \, \mathrm{d}t \; . \tag{2.18}$$

Für die Impulsänderung in *x*-Richtung ergibt sich damit:

$$\begin{aligned} m(v_{x2} - v_{x1}) &= \int F_\mathrm{R} \, \mathrm{d}t \\ &= -\int \mu \cdot N \, \mathrm{d}t \\ &= -\mu \cdot m(v_{y2} - v_{y1}) \; . \end{aligned} \tag{2.19}$$

Diese Gleichung gilt nur für eine Impulsverringerung, wenn also die Drehgeschwindigkeit geringer als die Rollgeschwindigkeit ist, weil dann die Reibungskraft in Gl. (2.15) negativ wird. Bei schnelleren Rotationen muss eine positive Reibungskraft genommen werden.

Für die waagrechte Geschwindigkeitskomponente nach dem Aufprall erhält man daher mit Gl. (2.14)

$$v_{x2} = v_{x1} + \mu \cdot v_{y1}(1 + e) \; . \tag{2.20}$$

Sie hängt also vom Reibungskoeffizienten und von der Elastizität des Balles ab, zudem von seiner senkrechten Geschwindigkeit vor dem Aufprall. Das ist nicht verwunderlich, weil ja die senkrechte Geschwindigkeit die Normalkraft beeinflusst und damit auch die Reibung. Umgekehrt beeinflusst die Geschwindigkeit in *x*-Richtung aber nicht die senkrechte Geschwindigkeit nach dem Stoß, weil die Reibungskräfte nur waagrecht wirken.

Auch die Rotation ändert sich durch den Aufprall. Die Reibungskraft F_R greift im Auflagepunkt des Balles an und erzeugt ein Drehmoment. Ist die Reibungskraft negativ, also in Abb. 2.3 nach links gerichtet, ergibt sich ein negatives Drehmoment $r \cdot F_R$ im Uhrzeigersinn, wobei r den Radius des Balles bezeichnet. Die Änderung des Drehimpulses kann analog zur Impulsänderung (Gl. (2.19)) beschrieben werden:

$$I(\omega_2 - \omega_1) = r \cdot \int F_R \, dt \, . \tag{2.21}$$

Dabei ist

$$I = \alpha \cdot m \cdot r^2 \tag{2.22}$$

das Trägheitsmoment des Balls. α ist bei einer Vollkugel 2/5, bei einer Hohlkugel gilt dagegen $I = 2/3 \cdot m \cdot r_m^2$, wobei r_m der über die Hüllendicke gemittelte Radius ist. Ein Tennisball besteht aus mehreren Schichten: Der äußere Radius ist $r = 33$ mm, der mittlere $r_m = 30$ mm und der Parameter $\alpha = 0{,}55$ (Cross, 2002). In Tab. 2.1 sind einige Balleigenschaften aufgelistet.

Setzt man in Gl. (2.21) den in Gl. (2.19) abgeleiteten Ausdruck für das Integral ein, erhält man unter Verwendung von Gl. (2.20)

$$\alpha \cdot m \cdot r^2(\omega_2 - \omega_1) = r \cdot \mu \cdot m v_{y1}(1 + e)$$

und daraus

$$\omega_2 = \omega_1 + \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{1}{r} \cdot \mu \cdot v_{y1} \cdot (1 + e) \, . \tag{2.23}$$