7 | ZUSAMMENGESETZTE BEWEGUNGEN

| Prolog |

In diesem Kapitel geht es um **Überlagerungen von Bewegungen**. Die Geschwindigkeit wird ja als Vektor beschrieben, und diese kann man addieren (siehe Kap. 4). Wir werden uns vor allem Würfe genauer ansehen. Wichtig: Um dir das Prinzip klar zu machen, vereinfachen wir wieder und vernachlässigen den Luftwiderstand.

7.1 Astronaut im freien Fall

Das Unabhängigkeitsprinzip

In diesem Abschnitt geht es um das Prinzip, wie sich Bewegungen überlagern. Schon Galilei hat vor etwa 400 Jahren damit gearbeitet.

?

F1 Du stehst im Regen und die Tropfen fallen senkrecht mit 4 m/s zu Boden. Du beginnst mit 3 m/s zu laufen. Wie fällt dann aus deiner Sicht der Regen zu Boden?

F2 Indiana Jones ist mit einem Boot auf der Flucht. Wie muss er einen Fluss überqueren, damit er am schnellsten drüben ankommt? Und wie muss er fahren, um am kürzesten Weg ans andere Ufer zu kommen? Quer, schräg in oder gegen die Strömungsrichtung?

F3 Im gleichen Augenblick wird eine sehr schnelle Kugel waagrecht aus einem Gewehr abgefeuert und eine andere Kugel einfach aus gleicher Höhe fallen gelassen. Welche trifft zuerst auf den Boden?

Abb. 7.1

Wenn du ruhig im Regen stehst, dann fallen die Tropfen mit 4 m/s senkrecht herunter (**F1**; siehe auch Abb. 4.13). Wenn du mit 3 m/s zu laufen beginnst, dann **addieren** sich die Vektoren von Lauf- und Fallgeschwindigkeit. Die Tropfen kommen dann mit 5 m/s von schräg vorne (Abb. 7.2). Wie schnell ist der Tropfen aber jetzt wirklich? 4 m/s oder 5 m/s? Bedenke: Geschwindigkeiten sind relativ, und deshalb sind auch beide Ansichten richtig (siehe Kap. 6.1). Es ist alles eine Frage des Bezugssystems.

Man kann es so formulieren: **Führt ein Gegenstand mehrere Bewegungen gleichzeitig aus, so beeinflussen diese einander nicht. Das nennt man auch das Unabhängigkeitsprinzip der Bewegungen.** Mit „mehreren Bewegungen" ist nicht gemeint, dass der Gegenstand auseinander bricht und in verschiedene Richtungen wegfliegt. Damit ist gemeint, dass man die Geschwindigkeit als Vektor in ihre Komponenten zerlegen und wieder zusammensetzen kann. Und diese Komponenten werden durch das Addieren nicht beeinflusst.

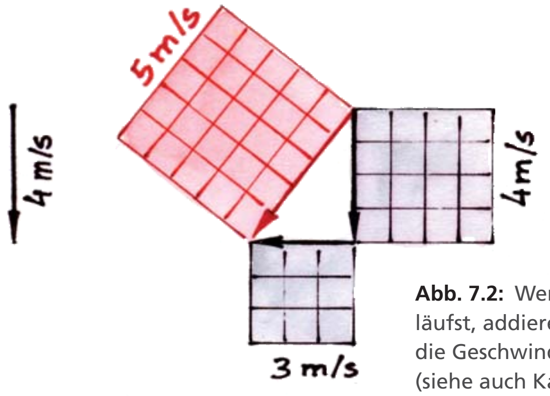

Abb. 7.2: Wenn du läufst, addieren sich die Geschwindigkeiten (siehe auch Kap. 4.2).

Wie sieht es mit dem Boot aus (**F2**)? Wenn man genau quer zum Fluss fährt, dann addieren sich die Geschwindigkeiten wie in Abb. 7.3 a. Auf der Flucht würde man diesen Weg wählen, weil er der schnellste ist. Dann ist nämlich die y-Komponente der Bootgeschwindigkeit am größten. Aber das Boot treibt ab. Wenn man am kürzesten Weg hinüber will, dann muss man so schräg gegen die Stromrichtung fahren, dass die Summe der Geschwindigkeiten quer zum Fluss zeigt (b). Das ist zwar langsamer, man kommt aber genau auf der gegenüber liegenden Seite an.

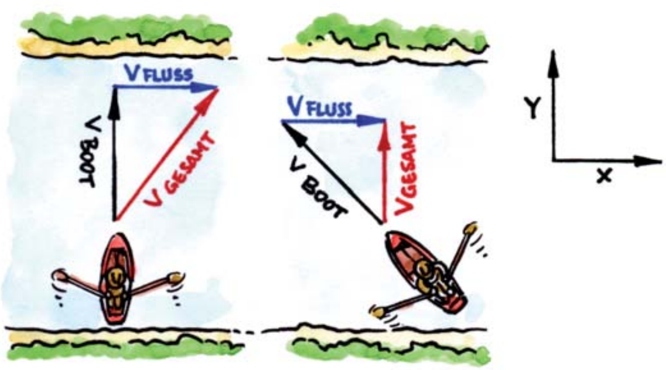

Abb. 7.3: a ist der schnellste Weg, weil v_{Boot} genau quer zum Fluss zeigt. b ist der kürzeste Weg, und man kommt genau am gegenüberliegenden Ufer an. v_{gesamt} ist aber kleiner und man braucht länger.

Vom Ufer aus gesehen führt das Boot zwei Bewegungen aus: eine relativ zum Wasser und eine mit dem Wasser. Beide Bewegungen beeinflussen sich gegenseitig nicht, und man kann sie einfach addieren. Das ist eben das Unabhängigkeitsprinzip.

Wenden wir das Prinzip auf F3 an. Auf ausnahmslos jeden Gegenstand wirkt die **Schwerkraft** und beschleunigt diesen mit rund 10 m/s^2 in Richtung Boden. Und zwar unabhängig davon, welche Bewegung er zusätzlich noch ausführt. Sogar das Licht fällt durch die Gravitation! Das verblüffende ist also, dass beide Patronen gleichzeitig am Boden ankommen.

Man kann auch noch anders überlegen: Ändere das **Bezugssystem** und fliege mit der Horizontalgeschwindigkeit der abgeschossenen Patrone. Diese hat dann für dich keine Horizontalgeschwindigkeit, und es sieht so aus, als ob sie einfach senkrecht zu Boden fällt. Und das tut sie natürlich in ganz normalem Tempo.

▸▸▸ i | Zero *g* |

Zusammenfassung

Führt ein Körper gleichzeitig mehrere Bewegungen aus, so beeinflussen diese einander nicht. Das nennt man das Unabhängigkeitsprinzip der Bewegungen. Wenn man die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten addiert, bekommt man die Gesamtgeschwindigkeit.

| Zero *g* |

Die Wahl des Bezugssystems ist völlig frei. Man könnte es auch so wählen, dass es mit einem Gegenstand in die Tiefe fällt. Nehmen wir ein Flugzeug, das auf einer exakten **Wurfparabel** fliegt. Weil alles gleich schnell fällt, das Flugzeug und auch alles an Bord, wirkt das dann so, als ob es keine Gravitation mehr gäbe. Diesen Umstand nützt man beim Raumfahrttraining aus, um Schwerelosigkeit (also Zero *g*) zu erzeugen.

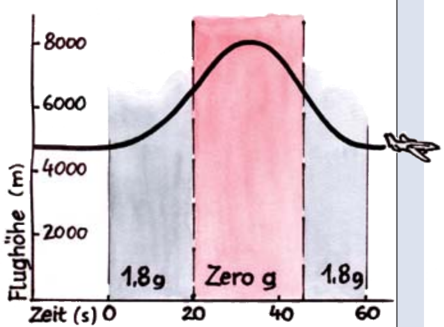

Abb. 7.4: Parabelflug: Der rechte, absteigende Teil im Zero-*g*-Bereich entspricht einem horizontalen Wurf.

Abb. 7.5: Trainierende Astronauten während eines Parabelflugs.

7.2 Von Eiben- und Elbenbögen

Horizontale Würfe

Wir sehen uns jetzt horizontale Würfe an. Damit ist gemeint, dass zum Zeitpunkt des Abwurfs der Geschwindigkeitsvektor waagrecht ist.

F4 Du wirfst einen Stein waagrecht von einem Hügel. Er fliegt 20 m tief und 40 m weit. Wie schnell hast du geworfen?

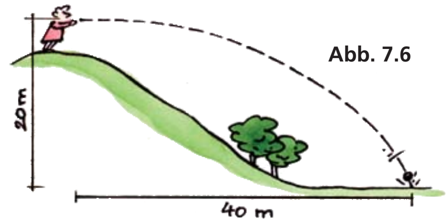

Abb. 7.6

F5 Wie weit kann eine aus einem Hochgeschwindigkeitsgewehr abgefeuerte Kugel fliegen, ohne zu fallen?

F6 Superbogenschützen wie Robin Hood oder der Elbe Legolas hätten im realen Leben mit einem großen Problem zu kämpfen. Und auch der Bus-Sprung über das Loch in der Autobahn im Film „Speed“ ist ein Hollywoodmärchen. Warum?

Mit Hilfe des Unabhängigkeitsprinzips lassen sich Wurfbahnen sehr einfach konstruieren. Dazu muss man den **Geschwindigkeitsvektor** nur in seine waagrechte und senkrechte Komponente **zerlegen** und nachher wieder zusammensetzen. Nehmen wir eine Abwurfgeschwindigkeit von 20 m/s an.

Die horizontale Geschwindigkeit bleibt während des gesamten Fluges über erhalten (siehe Kap. 8.2). In dieser Richtung erfolgt ja keine Beschleunigung. Wir nehmen an, dass es **keine Schwerkraft** gibt. Dann ist der Gegenstand nach einer Sekunde 20 m weit, nach 2 Sekunden 40 m und so weiter (Abb. 7.7).

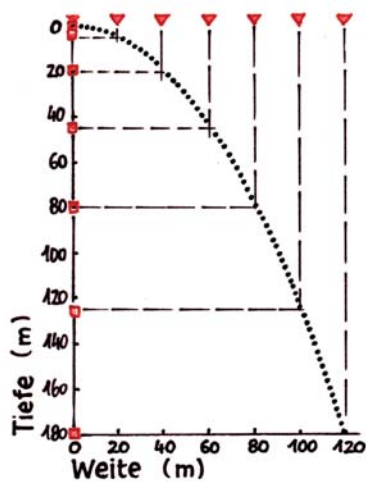

Abb. 7.7: Konstruktion eines horizontalen Wurfs mit Hilfe des Unabhängigkeitsprinzips. Quadrate: freier Fall; Dreiecke: Bewegung ohne Schwerkraft.

Dann nehmen wir an, dass es **keine Horizontalbewegung** gibt, und tragen die Falltiefen ein (siehe Kap. 6.4.1). Zum Schluss verbinden wir die Horizontal- und Vertikalpositionen, und fertig ist die Wurfparabel. Du siehst die maßstabsgetreue Flugbahn des geworfenen Objekts. Mit dieser Methode hat Galilei vor etwa 400 Jahren belegt, dass die Flugbahn Parabelform hat (Abb. 7.8). Du hast also gerade ein wirklich altes Handwerk gelernt!

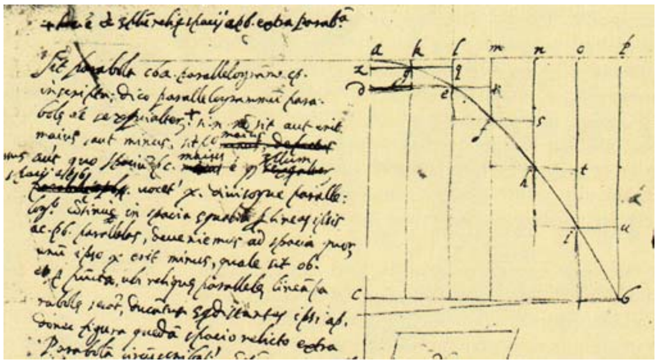

Abb. 7.8: Originalskizze von Galilei zur Konstruktion eines horizontalen Wurfs **um das Jahr 1605.**

Du hast dir vielleicht gedacht, dass bei **F4** eine Angabe fehlt?! Es fehlt aber nichts! Jeder Gegenstand fällt in zwei Sekunden 20 m tief! Deshalb dauert der Wurf zwei Sekunden, und wenn der Stein 40 m weit fliegt, dann wurde er mit 20 m/s abgeworfen.

Weil alle Gegenstände gleich schnell fallen, kann auch ein **Hochgeschwindigkeitsgeschoss** niemals völlig waagrecht fliegen (**F5**). Für Schützen ein großes Problem, weil sie immer höher zielen müssen und diese Abweichung noch dazu von der Entfernung abhängt. Besonders stark macht sich das bei Bögen bemerkbar, weil die Pfeile ja viel langsamer fliegen (**F6**).

Alte Bögen sind meistens aus **Eibenholz**, weil dieses zu den elastischsten und härtesten Hölzern zählt. Trotzdem kann man mit solchen Bögen „nur" knapp 60 m/s erreichen (etwa 220 km/h). Für eine Strecke von 60 m braucht der Pfeil daher eine Sekunde, und in dieser Zeit fällt er um 5 m! Will man also ein Objekt in dieser Entfernung treffen, dann muss man **um 5 m höher zielen** (Abb. 7.9). Selbst aus 30 m muss man um 1,25 m höher zielen. Schwierig für Robin Hood, auf diese Weise einen Pfeil zu spalten!

Auch Keanu Reeves hätte im realen Leben mit dem Unabhängigkeitsprinzip zu kämpfen. In „Speed" befindet er sich in einem Bus, der nicht langsamer als 50 Meilen pro Stunde (etwa 80 km/h oder 22 m/s) fahren darf, sonst explodiert eine Bombe an Bord. Die Fahrt führt auch über einen Teil der Autobahn, wo noch ein Stück Fahrbahn fehlt. Der Bus schafft den Sprung locker! Tatsächlich würde er aber bei einem fehlenden Stück von 20 m **fast 5 m tief fallen!** Autsch!

››› i | Tennis |

Zusammenfassung

Jeder Gegenstand hat die gleiche Fallbeschleunigung, egal welche Geschwindigkeit er zusätzlich noch ausführt. Es gibt daher für fallende Gegenstände niemals völlig horizontalen Flugbahnen.

i

| Tennis |

Wie hoch ist die typische Geschwindigkeit von **Tennisbällen**? Diese Frage lässt sich mit Hilfe des Unabhängigkeitsprinzips einfach abschätzen! Wir nehmen an, dass die Bälle **waagrecht** und knapp über das Netz fliegen und **keinen Drall** haben. Die Überlegung ist einfach: Der senkrechte Flug ist für alle Objekte gleich. Du musst nur wissen, wie lange der Ball braucht, um aus Netzhöhe herunter zu fallen. Diese beträgt bei Tennis 91,5 cm. Daraus kann man die Fallzeit errechnen:

$$t = \sqrt{\frac{s}{5}}\ \mathrm{s} \approx 0{,}43\ \mathrm{s}.$$

In derselben Zeit darf der Ball maximal bis zum Ende des Spielfeldes fliegen. Ein halbes Tennisfeld hat 11,9 m. Die maximale Geschwindigkeit über dem Netz ist daher v = 11,9 m/0,43 s ≈ 27,7 m/s = 100 km/h.

Höhere Geschwindigkeiten können nur dann erzielt werden, wenn von einer höheren Position geschlagen wird (etwa beim Aufschlag) und der Ball nicht waagrecht über das Netz geht oder wenn mit **Topspin** gespielt wird. Darunter versteht man einen Vorwärtsdrall, bei dem sich die Flugbahn durch aerodynamische Effekte verkürzt. Dann kann man stärker draufhauen.

Abb. 7.10: Tennisschlag ohne Drall (das nennt man Drive) und mit Topspin. In diesem Fall verkürzt sich die Flugbahn gegenüber der Flugparabel.

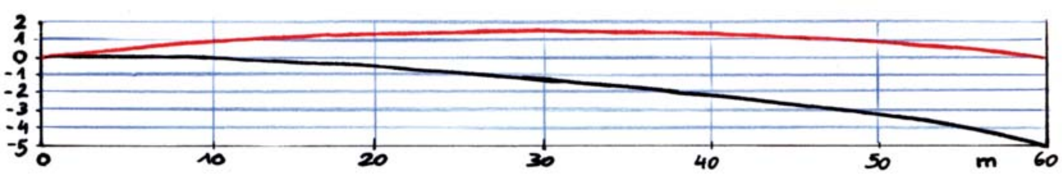

Abb. 7.9: Maßstabsgetreue Flugbahn von Pfeilen, die mit 60 m/s 60 m weit fliegen (blau ohne, rot mit Höhenkorrektur).

7.3 Weltrekord im Eierwurf

Schiefe Würfe

In diesem Abschnitt geht es um schiefe Würfe. Damit sind alle Würfe gemeint, bei denen der Abwurf nicht horizontal erfolgt.

F8 ▸L Bei einer Sprengung wird ein Stein weggeschleudert und schlägt nach 6 Sekunden wieder auf dem Boden auf. Wie hoch ist der Stein geflogen? Ist die Höhe unabhängig davon, ob der Stein senkrecht oder schief geflogen ist (vgl. mit **F15**, Kap. 6.4.2)?

F9 Der Weltrekord im Eierwurf liegt laut Guinness Buch bei 98,5 m (und das Ei wurde angeblich gefangen, ohne zu zerbrechen). Wie schnell muss man dazu abwerfen? Und welches ist der günstigste Abwurfwinkel?

Auch die Flugparabel bei einem **schiefen Wurf** kann man mit Hilfe des Unabhängigkeitsprinzips einfach konstruieren. Nehmen wir dazu an, dass jemand ein **Ei** mit 28,28 m/s (knapp über 100 km/h) mit einem Winkel von 45° abwirft. Du wirst die schräge Zahl gleich verstehen. Wenn du den Geschwindigkeitsvektor zerlegst, dann ergibt das für Vertikal- und Horizontalgeschwindigkeit jeweils 20 m/s. Das lässt sich gut konstruieren!

Zuerst nehmen wir wieder an, dass **keine Schwerkraft** wirkt. Der Gegenstand würde dann geradlinig schräg nach oben fliegen (Abb. 7.11). Von diesen Positionen ziehen wir nun den **freien Fall** ab, und schon ist die Wurfparabel fertig. Das Ei fliegt genau 80 m weit und steigt dabei 20 m hoch. Für einen Eierwurf auf fast 100 m ist daher eine größere Geschwindigkeit nötig (**F9**). Das lässt sich aber besser berechnen als konstruieren. Der günstigste Wurfwinkel ist von der Weite unabhängig und liegt bei 45° (Abb. 7.12). Bei Winkeln, die einander auf 90° ergänzen ist die Wurfweite gleich

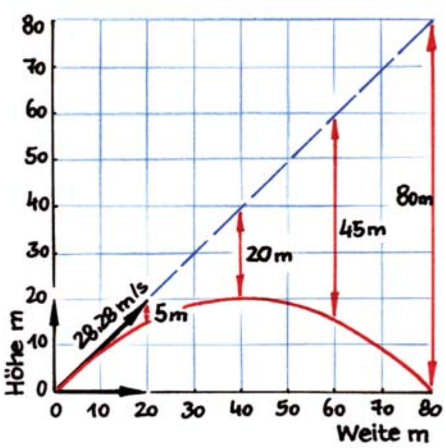

Abb. 7.11: Schiefer Wurf mit einem Winkel von 45°. Die Teil-Komponenten kannst du mit dem **Satz von Pythagoras** ausrechnen oder mit Sinus und Cosinus.

| Mathematik des schiefen Wurfs |

Die **Wurfweite** bei einem schiefen Wurf lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$w = \frac{v^2 \sin 2\alpha}{g}$$

Der Sinus hat bei 90° seinen größten Wert, nämlich 1. Bei 2α = 90° wird daher die höchste Weite erzielt. Deshalb ist der günstigste Winkel 90°/2 = 45° (siehe Abb. 7.12). Die Weite ist proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit: **doppelte Abwurfgeschwindigkeit, vierfache Weite!**

Die **Geschwindigkeit**, die du für eine bestimmte Wurfweite benötigst, bekommst du durch Umformen der oberen Gleichung:

$$v = \sqrt{\frac{wg}{\sin 2\alpha}}$$

Für den **Weltrekord im Eierwurf** ist daher eine Abwurfgeschwindigkeit von 31,4 m/s oder 113 km/h notwendig. Und dabei ist der Luftwiderstand noch gar nicht berücksichtigt. Sehr beachtlich!

Wie sieht es mit **Flugzeit** und **Steighöhe** aus? Um das zu berechnen, muss man den Vektor der Abwurfgeschwindigkeit in seine *x*- und *y*-Komponenten zerlegen. Dabei gilt allgemein: $x = \cos\alpha$ und $y = \sin\alpha$ (siehe Abb. 7.13).

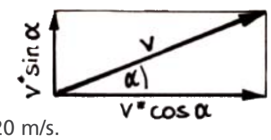

Abb. 7.13: Zerlegung von ***v*** in seine beiden Komponenten mit Hilfe der Winkelfunktionen sin und cos. v_x in Abb. 7.11 wäre also 28,28 m/s · sin(45°) = 20 m/s. Stimmt! Für rechtwinkelige Dreiecke gilt allgemein: sinα ist Gegenkathete durch Hypotenuse und cosα ist Ankathete durch Hypothenuse."

Wenn du weißt, wie weit der Wurf geht und wie groß die Horizontalgeschwindigkeit v_x ist, dann kannst du sofort die Wurfdauer ausrechnen. v_x bleibt ja während des gesamten Fluges gleich groß. Daher gilt $v_x = s/t$ und somit $t = s/v_x$. Der Wurf in Abbildung 7.10 würde daher (80 m)/(20 m/s) = 4 s dauern.

Die Gleichung für die **Flughöhe** kennst du schon (▸▸▸ **i | Bremsweg | Kap. 6.4.2**). Es handelt sich um eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Daher gilt

$$h = \frac{v_y^2}{2g}$$

Nehmen wir als Probe wieder Abb. 7.11. Für die Höhe ergibt sich dann (20 m/s)²/(20 m/s²) = 20 m. Voilà!

Bei **45°** geht der Wurf übrigens **4x so weit wie hoch.** Warum? Die Weite *w* ist dann v^2/g. Und *v* ist zu v_y wie die Diagonale in einem Quadrat. Deshalb gilt:

$$h = \frac{v_y^2}{2g} = \frac{\left(v/\sqrt{2}\right)^2}{2g} = \frac{v^2/2}{2g} = \frac{v^2}{4g}$$

Und das ist eben genau ¼ der Wurfweite!

groß. Mit 50° wirfst du also gleich weit wie mit 40° und mit 60° so weit wie mit 30°.

››› i | **Mathematik des schiefen Wurfs** |

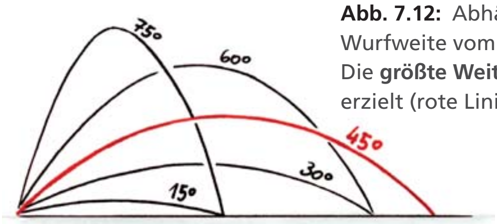

Abb. 7.12: Abhängigkeit der Wurfweite vom Abwurfwinkel. Die **größte Weite** wird **bei 45°** erzielt (rote Linie).

Zusammenfassung

Bei einem Winkel von 45° fliegt ein Gegenstand am weitesten. Die Flugweite ist dann 4-mal so groß wie die Flughöhe. Um über 100 m zu werfen, muss die Abwurfgeschwindigkeit über 30 m/s (etwa 110 km/h) betragen.

7.4 Wenn Hochspringer gefährlich leben

Schiefe Würfe im Sport

Jetzt schauen wir uns ein paar Beispiele aus dem Sport an. Hier wird es etwas komplizierter, weil wir wieder mit realen Fällen ohne Vereinfachung zu tun haben.

F10 Der Weitsprung ist ja gewissermaßen ein „Körperwurf". Also fliegt der KSP entlang einer Wurfparabel (siehe auch Kap. 5.2). Der günstigste Aufsprungwinkel sollte dann 45° sein. Die Weltklasse springt aber mit etwa 20°. Warum? Gilt hier die Physik nicht mehr?

F11 Wie ist es beim Kugelstoß mit dem günstigsten Abwurfwinkel? Liegt der auch bei 45°?

F12 Der Weltrekord im Speerwurf liegt – zufällig wie auch der Eierwurf – bei etwa 98,5 m. Wie sieht es da mit Abwurfgeschwindigkeit und -winkel aus?

F13 ›L Warum wirft man mit dem schweren Schlagball weiter als mit leichteren Tennisball? Ist das nicht unlogisch?

Die physikalischen Gesetze gelten natürlich immer, auch beim **Weitspringer**. Das Phänomen des zu flachen Absprunges ist kein physikalisches, sondern es betrifft also den Körper, genauer die Muskeln (**F10**). Bedenke, dass jede Änderung der Geschwindigkeit, auch eine Drehung, eine Beschleunigung darstellt.

Die **Kontaktzeit** des Fußes beim Absprung ist nur 0,1 s lang. In dieser Zeit muss der Geschwindigkeitsvektor um den Absprungwinkel gedreht werden. Je stärker die Drehung, desto größer die Beschleunigung (bedenke: $\boldsymbol{a} = \Delta \boldsymbol{v}/\Delta t$)! In Abb. 7.14 a siehst du schematisch die Geschwindigkeitsänderung, die bei einem Absprung mit 45° notwendig wäre. So viel Kraft hat kein Weitspringer!

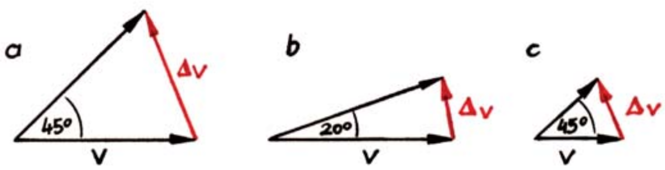

Abb. 7.14: Geschwindigkeitsänderungen, die beim Absprung auftreten (würden). Es ist vereinfacht angenommen, dass sich der Betrag von v nicht verändert.

Bei b siehst du den **realen Fall** eingezeichnet. Das ist die Geschwindigkeitsänderung, die ein Springer in 0,1 s schaffen kann. Steiler kannst du bei gleichem Tempo nicht abspringen. Du könntest nur die Anlaufgeschwindigkeit reduzieren. Bei c ist der Betrag von Δ**v** gleich groß wie bei b, aber der Absprungwinkel ist dann 45°. Du siehst, dass man dazu die Anlaufgeschwindigkeit extrem vermindern müsste. Du kannst zwar unter 45° abspringen, aber die Anlaufgeschwindigkeit müsste dann so klein sein, dass die Weite trotzdem geringer wäre als bei 20°.

Der **Weltrekord im Weitsprung** der Männer liegt bei sagenhaften **8,95 m** (Stand 2007)! Sollte es eines Tages einen Supersportler geben, der die Kraft hat, im optimalen Winkel abzuspringen, dann wären bei gleicher Anlaufgeschwindigkeit Weiten von knapp 12 m möglich (Abb. 7.15).

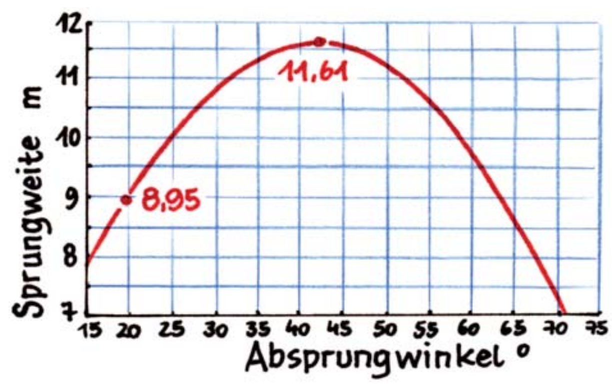

Abb. 7.15: Simulierte Weitenveränderung bei einer angenommenen KSP-Differenz von 1 m zwischen Absprung und Landung und einer Anlaufgeschwindigkeit von 10,2 m/s. Im günstigen Fall wären dann 11,61 m möglich!

In Abb. 7.15 siehst du, dass der günstigste Winkel nicht bei 45°, sondern bei knapp 43° liegt. Wir haben bis jetzt vereinfacht eine symmetrische Flugbahn angenommen. Beim Absprung ist der KSP des Weitspringers aber höher über dem Boden als bei der Landung (etwa 1 m). Es liegt also ein **asymmetrischer** Flug vor, und deshalb ist der optimale Winkel kleiner als 45°.

Beim **Kugelstoßen** ist diese **Asymmetrie** teilweise noch viel **größer**, weil die Reichhöhe beim Abstoß im Bereich von 2 m liegt (Abb. 7.16). Je kürzer die Stoßweite, desto stärker die Asymmetrie und desto flacher der optimale Winkel. Das sollte vor allem beim Schulsport beachtet werden (F11)!

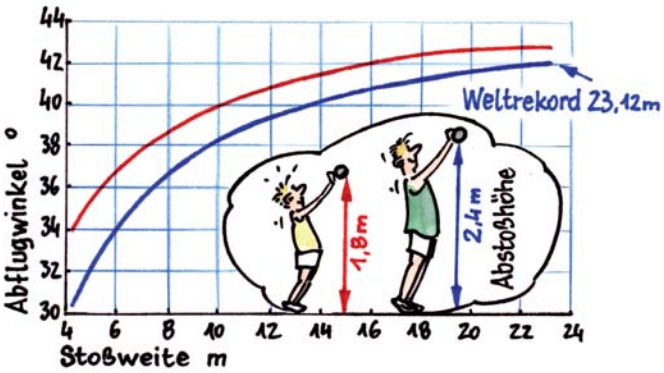

Abb. 7.16: Optimaler Abstoßwinkel für verschiedene Kugelstoßweiten. Die obere Linie gilt für eine Abstoßhöhe von 1,8 m, die untere für 2,4 m. Bei Weltrekord von 23,12 m liegt der optimale Winkel über 42°!

Beim **Speerwurf** sieht die Sache noch einmal anders aus (F12). Der Speer ist **aerodynamisch** und hat somit einen Auftrieb. Er segelt also durch die Luft. Deshalb kann der optimale Winkel nicht mehr mit den Gesetzen des schiefen Wurfs berechnet werden. Er beträgt etwa 35°. Die Abwurfgeschwindigkeit beim Speer ist geringer als beim Eierwurf. Das ist klar, weil die Speermasse etwa 10-mal so groß ist wie die eines Eies (Männer 800 g, Frauen 600 g). Dass durch den Auftrieb genau dieselbe Weite wie für das Ei rauskommt, ist natürlich Zufall.

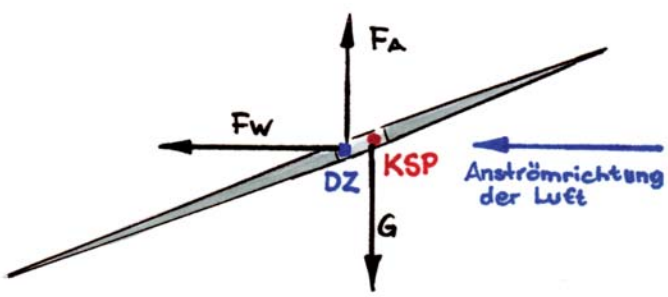

Abb. 7.17: Kräfte, die am Speer angreifen (vgl. mit Abb. 6.41). Das Gewicht (*G*) greift am KSP an, der Auftrieb am Druckzentrum (DZ). Weil der KSP weiter vor dem DZ liegt, kippt der Speer schneller.

| Zusammengesetzte Bewegungen |

F14 ▸L Du wirfst mit 5 m/s einen Stein waagrecht von einem Turm, und er fliegt 20 m weit. Wie hoch ist der Turm? Du wirfst mit 7 m/s einen Stein waagrecht von einem 125 m hohen Turm. Wie weit fliegt der Stein?

F15 ▸L Ein Scharfschütze hat ein Gewehr mit einer Mündungsgeschwindigkeit von 1000 m/s. Um wie viel höher muss er anlegen, wenn er auf ein Ziel in 100 m, 200 m oder 300 m schießt?

F16 ▸L Ein Versorgungsflugzeug wirft ein Paket ab. An welcher Stelle muss dieses abgeworfen werden, damit es das Ziel trifft? Wie sieht die Flugbahn aus Sicht des Piloten und aus Sicht einer Person im Lager aus?

Abb. 7.18

F17 ▸L Nimm an, der Elbe Legolas hätte einen Bogen, bei dem die Pfeile nicht 200 km/h, sondern sagen wir elbische 500 km/h schaffen. Was hätte er für ein Problem?

1984 passierte etwas Außergewöhnliches! Der DDR-Athlet Uwe Hohn warf 104,80 m. Sehr gefährlich für die Hochspringer auf der anderen Seite des Stadions! Deshalb konstruierte man die Speere neu und schob den KSP um 2 cm nach vorne (Abb. 7.17). Die neuen Speere kippen dadurch schneller und haben daher weniger Auftrieb. Trotzdem liegt der neue Rekord schon wieder bei 98,5 m.

Zusammenfassung

Die 45° Abwurfwinkel für den weitesten Wurf gelten nur bei symmetrischer Flugbahn und im Vakuum. In der Realität des Sports treten alle möglichen günstigen Winkel auf, von etwa 20° beim Weitsprung über 35° beim Speerwurf bis knapp 43° bei Weltklasse-Kugelstoßern.

| Epilog |

Führt ein Körper gleichzeitig mehrere Bewegungen aus, so beeinflussen diese einander nicht. Das nennt man das **Unabhängigkeitsprinzip** der Bewegungen. Mit diesem Prinzip lassen sich (unter idealisierten Bedingungen) Wurfparabeln sehr leicht konstruieren. Jeder Gegenstand hat die gleiche Fallbeschleunigung. Ein Pfeil, ein Bus und ein Hochgeschwindigkeitsgeschoss, alle fallen in der ersten Sekunde 5 m tief. Bei einem idealisierten Wurf ist der optimale Winkel 45°. In der Realität des Sports treten durch den Luftwiderstand und die Asymmetrie der Flugbahn alle möglichen günstigen Winkel auf.