Einfache Themen zur Physik des Sports

von H. Joachim Schlichting

Der Mensch an sich selbst insofern er sich seiner gesunden Sinne bedient, ist der größte und genaueste physikalische Apparat, den es geben kann, und das ist eben das größte Unheil der neueren Physik, daß man die Experimente gleichsam vom Menschen abgesondert hat und bloß in dem, was künstliche Instrumente zeigen, die Natur erkennen, ja, was sie leisten kann, dadurch beschränken und beweisen will.

J. W. v. Goethe

Vorbemerkung

Im folgenden stellen wir eine Auswahl physikalischer Sachverhalte und Modelle zusammen, die für sportliche Aktivitäten einerseits und die Funktionsweise sportlicher Geräte und Hilfsmittel andererseits von Bedeutung sind. Diese Zusammenstellung soll Lehrern als fachlicher Hintergrund und Quelle möglicher Inhalte für den Physikunterricht dienen, in dem es um die Behandlung sportlicher Aktivitäten geht. Die Darstellung beruht weitgehend auf einfachen Modellen. Neben einer rein qualitativen Erklärung (Je-desto-Aussagen), werden in einigen Fällen Formeln benutzt, die dem Lehrer ggf. eigene numerische Abschätzungen ermöglichen. Der Einfachheithalber beschränken wir uns dabei auf die Beträge der auftretenden Vektorgrößen.

Energetik des Menschen

Das Ding, von dessen Augen und Ohren wir nichts und von dessen Nase und Kopfe wir nur sehr wenig sehen, kurz unser Körper.

G. Chr. Lichtenberg

Der menschliche Körper - ein offenes thermodynamisches Modell

Bei sportlichen Aktivitäten steht der Mensch im Mittelpunkt. Möglichkeiten und Grenzen der Aktivitäten werden vor allem von seinen körperlichen Fähigkeiten, den Muskelkräften, dem (mechanischen) Leistungsvermögen und der Beherrschung von Techniken bestimmt.

Um einen Zugang zu den physikalischen Aspekten dieser Aktivitäten zu ermöglichen, betrachten wir den Menschen unter stark reduktionistischer Perspektive als ein *offenes thermodynamisches System*. Dieses System vermag sich durch Aufnahme hochwertiger chemischer Energie und Stoffe (in Form von Nahrungsmitteln und Sauerstoff) und Abgabe von minderwertiger Energie und Stoffe (Wärme, Kohlendioxid und andere Ausscheidungen), also letztlich durch *Entwertung von Energie*, in einem dynamischen Zustand fernab vom thermischen Gleichgewicht zu halten. Dazu gehört auch das Vermögen, auf die Umwelt einzuwirken und seine physischen Beziehungen zur Umwelt aktiv und bewußt zu gestalten, also insbesondere den verschiedensten lebensnotwendigen Verrichtungen nachzugehen, aber auch beispielsweise sich sportlich zu betätigen. (Weitere Vertiefung siehe z. B. [l].)

Energieumsatz bei verschiedenen sportlichen Aktivitäten

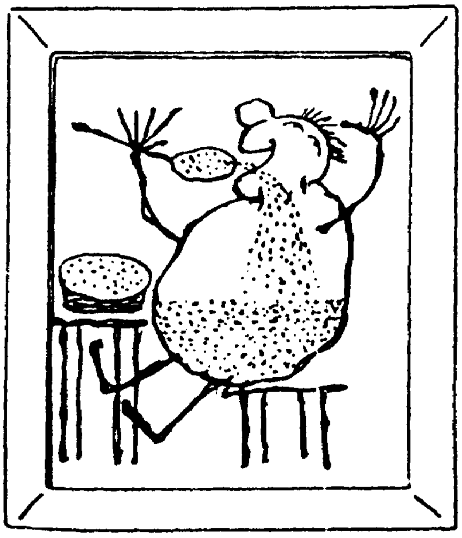
Der menschliche Organismus nutzt die in den Nahrungsmitteln steckende hochwertige Energie *(Abb. 1)*. Sie dient letztlich dazu, die durch die vielfältigen Körperfunktionen (Bluttransport, Muskeltätigkeit, Gehirntätigkeit usw.) verbrauchte, also entwertete, Energie ständig zu ersetzen und den Organismus funktionstüchtig zu halten. Ein (völlig inaktiver) Erwachsener (Körpermasse m = 70 kg) verbraucht dafür täglich im Schnitt 7000 kJ hochwertiger chemischer Energie. Dem entspricht eine Leistung von P_{GU} = 7000 kJ/(24 · 3600) s = 81 W, die sich in der Abgabe von Körperwärme äußert. Dieser Grundumsatz dient u. a. der Aufrechterhaltung der Herztätigkeit (200 kJ/Tag) und der Atmung (250 kJ/Tag). Alle zusätzlichen „Aktivi-täten", z. B. das Heben einer Masse *m* um eine Höhe *h*, erfordern einen zusätzlichen spezifischen Energieumsatz (*Tab. I*).

Der Mensch ist keine Wärmekraftmaschine

In unserm Körper ist das Feuer immer wirksam ohne zu brennen.

G. Chr. Lichtenberg

Dieser zusätzliche Energieumsatz ist jedoch größer als die an der Umgebung verrichtete Arbeit. Denn bei der Umwandlung der in den Nahrungsmitteln enthaltenen chemischen Energie in (mechanische) Muskelenergie treten Energieverluste auf. Es liegt daher nahe, wie bei einer Wärmekraftmaschine von einem Wirkungsgrad zu sprechen, der das *Verhältnis von Nutzen* (an die Umgebung abgegebene mechanische oder elektrische Energie) und *Aufwand* (chemische Energie der Nahrungsmittel oder der Kohle) angibt.



Hier thront der Mann auf seinem Sitze
Und ißt z. B. Hafergrütze.
Der Löffel führt sie in den Mund,
Sie rinnt und rieselt durch den Schlund,
Sie wird, indem sie weiterläuft,
Sichtbar im Bäuchlein angehäuft. –

So blickt man klar, wie selten nur,
Ins innere Walten der Natur. –
W. Busch

Abb. 1: Die Sportler beziehen ihre Energie aus den Nahrungsmitteln.

Der *maximale Wirkungsgrad 0* einer Wärmekraftmaschine ist bestimmt durch die absolute Temperatur des Dampfkessels T und der Umgebung T_u:

$$\eta = 1 - \frac{T_u}{T} .$$

Würde der menschliche Organismus wie eine Wärmekraftmaschine arbeiten, so ergäbe sich ausgehend von einer Umgebungstemperatur von 20 °C (T_u = 293 K) und einer Körpertemperatur von 37 °C (T = 310 K) nach dieser Formel ein maximaler Wirkungsgrad von 5 %. In Wirklichkeit treten aber viel größere Wirkungsgrade auf. Beispielsweise arbeitet die Atmungsmuskulatur mit einem Wirkungsgrad von bis zu 60 %, und selbst der Gesamtorganismus bringt es bei effektiver Arbeitsweise noch auf 25 %.

Um einen solchen Wirkungsgrad zu erreichen, müßten - wiederum nach obiger Formel - im Körper Temperaturen von mindestens 460 °C auftreten. Das ist aber rein physiologisch ausgeschlossen. Die Energetik des Menschen muß demnach völlig anders organisiert sein als die einer Wärmekraftmaschine. Während in einer Wärmekraftmaschine der verlustreiche Umwandlungsumweg über die Wärmeenergie (Verbrennung) gewählt wird, findet in den Muskeln eine Direktumwandlung der aus den Nahrungsmitteln stammenden chemischen Energie in mechanische Energie statt.

Bei sportlichen Übungen sind wir häufig in der Lage, die an der Umgebung verrichtete Leistung, den Leistungsoutput P_{out}, auf einfache Weise abschätzen zu können. Demgegenüber ist man meist am Leistungsinput P_{in} interessiert, der Leistung, die insgesamt vom Organismus dafür aufgebracht werden muß. Sofern es sinnvoll erscheint, einen konstanten Wirkungsgrad *0* anzunehmen (was jeweils bei einer bestimmten sportlichen Übung näherungsweise der Fall ist), kann man von folgendem Zusammenhang zwischen P_{out} und P_{in} ausgehen:

$$P_{in} = P_{GU} + \frac{P_{out}}{\eta} , \qquad (1)$$

dabei ist P_{GU} die Grundumsatzrate und *0* der Wirkungsgrad. Die durch die Atmung unterhaltenen chemischen Reaktionen zur Freisetzung der Nahrungsmittelenergie laufen pauschal gesehen darauf hinaus, daß die Nahrungsmittel durch Verbindung mit Luftsauerstoff in anorganische Konstituenten Wasser und Kohlenstoffdioxid zerfallen. Z. B. verbindet sich 1 Mol Traubenzucker mit 6 Mol Sauerstoff und zerfällt dabei in 6 Mol Wasser und Kohlenstoffdioxid:

$$[CH_2O]_6 + 6O_2 \rightarrow H_2O + 6\ CO_2 + 2830 \text{ kJ}$$

Da 6 Mol Sauerstoff ein Volumen von 22,4 l x 6 = 134,4 l einnehmen, ist ein Sauerstoffumsatz von 1l mit einer Energieabgabe von (2830/134,4) kJ = 21 kJ verbunden. Allgemein kann man davon ausgehen, daß 1l O_2 20,5 kJ liefert fast unabhängig von der Art der Nahrungsmittel [2]. Da der Sauerstoff zu etwa 20 % in der Luft enthalten ist und bei der Atmung etwa 20 - 25 % davon genutzt wird, kann man sich als Faustformel merken, daß 1 l ein- bzw. ausgeatmete Luft mit dem Umsatz von 1 kJ Energie verbunden ist.

Die Atemluft als Maß des Energieumsatzes

Da die einmal ausgehauchte Luft zum Einatmen untiichtig wird, so ist wahrscheinlich, daß sie wohl zu mehrerem dienen muß, als zur Abkühlung des Blutes.

G. Chr. Lichtenberg

Diese enge Beziehung zwischen Atemluft und umgesetzter Energie ist den Schülern rein intuitiv klar: Je stärker sie sich anstrengen, je mehr Energie sie an die Umgebung abgeben, desto schneller und „tiefer” müssen sie atmen. Daher liegt es nahe, im Unterricht eine grobe Abschätzung des Leistungsinputs durch Messung der ausgeatmeten Luftmenge vorzunehmen. Dazu wird zunächst der Leistungsinput im Ruhezustand abgeschätzt: Man stellt die Atemfrequenz fest und ermittelt die Luftmenge, die jeweils ausgeatmet wird (Ausatmen in einen schlaffen Luftballon und Ausmessen des Volumens. Mehrmals wiederholen und Mittelwert bilden). Wird man jetzt sportlich aktiv (z. B. 20 Kniebeugen), so kann man aus der Zunahme der Atemfrequenz und des Luftvolumens die Zunahme des Leistungsinputs über den Ruheumsatz hinaus feststellen. Mit einem Fahrradergometer kann man für einen Durchschnittserwachsenen bei einem Leistungsoutput von 75 W einen Mehrverbrauch von etwa 1/3 l Luft pro Sekunde feststellen. Dem entspricht also ein Leistungsinput von etwa 330 W. Gemäß Formel (1) stellt man demnach einen Wirkungsgrad von 0 = 30 % fest. Ein realistischerer Wert liegt bei etwa 20 - 25 %.

Energetik der Fortbewegung

Eine der mancherley Bedingungen des physischen Daseins ist körperliche Bewegung.

K. G. Schelle 1802

Der Sprung aus dem Stand

Eine der einfachsten ,,sportlichen" Übungen ist der Sprung aus dem Stand. Aus der Sprunghöhe h läßt sich die „Höhen"-Energie ermitteln:

$E_{pot} = m \cdot g \cdot h.$

Dabei ist m die Körpermasse des Springers und g die Erdbeschleunigung. Wir gehen der Einfachheit

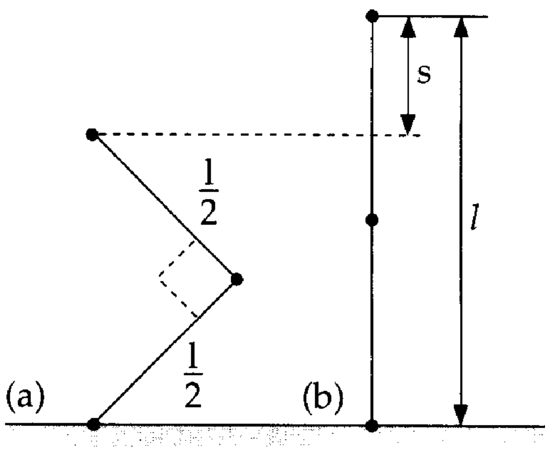


Abb. 2: a) Modell des gebeugten (Hochstellung) und b) des gestreckten Beins.

halber davon aus, daß E_{pot} aufgebracht wird durch die Wirkung einer mittleren Beinmuskelkraft F_B, die auf einer Beschleunigungsstrecke s wirkt, so daß

gilt: $F_B = \frac{mgh}{s}$ (3)

Die Beschleunigungsstrecke s läßt sich gemäß *Abb. 2* unter der vereinfachenden Annahme, daß Unter- und Oberschenkel gleich lang sind und beim Absprung einen rechten Winkel bilden, aus der Beinlänge l ermitteln: $s = l\left(1 - 1\sqrt{2}\right)$.

Daß diese Modellvorstellung vernünftig ist, kann man leicht überprüfen. Erfahrungsgemäß kann ein Mensch je nach Konstitution das 0,5- bis 1fache seines Körpergewichts $G = mg$ tragen. Daraus folgt, daß die Beinmuskeln etwa eine Kraft von $1{,}5 \cdot m \cdot g$ bis $2 \cdot m \cdot g$ aufzubringen vermögen. Geht man davon aus, daß jemand aus dem Stand 40 cm hoch springt, so ergibt sich nach der obigen Formel $F_B = 1{,}6 \cdot m \cdot g$, was in diesem Bereich liegt.

Hubmodell des Gehens

Aufgrund der Tatsache, daß der Mensch beim Gehen seinen Schwerpunkt hebt und senkt, kann man vermuten, daß der Energiebedarf des Gehens in grober Näherung aus der potentiellen Energie, die bei jedem Schritt entwertet wird, abgeschätzt werden kann. Ein typischer Wert für den Schwerpunktshub d eines Erwachsenen beträgt 3 cm. Berücksichtigt man, daß dieser Hub mit einer Schrittfrequenz v erfolgt, so ergibt sich für den entsprechenden Leistungsoutput $P_{out} = mgdv$.

Beispiel: Für einen Durchschnittserwachsenen (m = 70 kg, l = 85 cm), der (2) mit 2 Schritt pro Sekunde läuft, ergibt sich demnach ein Leistungsoutput von 42 W. Demgegenüber berechnet man gemäß *Tabelle 1* mit Hilfe von Gl. (1) einen Leistungsoutput von 52 W. In dieser Diskrepanz kommt zum Ausdruck, daß u. a. der Energieverbrauch aufgrund der Bewegung der Schenkel unberücksichtigt geblieben ist.

Geht man außerdem davon aus, daß die Schrittweite w unseres Durchschnittsmenschen gleich seiner Beinlänge l ist, so ergibt sich eine Gehgeschwindigkeit von

$v = vw = vl \approx 1{,}7\ m/s \approx 6\ km/h.$ (4)

Pendelmodell des Gehens

Die Gangart, die sich einstellt, wenn man sich weder bemüht, besonders schnell voranzukommen, noch betont langsam zu sein, sollte besonders ökonomisch und bequem zugleich sein. Es erscheint plausibel, daß ein derartiges „natürliches" Gehen unter optimalen physikalischen Bedingungen erfolgt. Wir gehen davon aus, daß dies der Fall ist, wenn die Beine wie physikalische Pendel in ihrer natürlichen (Eigen-)Frequenz v_n frei schwingen. Der Gedanke, die Beine als Pendel zu betrachten, drängt sich geradezu auf, wenn man einen Menschen auf einem Laufband gehen sieht, ohne daß er von der Stelle kommt. Aus der Schrittfrequenz = Pendelfrequenz und der Beinlänge läßt sich die Gehgeschwindigkeit leicht abschätzen (*siehe Infokasten 1*). Es zeigt sich, daß die Geschwindigkeit nur sehr schwach von der Beinlänge abhängt. Dem entspricht die Erfahrung, daß Menschen mit kurzen Beinen und damit kürzeren Schrittweiten diesen „Nachteil" dadurch nahezu ausgleichen, daß ihre kürzeren Beine mit höherer Frequenz „pendeln", ohne daß dazu eine wesentliche zusätzliche Anstrengung nötig wäre.

Infokasten 1:

Pendelmodell des Gehens

Geht man stark vereinfachend davon aus, daß die reduzierte Pendellänge gleich der halben Beinlänge *l* ist, so ergibt sich nach der Formel für harmonische Schwingungen eine natürliche Lauffrequenz von

$$v_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2g}{l}} \,. \qquad (5)$$

Da während der Schwingungen 2 Schritte gemacht werden, ergibt sich für die Gehgeschwindigkeit

$$v_n = 2wv_n = 2lv = \frac{1}{\pi}\sqrt{2gl} \,. \qquad (6)$$

Dabei wurde wieder die Schrittweite *w* näherungsweise gleich der Beinlänge *l* gesetzt. Man kann unmittelbar erkennen, daß v_n von der nur schwach mit *l* variierenden Wurzelfunktion abhängt. Ändert sich *l* beispielsweise um den Faktor2, so ändert sich v_n nur etwa um den Faktor 1,4. Unser Durchschnittserwachsener (l = 0,85m) würde sich mit einer natürlichen Gehgeschwindigkeit von v_n = 1,29 m/s ≈ 4,6 km/h fortbewegen. Dieser Wert stimmt ziemlich gut mit dem entsprechenden empirischen Wert überein.

Sprungmodell des Sprints

Beim Sprinten kommt es darauf an, eine relativ kurze Strecke in einer möglichst kurzen Zeit zurückzulegen. Zur physikalischen Beschreibung dieses Vorgangs gehen wir von der folgenden einfachen Modellvorstellung aus: Die maximal von den Beinmuskeln aufzubringende Kraft, die beispielsweise beim Sprung aus dem Stand aktualisiert wird, läßt sich vollständig für die Horizontalbewegung ausnutzen. Wir unterstellen also, daß bei jedem Laufschritt die gesamte Beinmuskelenergie (Gl. (2)) der Horizontalbewegung zugute kommt (*Abb. 3*). Bei jedem Schritt wird das Bein von 0 m/s auf v_B beschleunigt und die kinetische Energie des Läufers um den Betrag

$$E_B = F_B s = \frac{m_B}{2} v_B{}^2$$

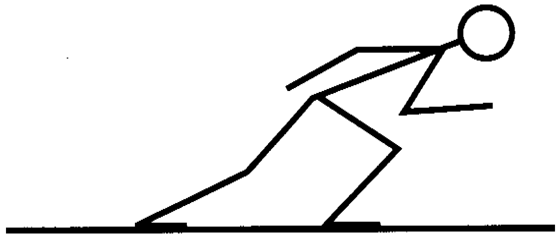


Abb. 3: "Sprungmodell" des Sprinters: Durch Neigung in deie Horizentale wird aus dem Springer ein Sprinter.

Schlafen	1,15
Ruhig sitzen	1,54
Bequem stehen	1,79
Handarbeit (Nähen)	1,92
An- und ausziehen	2,05
Singen	2,18
Schreibmaschineschreiben	2,31
Abwaschen, Bügeln	2,43
Fegen	2,56
Leichte Freiübungen	3,20
Radfahren (13 km/h)	3,25
Spazieren (4,5 km/h)	3,84
Radfahren (20 km/h)	4,44
Tischlern, Klempnern	4,87
Aktiver Sport	5,13
	6,44
Treppen hinuntergehen	5,77
Schwere Gegenstände verladen	6,41
Schwere Sportübungen	7,05
Tennis, Schwimmen	8,33
Schnell laufen (8,8 km/h)	9,61
Sehr schwere Sportübungen	10,25
Sehr schnell laufen (12,6 km/h)	16,02
Treppauf gehen	17,94

Tab. 1: Leistungsinput des menschlichen Organismus pro kg Körpergewicht bzw. Gesamtmasse in– W/kg für verschiedene Aktivitäten (aus [1])

erhöht (m_B: Masse des beschleunigten Beins). Indem das Bein vorschnellt, den Boden berührt und dabei wieder auf 0 m/s abbremst, wird der Körper des Läufers in n Schritten auf die Endlaufgeschwindigkeit v_L beschleunigt. Dabei erreicht der Läufer schließlich die Endenergie

$$E_L = \frac{m}{2} v_L{}^2 = nE_B \qquad (7)$$

Anschließend dient E_B nur noch der Überwindung von Reibungsverlusten vor allem der Füße mit dem

Boden und des gesamten Körpers mit der Luft (siehe unten).

Da die Masse der Beine etwa ein Achtel der Körpermasse ausmacht, $m_B \approx m/8$, und die maximale Beingeschwindigkeit v_B schließlich, wenn keine weitere Beschleunigung auftritt, etwa gleich der Endgeschwindigkeit v_L ist, ergibt sich: $n \approx 8$. Wegen der Vernachlässigung der auch bei den ersten Schritten auftretenden Reibung muß diese Zahl als untere Grenze angesehen werden. Durch Messungen erhält man einen realistischeren Wert von $n \approx 10$. Setzt man diese Zahl in Gl. (7) ein und benutzt gemäß Gl. (2) für

$E_B = E_{pot} =$ mgh, so errechnet man:.

$$v_L = \sqrt{2ngh} \approx 10\sqrt{2h}\,(m/s)$$

Auf diese Weise läßt sich die maximale Laufgeschwindigkeit eines Sprinters aus der Höhe abschätzen, die er aus dem Stand springt. Bei einer Sprunghöhe von 40 cm sollte er nach unserem Modell bei einem 100-m-Sprint eine Maximalgeschwindigkeit von knapp 9 m/s und eine etwas unter diesem Wert liegende Durchschnittsgeschwindigkeit erreichen. Gute 100-m-Läufer erreichen Durchschnittsgeschwindigkeiten von ca. 10m/s. Sie springen aber auch höher als 40 cm.

Der Leistungsoutput eines 100-mSprints läßt sich aus der Beinenergie E_B, der mittleren Schrittweite w und der Laufgeschwindigkeit v_L abschätzen:

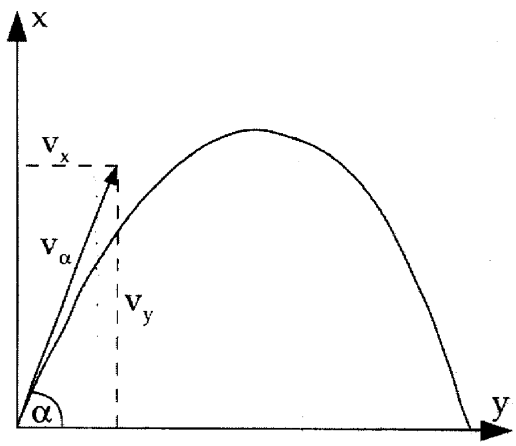
$$P_{out} = \frac{E_B v_L}{w} \qquad (8)$$

Bei einer mittleren Geschwindigkeit von 8m/s und einer Schrittweite von w = 2m ergibt sich P_{out} = 1100 W. Dem entspricht nach Gl. (1) ein Leistungsinput $P_{in} \approx$ 4500W. Eine so hohe Leistung kann ein erwachsener Sportler nur während einer sehr kurzen Zeit aufbringen. (Weitere Aspekte des Gehens und Laufens siehe [23]).

Wurfbewegungen

Das Modell des schiefen Wurfes

Bei sportlichen Aktivitäten kommen erstaunlich viele Bewegungen vor, die mit Hilfe des Modells des schiefen Wurfes beschrieben werden können. Dazu gehören sowohl Sprungbewegungen des Sportlers (z. B. Weitsprung, Hochsprung, Stabhochsprung) als auch Wurfbewegungen von Sportgeräten (Basketball-, Speerwurf, Kugel- und Steinstoßen). Bei den meisten anderen Ballbewegungen dominieren verschiedene Wechselwirkungen mit der Luft. Wir setzen im folgenden die mit einfachen geometrischen Überlegungen herzuleitenden For-



[Infokasten 2: Schiefer Wurf

v_a	= Anfangsgeschwindigkeit	
α	= Wurfwinkel	
h_{max}	= maximale Wurfhöhe	
l_{max}	= maximale Wurfweite	
g	= Erdbeschleunigung	
v_x	$= v_a \, A \cos\alpha;\ v_y = v_a \, A \sin\alpha$	(10a)
l_{max}	$= v^2_a \, A \sin 2\alpha/g$	(10b)
h_{max}	$= v^2_a \, A \sin^2\alpha/g$	(10c)

Wenn Start- und Zielpunkt auf unterschiedlicher Höhe (± d) liegen, gilt:

$$l_{\max} = \frac{v_a^2}{g} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2gd}{v_a^2 \cdot \sin^2\alpha}}\right) \qquad (10d)$$

meln für den schiefen Wurf voraus (*Infokasten 2*).

Weitsprung

Beim Weitsprung beschleunigt der Sportler seinen Körper zunächst auf eine möglichst hohe Geschwindigkeit (Anlauf) und versucht, ihn nach dem Absprung möglichst lange in der Luft zu halten, um eine möglichst große Distanz ohne Berührung des Bodens zu durchqueren. Setzt man die Maximalgeschwindigkeit v_a = 10 m/s, die bei kurzen Sprints für einen guten Athleten erreichbar ist, so ergibt sich nach Gl. (10b) für die maximaleSprungweite:

$$l_{\max} = \frac{{v_a}^2}{g} \cdot \sin 2\alpha \leq 10m,$$

(zum Vergleich: Weltrekord 8,95 m, Mike Powell).

Diese grobe Abschätzung ist nicht schlecht, hat aber einen Schönheitsfehler. Beim optimalen Absprungwinkel von 45° ergibt sich nämlich eine maximale Sprunghöhe von 2,50 m. Dies ist nicht nur im Rahmen des Weitsprungs unrealistisch. Geht man davon aus, daß der Weitspringer auch ein guter Hochspringer ist, so könnte er es allenfalls schaffen, beim Hochsprung seinen Schwerpunkt um etwa 1 m anzuheben. Dem würde nach Gl. (10c) eine vertikale Absprunggeschwindigkeit von v_y = 4,6m/s entsprechen. Geht man gleichzeitig davon aus, daß er eine horizontale Absprunggeschwindigkeit von v_x = 10 m/S schafft, dann ermittelt man gemäß $tan\ a = v_y/v_x$ einen Absprungwinkel von $a \approx 27°$.Unter diesem Winkel würde sein Schwerpunkt eine Entfernung von 8,10 m zurücklegen. Berücksichtigt man noch, daß beim Absprung der Schwerpunkt bei etwa 1 m Höhe und beim Landen bei 0 m liegt, sowie daß die Beine beim Landen nach vorn gerissen werden, so errechnet man eine entsprechend größere Sprungweite.

Hochsprung

Beim Hochsprung kommt es darauf an, mit einem Bein abspringend, den Körper über eine Sprunglatte hinüberzubewegen. Um seinem Körper eine möglichst große vertikale Beschleunigung zu erteilen, unterstützt der Athlet die von den Beinmuskeln auf den Boden ausgeübte Kraft dadurch, daß er das freie Bein und die Arme beim Absprung nach oben reißt. Auf diese Weise wird der Körper in entgegengesetzte Richtung beschleunigt (Impulssatz) und die auf den Boden ausgeübte Kraft entsprechend vergrößert. Gleichzeitig versucht der Springer seinen Körper so zu bewegen, daß sein Schwerpunkt während des Sprungs möglichst niedrig bleibt. Dazu gibt es verschiedene Techniken. Bei der *Fosbury-flop*-Technik gelingt es dem Springer durch Biegen des Körpers, seinen Schwerpunkt nach außen zu verlagern und zwar so, daß dieser sich manchmal sogar unter der Latte hinwegbewegt (*Abb. 4*).

Wie hoch wird nun eigentlich beim Hochsprung der Schwerpunkt des Springers angehoben? Wenn beispielsweise ein 1,80 m großer Springer mit einem

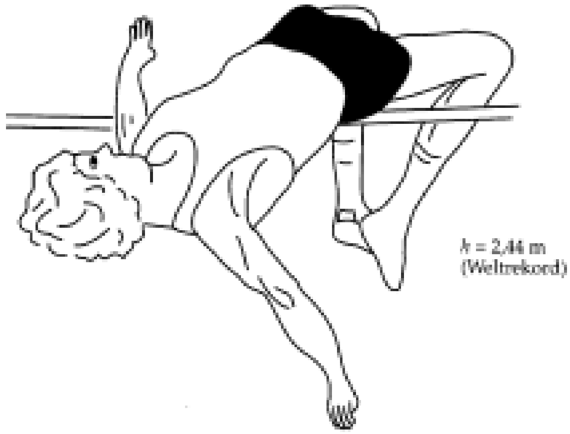


Abb. 4: Bei der Fosbury- flop- Technik kann der Schwerpunkt unterhalb der Latte hinwegbewegt werdern.

Schwerpunkt bei 1 m über dem Boden die Weltrekordhöhe von 2,44 m (Sato Mayor) erreichen will, so muß er seinen Schwerpunkt um 1,44 m anheben, um ihn gerade auf Lattenhöhe zu bringen. Größere Springer haben es da leichter, weil ihr Schwerpunkt höher liegt.

Kugelstoßen

Stark ist, wer Kraft - bändigt

H. Lohberger

Eine weitere sportliche Aktivität, bei der die Wurfparabel eine wichtige Rolle spielt, ist das Kugelstoßen: Eine m_k = 7,257 kg schwere Metallkugel muß aus einem Kreis mit einem Durchmesser von 2,134 m heraus mit einer Hand möglichst weit weggestoßen werden. Um eine Weltrekordweite von 23,12 m (Randy Barnes) zu erreichen, muß der Kugelstoßer gemäß Gl. (10d) der Kugel eine Anfangsgeschwindigkeit v_a von mehr als 14 m/s erteilen, wenn er die Kugel aus einer Höhe h von 2,25 m stößt. Entscheidend für die Beschleunigung der Kugel ist die Armkraft des Athleten. Durch den Anlauf im Kreis (Abb. 5) schafft er allenfalls eine Beschleunigung auf 1,5 m/s. Die zusätzliche Geschwindigkeit v von 12,5 m/s muß der Kugel durch Vorstoßen des Armes erteilt werden. Dazu muß der Sportler eine Bewegungsenergie von

$$E_{kin=} \frac{1}{2} m_k v^2 = 567 J$$

auf die Kugel übertragen. Das gelingt ihm auf einer

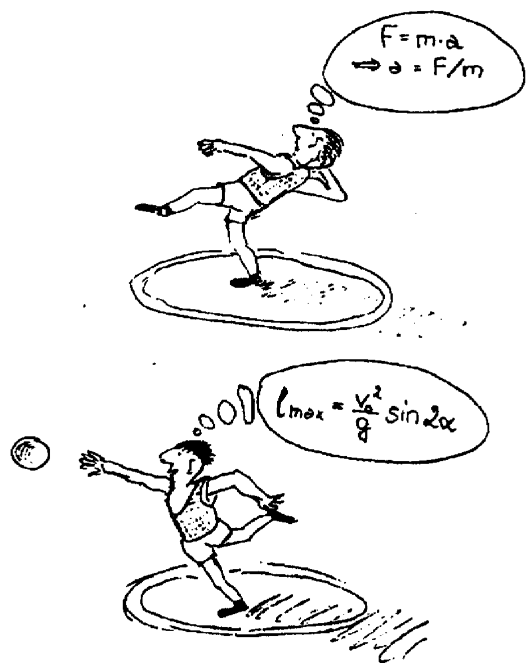


Abb. 5: Der Kugelstoßermuß die Formel des schiefen Wurfes optimal realisieren.

Beschleunigungsstrecke von typisch s = 1 m. Folglich muß er währenddessen eine mittlere Kraft von $F_K = E_{kin}$ /s = 567 N auf die Kugel ausüben. Aber nicht die Kraft ist der begrenzende Faktor, sondern der Leistungsinput P_{in} des Athleten. P_{in} hängt mit dem (aus F_K und der mittleren Geschwindigkeit der Kugel $\bar{v} \approx v/2$ abzuschätzenden) Leistungsoutput P_{out} gemäß Gl. (1) zusammen: $P_{out} = F_K \cdot v$ (11)

Mit den obigen Zahlenangaben erhält man einen Leistungsoutput von 3,5 kW. Das ist mehr als das Dreifache des Leistungsoutputs der beim Sprinten zu verausgaben ist und kann daher auch nur für den Bruchteil einer Sekunde freigesetzt werden. Da diese Anforderungen ähnlich wie bei Gewichthebern nur von Sportlern mit äußerst starken Armmuskeln erbracht werden können, ähneln die Kugelstoßer schon rein äußerlich den Gewichthebern. Da über den Erfolg manchmal wenige Zentimeter entscheiden, kommt es für den Kugelstoßer darauf an, die Kugel zum einen aus möglichst großer Höhe abzustoßen (großes d in Gl. (10d)). Das ist natürlich weitgehend durch die Größe des Sportlers vorgegeben. Zum anderen muß es ihm gelingen, den Abwurfwinkel von etwa 42° möglichst gut einzuhalten. Wie man nach Gl. (10d) leicht nachrechnet, macht eine Abweichung von 3° nach unten bei gleicher Kraft und Leistung eine Verkürzung der Wurfweite um 3 cm aus.

Basketball

Der Erfolg einer Basketballmannschaft hängt vor allem davon ab, wie gut ihre Spieler den Ball aus unterschiedlichen Entfernungen in den Korb hineinzubefördern vermögen. Anders als der Kugelstoßer, bei dem kleine Ursachen: geringfügige Abweichung vom optimalen Stoßwinkel, stets zu kleinen Wirkungen: geringfügige Verringerung der Wurfweite, führen, können beim Basketballspieler kleine Ursachen: kleine Abweichung vom optimalen Wurfwinkel, bzw. der optimalen Abwurfgeschwindigkeit, große Wirkungen: nämlich das Verfehlen des Korbes, zur Folge haben. Der Ballwurftechnik ist daher mehr als bei allen anderen Wurfspielen darauf ausgerichtet, die Auswirkungen von Fehlern zu minimieren. Dabei spielt ein wichtiger Grundsatz eine entscheidende Rolle: Die *maximale* Weite ist gleich der *optimalen* Weite. Es ist also nicht etwa günstig, wie man naiverweise anzunehmen geneigt ist, den Ball in einem besonders steilen Bogen zu werfen, so daß er möglichst steil in den Korb trifft. Der Ball ist vielmehr unter dem Winkel zu werfen, der zur maximalen Wurfweite führt. Als Begründung verweisen wir zum einen auf die Tatsache, daß die maximale Wurfweite l_{max} *minimaler Abwurfgeschwindigkeit* v_a entspricht, was eine minimale Muskelanstrengung und damit eine sicherere Hand beim Wurf zur Folge hat. Hinzu kommt, daß bei minimalem v_a natürlich auch der Luftwiderstand minimal ist. Obwohl der Einfluß des Luftwiderstands so klein ist, daß wir ihn in den Formeln getrost vernachlässigen können, kann seine Minimierung in der Praxis aufgrund der sensitiven Abhängigkeit des Korbtreffers von den Anfangsbedingungen durchaus von Bedeutung sein. Die Minimierung von v ist zum anderen insofern von Bedeutung, als ein Fehler sich um so geringer auswirkt, je kleiner v_a ist [3].

In *Abb. 6* ist eine typische Wurfsituation skizziert. Der Spieler wird den Ball in der Regel durch den sog. Überkopfwurf (a) oder den Unterhandwurf (b) in den Korb befördern. Wie man mit den modifizierten Formeln für den schiefen Wurf Gl. (10d) nachrechnen kann, ergeben sich für den Überkopfwurf kleinere Geschwindigkeiten und ein kleinerer Korbeintrittswinkel (steilerer Korbeintritt). Daher ist dieser Wurf rein physikalisch betrachtet sicherer als der Unterhandwurf.

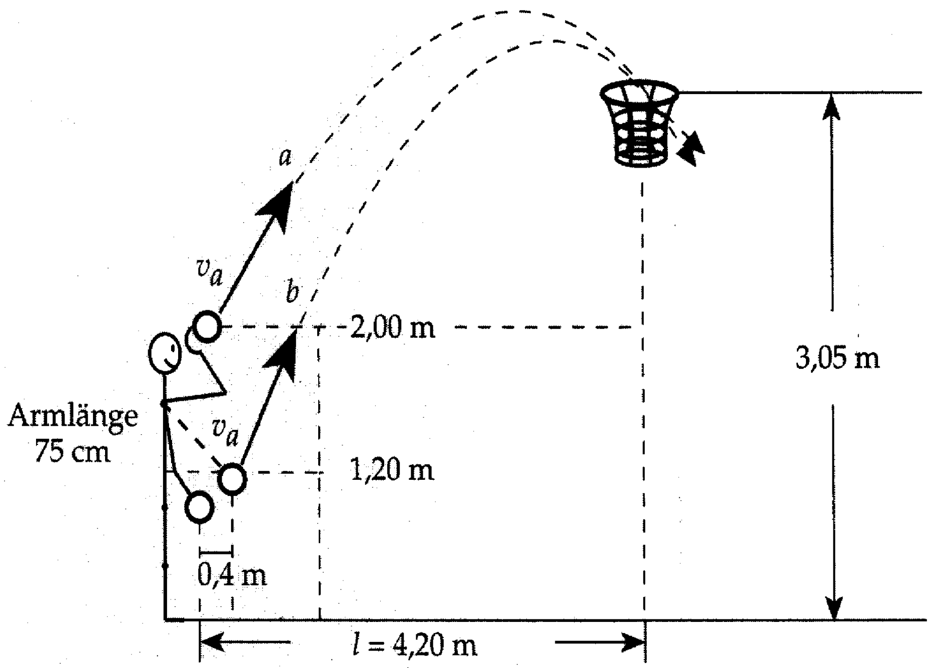


Abb. 6: Schematische Darstellung des Überkopf- (a) und Unterhandwurfes (b) beim Basketballwurf sowie typischeAbmessungen.

Hammerwurf

Wegen seiner physikalisch interessanten Abwurftechnik soll auch noch der Hammerwurf skizziert werden. Der Hammer besteht aus einer Kugel, die an einem Seil befestigt ist. Der Sportler bringt den Hammer am Seil haltend auf eine Kreisbahn, um ihn nach typischerweise 5 Umdrehungen loszulassen, damit dieser in Richtung der Kreistangente möglichst weit wegfliegt.

Beim Hammerwurf oder beim Schleuderball (vgl. [29]) können die Schüler einige für sie meist als erstaunlich empfundene Erscheinungen der Kreisbewegung am eigenen Körper erfahren. Beispielsweise vermuten manche Schüler, der Hammer würde nach dem Loslassen seine Kreisbahn mit einem etwas größeren Radius fortsetzen. Sie sind meist erstaunt zu erkennen, daß der losgelassene Hammer seine Bahn geradlinig, tangential zur Kreisbahn fortsetzt. Zum anderen wird ihnen beim Schleudern des Hammers klar, daß die Kraftwirkung kaum in Bewegungsrichtung des Hammers, sondern vor allem senkrecht dazu in Richtung auf das Drehzentrum auszuüben ist. Sie erleben gewissermaßen, daß eine um so größere Kraft nötig ist, den Hammer ständig aus der geradlinig gleichförmigen Bewegung abzulenken und auf einen Kreis zu zwingen, je schneller er sich bewegt. Bei hoher Geschwindigkeit muß man sein ganzes Körpergewicht einsetzen, um nicht seinerseits vom Hammer weggerissen zu werden.

Welche Kräfte treten beim Hammerwurf auf? Der Weltrekord beim Hammerwurf liegt bei 86,74 m (Juri Sedych). Aus dieser Wurfweite kann man mit Hilfe von Gl. (10) die Anfangsgeschwindigkeit v_a = 29 m/s abschätzen, d. h. die Geschwindigkeit, auf die der Sportler den Hammer durch Herumschleudern beschleunigt, bevor er ihn losläßt. Im Augenblick des Loslassens muß der Hammerwerfer den Hammer mit einer Zentripetalkraft

von $F_z = \frac{mv_a^{\,2}}{r}$ „halten". Die Masse *m* des Hammers beträgt 7,26 kg, und der Kreisradius r läßt sich aus der Armlänge ($l_a \approx 0{,}90$ m) des Athleten und der Seillänge (l = 1,22 m) zu etwa 2,10 m abschätzen. Dann beträgt F_z = 2900 N! Diese enorme Kraft muß der Athlet mit Hilfe seiner Körpermasse (schräg nach hinten lehnend) und der Reibung mit dem Boden kompensieren. Entscheidend ist, daß seine Armmuskeln diese Kraft aushalten.

Der Hammerwerfer bringt den Hammer in der Regel dadurch auf Touren, daß er ihn zweimal über den Kopf schleudert und sich dann zwei bis dreimal selbst mitdreht. (Der Hammer macht insgesamt also etwa n = 5 Umdrehungen). Dabei muß der Athlet dem Hammer tempomäßig immer etwas voraussein. Um ihn auf der Kreisbahn zu beschleunigen, muß er nämlich auch noch eine tangentiale Kraft ausüben (*Abb. 7*). Geht man davon aus, daß der Hammer gleichmäßig auf die Endgeschwindigkeit v_a beschleunigt wird, so gilt für den

Wert der Beschleunigung: $a = \frac{v_a^2}{2s}$.

Dabei ist $s = 2Brn$. Mit $r = 2{,}1\ m$ und $n = 5$ Umdrehungen ergibt sich für a = 6, 3 m/s² und damit eine tangential wirkende Kraft $F_t = ma$ von 46 N.

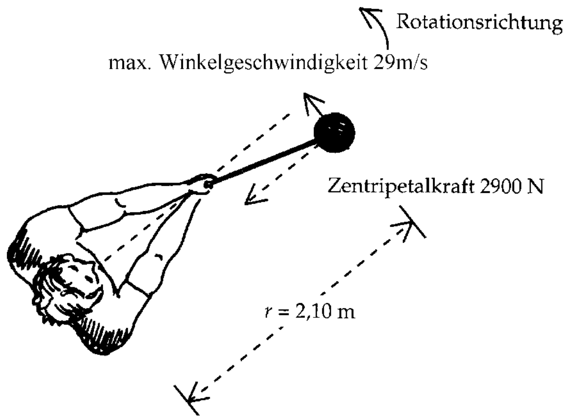


Abb. 7: Drehbewegung beim Hammerwurf

In der letzten Umdrehung muß der Hammerwerfer zusätzlich dafür sorgen, daß der Hammer den optimalen Abwurfwinkel von etwa 45° erhält. Die besondere Schwierigkeit liegt dabei zum einen darin, daß dazu eine zusätzliche Kraft nötig ist, der Sportler also gemäß actio = reactio außer nach außen auch noch nach oben gezogen wird. Wenn das Timing bei diesem Manöver nicht exakt stimmt, kann es vorkommen, daß durch den entsprechenden Gewichtsverlust die Haftreibung mit dem Boden nicht mehr ausreicht, die erforderliche Zentripetalkraft aufzubringen.

Bewegung in Medien

Sportliche Aktivitäten finden nicht im luftleeren Raum, sondern in einem Medium statt: in Luft oder in Wasser. Der Einfluß des Mediums konnte bei den oben skizzierten Sportarten vernachlässigt werden. Bei den im folgenden angesprochenen Aktivitäten ist die Wechselwirkung des Sportlers bzw. des Sportgeräts mit dem Medium von großer Bedeutung. Die Rolle des Mediums Luft oder Wasser läßt sich i. w. auf folgende Aspekte reduzieren:

- auf den *Widerstand* den es Bewegungen entgegensetzt (z. B. Luftwiderstand beim Radfahren, bei Ball würfen, Wasserwiderstand beim Schwimmen),
- auf den *Antrieb*, der durch das strömende Medium ermöglicht wird (z. B. Surfen, Windsurfen, Segeln)
- auf den *Auftrieb*, durch den bestimmte Aktivitäten überhaupt erst möglich werden (z. B. Schwimmen, Rudern, Bumerangwerfen, Segel fliegen, Tauchen) und
- auf *spezielle Wechselwirkungen*, durch die Bewegungen in gezielter Weise beeinflußt werden können (z. B. Top- und Backspin beim Tennis, Kurvenschießen beim Fußball).

Das Medium als Widerstand

Der Widerstand ist die Rechtfertigung jeder Kraft vor sich selbst.

H. Lohberger

Der bekannte Ausspruch, ein Radfahrer hat immer Wind von vorn, bringt zum Ausdruck, daß die ruhende Luft bewegten Objekten einen ähnlichen Widerstand entgegensetzt, wie man ihn vom Gegenwind her kennt. Der Spruch ist auf den Radfahrer und nicht etwa auf den Fußgänger gemünzt, für den er gleichermaßen gelten müßte. Daraus spricht die Erfahrung, daß Sich der Luftwiderstand erst bei höheren Geschwindigkeiten unangenehm bemerkbar macht. Der Radfahrer ,,weiß" außerdem intuitiv, daß der Widerstand dadurch gemindert werden kann, daß man sich auf dem Fahrrad zusammenkauert, d. h. seine Querschnittsfläche verringert. Jemand, der z. B. eine größere Hartfaserplatte bei nur mäßigem Wind zu transportieren versucht, erlebt am eigenen Leibe, welchen dominierenden Einfluß die Wechselwirkung mit der Luft erlangt, wenn die Querschnittsfläche des bewegten Objekts groß wird. Zahlreiche Erfahrungen, die man in ,,luftiger" Umgebung gemacht hat, lassen sich in ,,wäßriger Umgebung - etwa um den Faktor 770 - verstärkt erleben. Die vergleichsweise hohe Dichte des Wassers, läßt das Laufen selbst dann zu einer Karikatur der in der Luft so erfolgreichen Fortbewegungsart werden, wenn das Wasser nur bis zu den Oberschenkeln reicht. Einen direkten Vergleich erfährt man, wenn man sich z. B. per Kopfsprung von dem einen Medium ins andere begibt. Beim Eintauchen ins Wasser spürt man eine deutliche Abbremsung. Bei dieser Gelegenheit kann man außerdem gelegentlich in Form eines ,,Bauch-klatschers" leidvoll erfahren, daß auch in diesem Fall der Widerstand des Mediums mit der Querschnittsfläche wächst. Alle diese Erfahrungen zum Widerstand des Mediums lassen sich mit einer einzigen Formel quantitativ zusammenfassen (*siehe Infokasten 3*).

Mit Formel (12) können zahlreiche Bewegungen in Luft oder Wasser abgeschätzt werden. Es seien nur einige Beispiele genannt: Sprinten, Radfahren, Schwimmen, Kopfsprung ins Wasser, Fallschirmspringen, sowie näherungsweise - horizontale oder vertikale Abschnitte von Ballbewegungen, wie sie in zahlreichen Ballspielen vorkommen. Die Einschränkung auf horizontale oder vertikale Abschnitte im letzten Beispiel muß gemacht werden, weil die Berücksichtigung des Widerstands des Mediums beim schiefen Wurf zu Bewegungsgleichungen führt, die nicht mehr geschlossen gelöst werden können und numerische Berechnungen nötig machen. Darauf soll hier aber nicht eingegangen werden (siehe z. B. [5]).

Infokasten 3:
Widerstand in einem Medium

Im Rahmen eines einfachen Modells geht man davon aus, daß die Widerstandskraft F_w proportional zur Querschnittsfläche A und zur Dichte Δ des Mediums sowie quadratisch mit der Geschwindigkeit v wächst [4]:

$$F_w = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \qquad (12)$$

Die Proportionalitätskonstante c_w ist der sogenannte Widerstandsbeiwert. Sie erfaßt u. a. die Form des bewegten Objekts (Tabelle 2).

Beim Radfahren kommt zur Luftwiderstandskraft F_w die Rollreibungskraft $F_r = :m$ hinzu:

$$F = F_r + F_w = \mu m + \frac{1}{2} c_w \rho_1 A v^2 \qquad (13)$$

Dabei ist : der Rollreibungskoeffizent, der bei normalen Tourenrädern und glattem Untergrund etwa 0,05 beträgt. Vom Einfluß des Windes sei hier aber der Einfachheit halber abgesehen [6].

Horizontale Bewegungen Laufen

In der Abschätzung des Leistungsoutputs beim Sprinten (siehe oben) waren die Energieverluste aufgrund des Luftwiderstands bereits enthalten. Wir können diesen Anteil mit Gl. (12) abschätzen: Geht man von einer Querschnittsfläche A des Läufers von 0,5 m² (unter Berücksichtigung der Schräglage aus der Körperoberfläche von 1,8 m² abgeschätzt) und einem c_w-Wert von 0,9 (wie bei einem Tourenrad) aus, so ergibt sich allein aufgrund des Luftwiderstandes ein Leistungsoutput P'_{out} = 148 W. Das sind etwa 13 % des in Gl. (8) abgeschätzten Gesamtleistungsoutputs eines 100-m-Sprinters.

Radfahren

Radfahren wird als anstrengend empfunden. Die Anstrengung ist Ausdruck der Tatsache, daß der Radfahrer mit Hilfe seiner Beinmuskulatur Energie auf das Rad übertragen muß, um es in Bewegung zu bringen und zu halten. Die Energie dient nur zu einem geringen Anteil der Beschleunigung und damit zur Erhöhung der Bewegungsenergie des Rades: Entscheidend ist, daß zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit Energie erforderlich ist. Die dem mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Rad pro Zeiteinheit zugeführte Energie (der Leistungsoutput) wird aufgrund von Reibungsmechanismen (Rollreibung F_r und Luftwiderstand F_w) vollständig entwertet, also letztlich als Wärme an die Umgebung abgegeben. Während die Rollreibung außer vom Straßenbelag und von den Reifen nur noch von der Masse des Radlers und des Rades m abhängt und näherungsweise als konstant angesehen werden kann, wächst der Luftwiderstand stark mit der Geschwindigkeit v an (*siehe Infokasten 3*: Gl. (13)). Die physikalische Problematik des Fahrradfahrens haben wir bereits ausführlich an anderer Stelle beschrieben [4, 6, 7].

Objekt	**C_w- Wert**
Kugel	0,45
Zylinder	0,8
Kreisscheibe	1,1
Halbkugelschale(konvex)	0,33
Halbkugelschale(konkav)	1,33
Fahrrad (Normalhaltung)	0,7-0,9
stromlinienförmiger Körper	0,05
Fallschirm	2

Vertikale Bewegungen

Bei vertikalen Bewegungen ist der Einfluß der Schwerkraft von großer Bedeutung. Läßt man einen Gegenstand fallen, so unterliegt er einer konstanten Beschleunigung von g = 9,81 m/s². Gleichzeitig wächst aber der Luftwiderstand quadratisch mit der Geschwindigkeit. Es kann daher der Fall eintreten (z. B. beim Fall aus großer Höhe), daß der Luftwiderstand schließlich den Wert der Schwerkraft annimmt, und der Gegenstand mit einer gleichförmigen Endgeschwindigkeit, der sogenannten Sinkgeschwindigkeit fällt.

Fallschirmspringen

Physikalisch unterscheidet sich der Sprung mit und ohne Fallschirm nur dadurch, daß der Springer eine andere Sinkgeschwindigkeit erlangt. Der Fallschirm ist eine künstliche Vorrichtung, die Fläche des Springers so zu vergrößern und damit die Sinkgeschwindigkeit so zu verkleinern, daß er unversehrt auf der Erdoberfläche aufkommt (siehe *Aufgabe 3*).

Das Fallschirmspringen ist nicht zuletzt durch faszinierende Sprungfiguren bekannt geworden, die von einem ebenfalls fallenden Springer gefilmt werden und den Eindruck erwecken, die mit etwa 100 km/h fallenden Springer schwebten wie Vögel in der Luft. Die Akrobaten müssen sehr genau wissen, wie lange sie ohne Schirm agieren dürfen und in welcher Höhe des Fallschirm zu öffnen ist. Mit der Formel (12) lassen sich die entsprechenden Zeiten und Höhen abschätzen [8].

Die "treibende" Kraft des Mediums

Nicht immer ist der Widerstand, den das Medium den Bewegungen entgegensetzt, als destruktiv und daher unerwünscht anzusehen. Bei allen Fortbewegungsarten, bei denen man sich gewissermaßen vom Medium ,,abstoßen" (Impulsübertragung) muß, nimmt er eine ,,konstruktive" Rolle ein. Anders als etwa bei den Fortbewegungsarten Laufen oder Radfahren, bei denen man eine (Reibungs-) Kraft auf den Boden ausübt, um sich fortzubewegen, muß man z. B. beim Segeln, Windsurfen, bei allen Arten des Schwimmens, beim Paddeln oder Rudern eine entsprechende Kraft auf das Medium selbst ausüben, um als ,,Rückstoß" einen entsprechenden Vortrieb zu erreichen.

Weil in diesen Fällen das Medium sowohl als Antrieb dient, als auch gleichzeitig der Bewegung einen Widerstand entgegensetzt, kommt es darauf an, die Wechselwirkung mit dem Medium, die zum Vortrieb führt, möglichst *groß* und die Wechselwirkung, die den Widerstand bestimmt, möglichst *klein* zu machen. Dazu einige Beispiele:

Schwimmen

Beim Schwimmen muß sich der Sportler vom Wasser ,,abstoßen". Das erreicht er durch geeignete Arm- und Beinbewegungen. Dafür gibt es mehrere Techniken. Wir betrachten die Armbewegung beim Brustschwimmen etwas genauer (Abb. 8): Bei jedem Schwimmzug werden die Arme im Wasser zunächst nach hinten, anschließend wieder nach vorn bewegt. Während bei der Bewegung der Arme nach hinten eine Kraft derart auf das Wasser ausgeübt wird, daß sich gemäß actio = reactio der erwünschte Vortrieb des Schwimmers ergibt, wird beim Zurückholen der Arme nach vorn umgekehrt eine den Schwimmer bremsende Kraft bewirkt. Damit der Schwimmer überhaupt von der Stelle kommt, muß er dafür sorgen, daß die Kraftwirkung auf das Wasser möglichst groß ist, wenn er die Arme nach hinten bewegt, und möglichst klein, wenn er sie für den nächsten Schwimmzug nach vorn zurückholt. Das erreicht er dadurch, daß er im ersten Fall die Handflächen quer zur Fortbewegungsrichtung (große Querschnittsfläche A in Gl. (12)) aufstellt, ihnen dabei eine löffelartige Form (großer c_w-Wert) verleiht und sie unter großem Bogen schnell nach hinten (große Geschwindigkeit v) stößt. Gemäß Gl. (12) ist die Geschwindigkeit, mit der man die Hände durch das Wasser bewegt natürlich begrenzt durch die von den Armmuskeln aufzubringende Kraft F_w. Bei der Rückführung der Hände verfährt er so, daß die Wechselwirkung mit dem Wasser möglichst klein bleibt (kleines A und kleiner c_w-Wert). Eine ähnliche Analyse läßt sich auch für die Beinbewegungen anstellen.

Diese Erklärung gibt jedoch nicht die ganze Wahrheit wieder. Durch die Bewegung der Hände im Wasser treten außerdem Auftriebskräfte (siehe un-

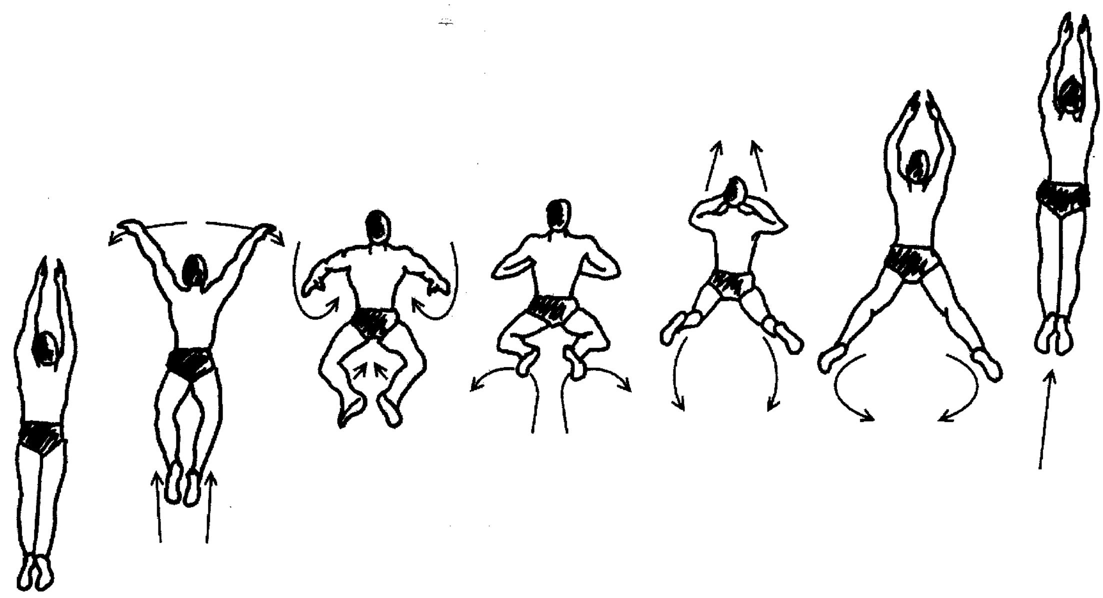


Abb. 8: Phasen des Bewegungsablaufs beim Brustschwimmen (von oben gesehen)

ten) auf, die ebenfalls zum Vortrieb beitragen (ausführliche Darstellung in [9]).

Aufgrund dieser rhythmischen Variation der Wechselwirkung von Armen und Beinen mit dem Wasser gleitet der Schwimmer vorwärts. Dadurch erfährt sein Körper als ganzes einen Widerstand durch das Wasser, der die Vorwärtsbewegung hemmt. Dieser Widerstand muß daher möglichst klein gemacht werden. Da die Querschnittsfläche A nicht wesentlich verändert werden kann, wird der Minimierung des c_w-Wertes große Aufmerksamkeit geschenkt (z. B. kurzer Haarschnitt bzw. Badekappe, Rasur der Körperhaare).

Während man beim Brustschwimmen die Variation der Wechselwirkung mit dem Wasser durch Variation von A und c_w erreicht, wird z. B. beim Kraulen zusätzlich die Variation der Dichte p des Mediums - die die Wechselwirkung zwischen Schwimmer und Wasser mitbestimmt- ausgenutzt: Die im Wasser (großes p) nach hinten gestoßenen Hände, werden außerhalb des Wassers (kleines p) wieder zurückgeholt.

Rudern und Paddeln

Die Variation der Dichte wird auch beim Rudern und Paddeln weitgehend ausgenutzt. Die besonders geformten (c_w-Wert) Ruder bzw. Paddel werden im Wasser (großes p) bei möglichst großer Querschnittsfläche A nach hinten und außerhalb des Wassers (kleines p) wieder nach vorn bewegt. Unterstützt wird das ganze durch eine möglichst kleine Widerstandskraft des Bootskörpers (kleine Querschnittsfläche A, kleines c_w).

Segeln und Windsurfen

Woher weiß der Wind, in welche Richtung er wehen soll?

S. J. Lec

Beim Segeln und Windsurfen ist man auf die Bewegung des Mediums selbst angewiesen. Indem man der bewegten Luft möglichst große und geschickt geformte Querschnittsflächen (Segel) entgegenstellt, wird sie gezwungen, eine Kraft und damit einen Vortrieb auf das Segelboot oder das Surfbrett auszuüben. Neben dem Vorhandensein eines genügend starken Windes kommt es bei diesen Sportarten vor allem auf die Fähigkeiten des Sportlers an, durch Orientierung der Segel bezüglich der Windrichtung und durch Veränderung der Segelfläche die bewegte Luft möglichst optimal im Sinne von Gl. (12) auszunutzen (*Abb. 9*) Physikalisch interessant ist hier die Tatsache, daß Segler und Surfer nicht in erster Linie durch stures Getriebenwerden vom Wind in Windrichtung vorankommen. Durch Ausnutzung von ,,Auftriebskräften" (siehe unten), d. h. durch geschicktes Ablenken der bewegten Luft, können sie nicht nur in andere Richtungen fahren, sondern auch wesentlich höhere Geschwindigkeiten als die des Windes erreichen. Durch die sogenannte Technik des Kreuzens gelingt es sogar, wenn auch nicht auf direktem Weg, in Gegenwindrichtung voranzukommen.

Abb. 9: Ein Windsurfer bestimmt Richtung und Geschwindigkeit der Bewegung durch eine entsprechende Orientierung des Segels gegen den Wind. Ein Segler kann darüber hinaus auch noch die Segelfläche verändern.

Erwähnt sei außerdem, daß beim Segeln und Windsurfen die Wechselwirkungen sowohl mit dem Wasser als auch mit der Luft zum Tragen kommen. Dabei greifen Antriebs- und Widerstandseffekte in subtiler Weise ineinander.

Eine quantitative Behandlung des Segels als Antriebsmaschine ist im allgemeinen relativ kompliziert. Durch Beschränkung auf typische Spezialfälle, lassen sich jedoch mit Hilfe von Gl. (12), in der zusätzlich die Windgeschwindigkeit zu berücksichtigen ist, einfache Abschätzungen machen [10].

Die „tragende" Rolle des Mediums

Statischer Auftrieb

Das Medium, in dem Bewegungen stattfinden, kann in einer weiteren Hinsicht konstruktiv sein: Es vermag Sportler und Sportgerät zu tragen. Damit ist zunächst die simple Tatsache gemeint, daß beispielsweise ein Ballon in der Luft ebenso wie ein Schwimmer oder ein Boot im Wasser eine Auftriebskraft erfährt, aufgrund derer der Ballon zu schweben (fliegen) und der Schwimmer oder das Boot zu schwimmen vermag.

Dadurch tritt gemäß *actio* = *reactio* eine entsprechende (aerodynamische bzw. hydrodynamische) Auftriebskraft F_A auf, die um so größer ist, je größer die Tragflächen A_F , je dichter das Medium (p) und je höher die Geschwindigkeit v der Tragfläche relativ zum Medium ist. Dadurch kann die Schwerkraft überwunden werden. Die Auftriebskraft muß nicht unbedingt nach oben gerichtet sein. Bei seitlicher Schrägstellung der Tragflächen treten beispielsweise zur Seite wirkende Kräfte auf, mit der Folge einer entsprechenden seitlichen Ablenkung (z. B. Bumerangbahn [11]).

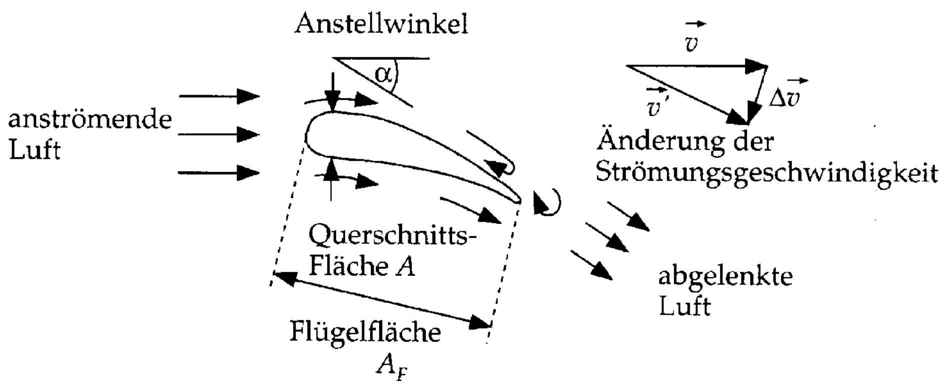


Abb. 10: Schematische Darstellung der Ablenkung der anströmenden Luft durch die in einem Winkel angestellte Tragfläche. Die durch die Ablenkung bedingte Geschwindigkeitsänderung Δv bedingt eine auftreibende Kraft.

Aufgrund des Archimedischen Prinzips verliert ein Gegenstand in einem Medium soviel an Gewicht, wie die von ihm verdrängte Menge des Mediums wiegt. Erreicht das Gewicht der verdrängten Menge des Mediums das Gewicht des Gegenstandes, bevor dieser völlig eintaucht, so schwimmt er. Das gilt für einen Schwimmer ebenso wie für ein Ruderboot oder Surfbrett. (Daß es einem Nichtschwimmer meist nicht gelingt, davon zu profitieren, hat andere Gründe.)

Anders als beim Schwimmen tauchen Gegenstände in Luft stets völlig ein. Damit sie in bestimmter Höhe schweben können, muß dafür gesorgt werden, daß sich Auftriebs- und Gewichtskraft die Waage halten. Das gelingt beim Heißluftballon durch die Variation der Dichte der im Ballon befindlichen Luft mit Hilfe von Temperaturänderungen. In geschlossenen, mit leichten Gasen gefüllten Ballons erreicht man eine Dichtevariation durch Abwurf von Ballast oder Ablassen von Gas aus dem Ballon.

Aerodynamischer und hydrodynamischer Auftrieb

Wenn die Dichte eines Gegenstandes größer ist als die des Mediums, reicht der statische Auftrieb nicht aus, das Objekt zum Schwimmen oder Schweben zu bringen. In diesem Fall kann man durch geeignete Bewegungen Wechselwirkungen mit dem Medium bewirken, die zu einem sogenannten aerodynamischen bzw. hydrodynamischen Auftrieb führen:

Wenn sich ein flächenhaftes Objekt (Tragfläche) oder ein mit Tragflächen versehenes Objekt so in Luft oder Wasser bewegt, daß es aus der Sicht des Objekts schräg angeströmt wird (*Abb. 10*), dann erfolgt je nach der Größe der Schrägstellung eine mehr oder weniger starke Ablenkung des Mediums.

Wie bereits die qualitative Diskussion der Abhängigkeiten erahnen läßt, wird die den Auftrieb bewirkende konstruktive Wechselwirkung zwischen Tragfläche und Medium durch einen ganz ähnlichen funktionalen Zusammenhang beschrieben wie die zum Widerstand führende Wechselwirkung (siehe *Infokasten 4*).

> **Infokasten 4:**
> **Auftriebskraft in einem Medium**
>
> Die aerodynamische Auftriebskraft wird durch einen ähnlichen funktionalen Zusammenhang beschrieben wie die Widerstandskraft des Mediums: $F_A = \frac{1}{2} c_A \rho A_F v^2$ (14)
>
> Der Proportionalitätsfaktor c_A erfaßt die Form, insbesondere auch die Anstellung der Tragfläche gegen das strömende Medium (Definition der Symbole im Text).

Wasserski

Der Wasserskifahrer gleitet mit seinen Skiern solange über das Wasser, wie er genügend schnell (z. B. von einem Boot) gezogen wird. Unterschreitet die Geschwindigkeit einen bestimmten Wert, so sinkt er wie jeder Mensch, der versuchte, auf dem

Wasser zu stehen oder zu gehen, ins Wasser ein. Dadurch, daß die etwas schräg angestellten Skier durch das Wasser bewegt werden, wird das Wasser wie bei einer Tragfläche schräg nach unten abgelenkt. Dazu ist eine Kraft F_A nötig, die in gleicher Weise von der Dichte des Mediums, der Querschnittsfläche, der Geschwindigkeit und der Form (Anstellwinkel) abhängt, wie die Widerstandskraft F_w (vgl. Gl. (14)).

Damit der Sportler beweglich bleibt, um beispielsweise kunstvolle Figuren ausführen zu können, ist die Querschnittsfläche der Skier verhältnismäßig klein. Zum Ausgleich muß die Bewegung mit entsprechend größerer Geschwindigkeit erfolgen.

Beim Start werden die Skier in einem extrem großen Winkel (sehr großer c_A-Wert) gegen das (aus der Sicht des Sportlers) strömende Wasser angestellt. Das ist nötig, damit bei der anfangs noch kleinen Geschwindigkeit der Auftrieb so groß wird, daß der Skifahrer aus dem Wasser auftauchen kann.

Fliegen

Die Welt muß noch nicht sehr alt sein, weil die Menschen noch nicht fliegen können

G. Chr. Lichtenberg

Beim Fliegen müssen die Tragflächen ähnlich wie die Wasserski schräg gegen die Luft angestellt werden oder mit einem aerodynamischen Profil ausgestattet sein, das im Prinzip dasselbe leistet. Auf diese Weise wird die (aus der Sicht des Fliegers) anströmende Luft nach unten abgelenkt, und der Flieger erfährt eine dementsprechende auftreibende Kraft (z. B. [12, 13]). Da die Luft sehr viel dünner als das Wasser ist, sind - bei gleicher Gewichtskraft - wesentlich höhere Geschwindigkeiten erforderlich als bei hydrodynamischen Auftriebsphänomenen.

Die hohe Geschwindigkeit ließe sich zwar (gemäß Gl.14) durch eine Vergrößerung der Tragfläche kompensieren, allerdings um den Preis einer entsprechenden Zunahme des Gewichts. Hohe Geschwindigkeit und hohes Gewicht machen aber eine hohe Auftriebskraft erforderlich, die durch eine entsprechend hohe Antriebsleistung hervorgebracht werden muß. Die Erfindung des Ottomotors war daher entscheidend für die Erfindung eines funktionstüchtigen Flugzeugs.

Außer dem motorisierten Fliegen, sind als Sportart vor allem das *Segel-, Drachen- und Gleitschirmfliegen* zu nennen. Als Antrieb werden die potentielle Energie, die dem Flugkörper durch Anschleppen oder Start von einem Berg vermittelt wird, sowie Aufwinde (Thermik) ausgenutzt. Die Flugdauer ist daher zwar beschränkt, kann aber durch geschicktes Ausnutzen örtlicher Luftströmungen relativ lang werden. Zu erwähnen sind hier auch jene Gleitschirme, mit deren Hilfe ein Sportler von einem Motorboot oder einem anderen Fahrzeug angeschleppt und in luftige Höhen befördert werden kann.

Die Entwicklung von ultraleichten Materialien haben es in unseren Tagen sogar möglich gemacht, unter bestimmten Bedingungen einen Flugkörper durch Muskelkraft anzutreiben [12].

Spezielle Wechselwirkungen mit dem Medium

Die Auftriebskraft eines fliegenden Objekts kommt durch die Wechselwirkung mit der umgebenden Luft zustande. Wenn sich ein mit einer bestimmten (Translations-) Geschwindigkeit fliegendes Objekt, z. B. ein Tennisball, um seine eigene Achse dreht, so kommt es zu einer Veränderung der Wechselwirkung mit der Luft: An der Oberseite des Balls tritt eine höhere Relativgeschwindigkeit zwischen Ball und Luft auf (Addition von Translations- und Rotationsgeschwindigkeit) als an der Unterseite (Subtraktion von Translations- und Rotationsgeschwindigkeit) (*Abb. 11*). Diese Wechselwirkung kann zum sogenannten Magnus-Effekt führen, aufgrund dessen ein Auftrieb senkrecht zur Flugrichtung auftritt. Er wird von Tennisspielern gezielt ausgenutzt, um durch einen *Topspin* bzw. *Backspin* (*Abb. 11*) den Ball in für den Gegner nur schwer einzuschätzender Weise nach unten bzw. nach oben zu heben.

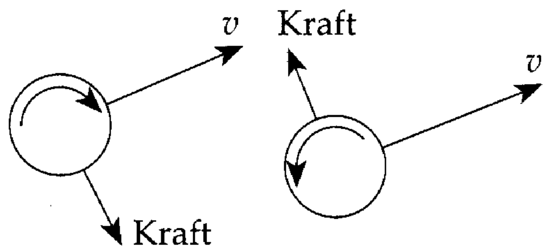


Abb. 11: Ein mit der Geschwindigkeit v fliegender Ball erfährt eine Kraft nach unten (Topspin), wenn er rechts herum dreht und nach oben (Backspin), wenn er links herum dreht.

Wird der Ball um eine senkrechte Achse in Drehung versetzt, so kann der Magnus-Effekt auch zu entsprechenden zur Seite wirkenden Ablenkungen führen. Sie ermöglichen es beispielsweise einem Fußballspieler, den Ball buchstäblich um die Ecke zu schießen und unter Umständen einen Eckball direkt ins Tor zu befördern.

Der Magnus-Effekt hängt u. a. empfindlich von der Oberflächenbeschaffenheit des Balls ab und kann beispielsweise bei sehr glatten Bällen in sein „glattes" Gegenteil, den Anti-Magnus-Effekt umgekehrt werden. Wegen der komplizierten physikalischen Vorgänge soll hier nur als Faustregel erwähnt werden, daß die rotationsbedingte Auftriebskraft von gleicher Größenordnung ist wie der Luftwiderstand, wenn Rotations- und Translationsge- schwindigkeit die gleiche Größenordnung besitzen [14].

Weitere Themen

Einige weitere Möglichkeiten, sportliche Aktivitäten im Physikunterricht zu behandeln werden aus Platzgründen nur aufgezählt. Der interessierte Lehrer möge die entsprechenden physikalischen und teilweise unterrichtspraktischen Hinweise der jeweils angegebenen Literatur entnehmen.

Stöße

Fußball: Kräfte, die ein Fußballer z. B. bei einem Elfmeterball auf den Ball ausübt. Bremskraft, die der Torwart aufbringen muß, der einen Elfmeterball hält. Geschwindigkeiten des Fußballs [15].

Tennis: Stoßzeiten (Ballberührung) beim Tennis [15, 16] oder beim Baseball [17]. Auswirkungen von rotierenden Tennisbällen beim Auftreffen auf den Boden oder den gegnerischen Schläger[l5].

Karate: Kräfte beim Karateschlag z. B. beim Zerschlagen eines Ziegelsteins [18].

Drehungen

Saltos: Physikalische Tricks (Drehimpulserhaltung) bei den verschiedenen Formen des Saltos [19].

Billard: Translation, Rotation und Stoß beim Billard [20].

Turnen, Gymnastik: Kräfte und Drehungen beim Boden-, Barren- und Reckturnen [21].

Tanzen: Kräfte und Drehungen beim Tanzen [22].

Gleichgewichte und Schwingungen

Stehen: Dynamische Probleme beim Stehen [23].

Fahrradfahren: Gleichgewichtsprobleme beim Einrad- und Zweiradfahren [71.

Schaukeln: In-Gang-Setzen einer Schaukel durch Bewegungen des Körpers [24].

Trampolinspringen: Antrieb und Energetik von Trampolinsprüngen.

Skifahren: Drehungen und Gleichgewichtsprobleme beim Skilaufen [14, 25, 30].

Gleit- und Rollbewegungen

Wintersport: Gleit- und Haftreibungsprobleme beim Rodeln, Ski- und Schlittschuhlaufen [26].

Rollschuhlaufen, Skateboardfahren: Rollreibungs- Rotations- und Gleichgewichtsprobleme.

Bergsteigen: Ausnutzung von Reibungskräften beim Klettern an Felswänden.

Seilklettern: Ausnutzung von Reibungskräften beim Seilklettern.

Sport und Mathematik

Zahlreiche geometrische Probleme (z. B. Form und Abmessungen von Spielfeldern) und rechnerische Probleme (z. B. Auswirkungen von minimalen Unterschieden in der Abmessung verschiedener Schwimmbecken auf die Leistung des Schwimmers) sowie wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen machen den Sport auch für die Mathematik zu einem interessanten Anwendungsfeld ([27, 28]).

Aufgaben

Mit Formel (13) lassen sich beispielsweise folgende Aufgaben lösen:

1. Welche Leistung muß ein Fahrradfahrer bei Windstille aufbringen, wenn er mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h fährt (m = 80 kg, A = 0,5 m, c_w = 0,9)?

Mit Hilfe von Formel (13) ergibt sich:

$$P_{out} = F_w v = \mu m v + \frac{1}{2} c_w \rho_1 A v^3 \approx 70W .$$

Das entspricht etwa dem Dauerleistungsvermögen eines Erwachsenen.

2. Wieviel Schokolade müßte ein Radfahrer essen, um den Energieverbrauch einer zweistündigen Radfahrt mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h zu decken? Die Energie ergibt sich als Produkt aus Leistung P und Zeit t zu: $E = pt = 70W \cdot 7200\, s$=504 kJ. Da 1 kg Schokolade etwa 24000 kJ an chemischer Energie enthält, sind etwa 20 g Schokolade erforderlich.

3. Geht man davon aus, daß ein Mensch ohne Fallschirm der Luft eine Querschnittsfläche (je nach Körperlage beim Fallen) von A = 0,3 bis 1 m² entgegensetzt, so wurde er gemäß Gl.(12)eine Sinkgeschwindigkeit von
$$v_s = \sqrt{\frac{2gm}{c_w \rho_1 A}} \approx 60 - 30 m/s$$
also etwa 210 – 117 km/h erreichen. (Dabei wurde die Dichte der Luft ρ_1 = 1,3 kg/m³, c_w =

1, m = 70 kg gesetzt). Geht man davon aus, daß ein Mensch gefahrlos aus einer Höhe von h = 1,5 m, also mit $v = \sqrt{2gh} = 5{,}4m/s$, springt, muß folglich die Fallschirmfläche etwa $A_F = \frac{2gm}{v_s^2 c_w \rho_1} \approx 30m^2$ groß sein.(Dabei wurde wegen der zusätzlichen Ausrüstung m = 80 kg und der Widerstandsbeiwert wie bei einer gegen die Strömung offene Halbkugel c_w = 1,3 angenommen).

Literatur

[1] Schlichting, H. J.: Energie und Energieentwertung in Naturwissenschaft und Umwelt. Heidelberg 1983

[2] Ulrich K.: Vergleichende Physiologie der Tiere. Stoff- und Energiewechsel. Berlin 1977, S.22

[3] Tan, A., Miller, G.: Kinematics of the free throw in basketball. Am. J. Phys. 49, 542 (1981)

[4] Schlichting, H. J., Backhaus, U.: Das Fahrrad als physikalischer Unterrichtsgegenstand. NiUP/C 31/15 (1983)

[5] Dittmann, H.: Der Ärger mit dem Luftwiderstand. PhuD 12/3, 226 (1984)

[6] Schlichting, H. J., Nobbe, B.: Untersuchungen zur Energetik des Fahrrads. technic-didact 8/4,225(1983)

[7] Schlichting, H. J.: Zur Gleichgewichtsproblematik beim Fahrradfahren. technic-didact 9/4, 257 (1984)

[8] Kincanon, E.: Skydiving as an aid to physics. Phys. Educ. 25, 267 (1990)

[9] Rodewald, B.: Antrieb und Widerstand beim Schwimmen, In diesem Heft

[10] Davidson K. S. M.: The Mechanics of Sailing Ships and Yachts. In: Batchelor, Bondy: Surveys in Mechanics. Cambridg: Univ. Press 1956, S. 431 ff.

[11] Schlichting, H. T., Rodewald, B.: Der Bumerang-ein Spielzeug mit verb~üffenden Flugeigenschaften. PdN - Ph 35/5, 18 (1986)

[12] Schlichting, H. J., Rodewald, B.: Ikarus' Traum und die aerodynamische Wirklichkeit. PdN - Ph 36/5, 7 (1986)

[13] Themenheft: Fliegen und Flugzeuge NiU-P 4 (2990)

[14] Brancasio, P. J.: Sport Science, New York: Simon & Schuster 1984

[15] Sexl, R: Physik im Sport, ohne Ort und Jahr

[16] Brody, H.: The Tennis-Ball Bounce Test. The Phys. Teach. 9, 407 (1990) ~

[17] Brody, H.: Models of baseball bats. Am. T. Phys. 58/8, 756 (1990) r

[18] Amann, G. A., Holt, F. T.: Karate demonstration. The Phys. Teach. 1, 40 (1985)

[19] Lightsey, P. A.: An analysis of the rotational stability of the layout back somersault. Am. T· Phys. 51/2, 115 (1983)

[20] Barger, V., Olsson, M.: Classical Mechanics. New York etc.: McGraw Hill 1973

[21] Hay, J. G.: The Biomechanics of Sports Techniques. Englewood: Prentice Hall 1973

[22] Laws, K.: The physics of dance. Physics today 2, 24 (1985)

[23] Rodewald, B.: Physik auf Schritt und Tritt. In diesem Heft

[24] Schlichting, H. J.: Aus Auf-und-Ab mach Hin-und-Her. NiUP 39/10, 22 (1991)

[25] Shoule, U. I., Nordick, D. L.: The physics of ski turns. The Phys.Teach.lO, 491 (2972)

[26] Bleustein, J. L.: Mechanics and Sport. New York

[27] Olympia. Mathematik und Sport. Themenheft Mathematik lehren 4 (1984)

[28] Floer, J., Möller, M.: Mathematik und Sport-Spiele als Zufallsexperimen~e. MNU 30/3,131 (1977)

[29] Schlichting, H. J.: Schleuderball. In diesem Heft.

[30] Meier, W., Schlichting, H. J.: Die Trägheit und die Skidrehung; in diesem Heft

Die Lichtenbergzitate wurden den Sudelbüchern entnommen.