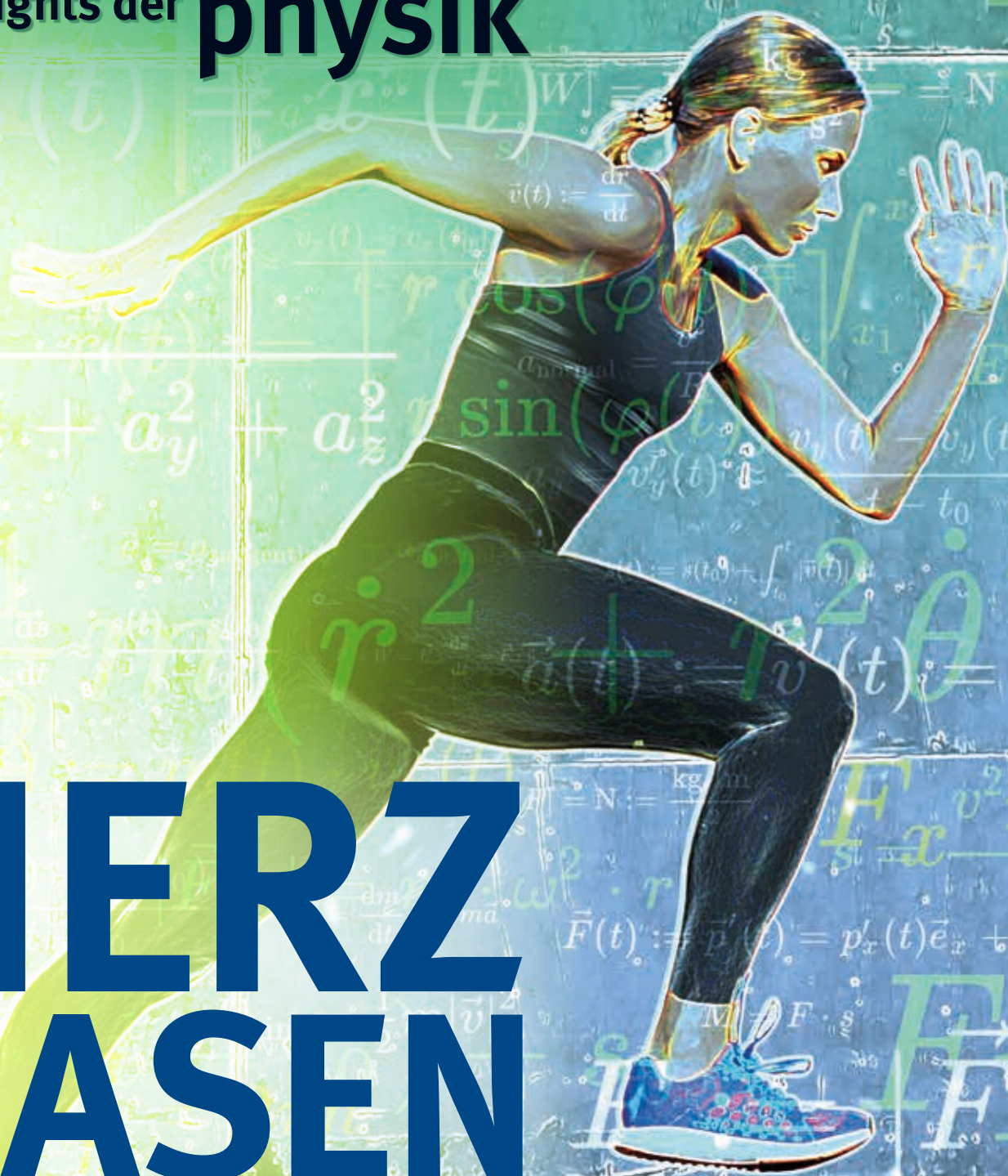


2018
highlights der **physik**

HERZ RASEN

WISSENSCHAFTSMAGAZIN
SPORT \ MENSCH \ MEDIZIN



Dies ist eine Zusammenfassung in „Leichter Sprache“

Herzrasen in Leichter Sprache

Für Sport und Gesundheit spielt die Physik eine große Rolle.



Nicht nur in der Medizin, auch im Sport gibt die Physik erstaunliche Einsichten.
Oder wussten Sie, in welcher Sportart der Ball am schnellsten beschleunigt wird?
Es ist Badminton.

Bei Profis erreicht der Federball für kurze Zeit eine Geschwindigkeit von fast 500 km/h.



Die moderne physikalische Forschung hat Antworten auf viele Fragen gefunden:
Wie können Sportlerinnen und Sportler noch besser werden und
wie können sie noch effektiver trainieren?

Gibt es Grenzen für Rekorde? Und wo liegen diese Grenzen?



Das Herz ist ein wunderbares Organ.

Es versorgt den Körper mit Blut und Sauerstoff.

Es schlägt weit mehr als eine Milliarde Mal im Leben.

Wir können unser Herz trainieren.

Wenn wir regelmäßig Sport treiben, wird es immer stärker.



Vor über 100 Jahren wurde die Röntgenstrahlung entdeckt.

Damit können Ärzte in den Körper hineinschauen.

Seitdem hat die Physik die Untersuchungsgeräte in der Medizin immer weiterentwickelt.

Beim Röntgen können wir sehen, ob ein Knochen gebrochen ist.

Mit anderen Geräten können die Ärzte sogar das Gewebe und die Blutgefäße unter der Haut untersuchen.



Von der Physik können wir viel über unsere Gesundheit und Fitness lernen.

Woraus bestehen Muskeln, wie funktionieren sie genau und wie trainiere ich sie am besten?

Diese Fragen lassen sich heute dank moderner Großgeräte und Supermikroskope beantworten.



Herzrasen bekommen wir manchmal schon beim bloßen Zuschauen.

Zum Beispiel beim Elfmeterschießen im Fußball oder beim Schraubensalto eines Turmspringers.

Oder wenn wir ein Segelboot sehen, das schneller dahinschneit als der Wind.

Das gibt es tatsächlich.

Manche von ihnen sind doppelt so schnell wie der Wind. Einige sogar noch schneller!

Wie sie das machen – verrät uns die Physik.

BALLFIEBER \ 4



HÖHER, SCHNELLER, WEITER \ 10



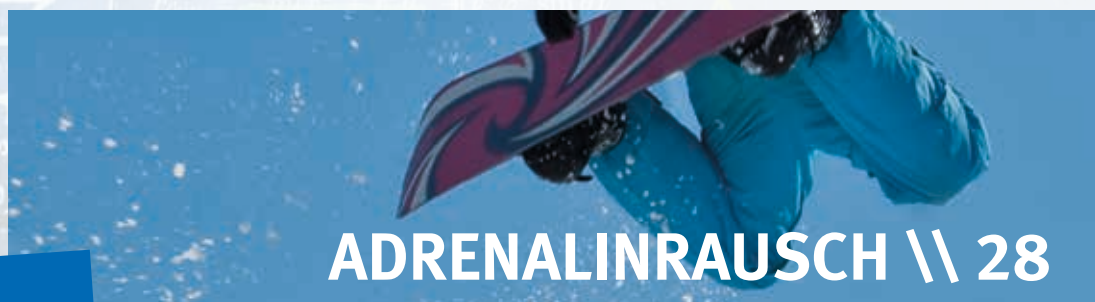
HERZRASEN \ 14



**RÖNTGENBLICK UND
HEILENDE STRAHLEN \\ 18**



REISE IN DIE MOLEKULARE WELT DES KÖRPERS \\ 22



ADRENALINRAUSCH \ 28

**EXTRA:
DER STÄRKSTE
RÖNTGENLASER
DER WELT \\ 26**

Einige Stellen im Heft verweisen auf interessante Video-Clips und Internetseiten. Wer sein Smartphone oder sein Tablet mit einem QR-Code-Scanner ausgestattet hat, kommt leicht auf die verknüpften Seiten. Für externe Inhalte sind die Urheber verantwortlich.



BALLFIEBER

▲ Fußball begeistert Millionen. Für viele unbemerkt, spielt Physik dabei eine entscheidende Rolle.

FUßBALL SPIELEN HEIßT MIT DER PHYSIK SPIELEN! DAS GILT FÜR VIELE SPORTARTEN, ZUM BEISPIEL BEIM SPIEL MIT DEM BALL.

Sport ist körperliche Leistungsfähigkeit und Emotion pur. Physik gilt beinahe als Gegensatz dazu – als Spielfeld für sachlich denkende Köpfe. Doch trotzdem haben die Naturwissenschaft der unbelebten Materie – die Physik – und Sport viel miteinander zu tun: Mit modernen Methoden analysieren Profitrainer den Sport bis ins letzte medizinische und physikalische Detail. Und die Sportgeräte, von den Kufen des Bobs bis zum WM-Fußball, sind heute High-Tech-Apparaturen, die – wenn von Spitzensportlern genutzt – die Grenzen der Physik erlebbar machen. Schon das vermeintlich so einfach durchschaubare Spiel mit dem Ball in seinen vielen Varianten können wir

mit physikalischen und mathematischen Methoden und Gesetzen analysieren und dabei ganz erstaunliche Zusammenhänge entdecken.

Den Anfang macht die schönste Nebensache der Welt: Fußball ist ein wunderbares Untersuchungsobjekt der Physik. Mit den Mitteln der Statistik lässt sich sogar zeigen, warum Fußball als Zuschauersport so beliebt ist! Ein überraschender Grund ist die recht geringe Zahl an Toren, die pro Spiel im Schnitt fällt.

In der vergangenen Bundesligasaison 2017/18 waren es fast genau 2,8 Tore pro Spiel. Das klingt zunächst widersprüchlich, denn viele Tore bringen ja vermeintlich mehr Höhepunkte. Doch je weniger Tore fallen, desto offener ist das Ergebnis. Damit wachsen die Chancen der schwächeren Mannschaft, den stärkeren Gegner durch

einige wenige glückliche Treffer zu besiegen. Davon leben etwa die legendären Dramen im DFB-Pokal, bei denen eine Viertliga-Provinzmannschaft millionenschwere Profis aus der ersten Bundesliga schlägt, oder die scheinbar überraschenden Wendungen, wenn ein verloren geglaubtes Spiel noch gedreht wird. Und je offener und überraschender ein Spiel ist, also je weniger vorhersagbar, desto emotionaler können die Fans den Spielverlauf wahrnehmen.

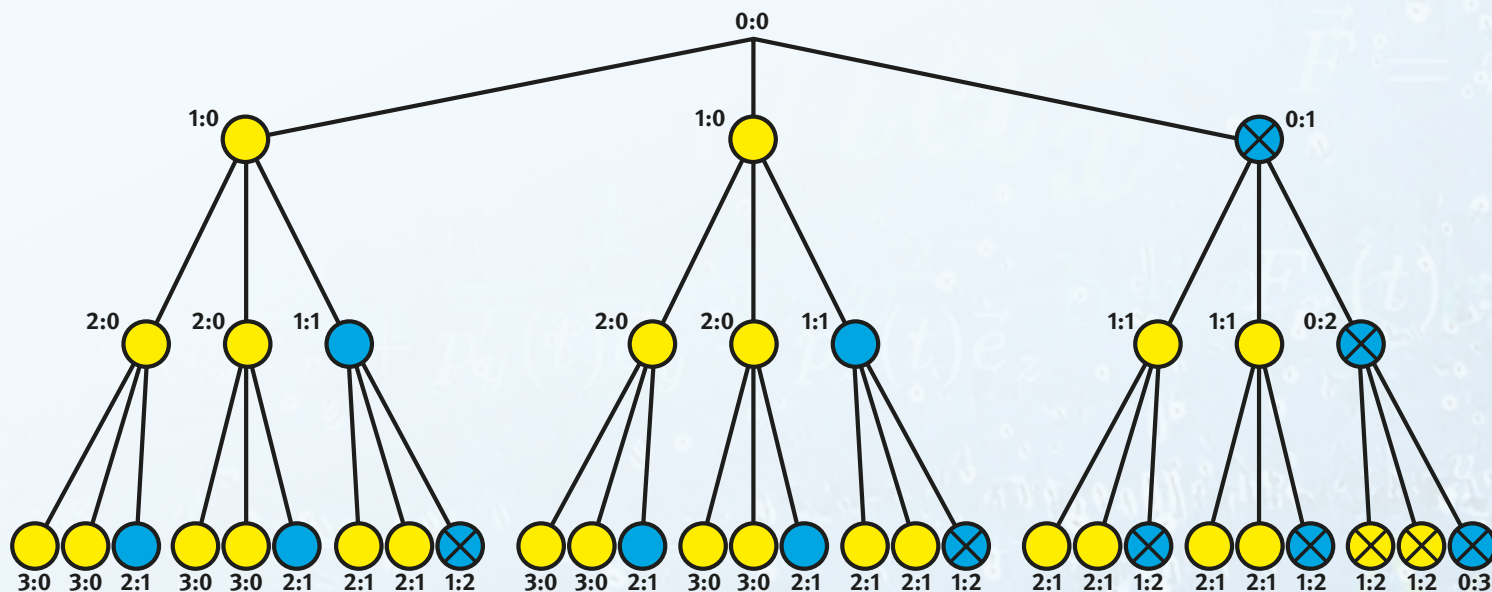
Warum machen weniger Tore ein Fußballspiel im Ausgang offener? Nehmen wir an, eine Mannschaft – zum Beispiel Borussia Dortmund – ist doppelt so gut wie eine andere – sagen wir Schalke 04. Doppelt so gut bedeutet hier, dass die Borussen eine doppelt so hohe Chance wie Schalke haben, das nächste Tor zu schießen, ganz egal, wann es fällt. Wenn im Spiel kein Tor geschossen wird (was bei dieser Paarung immerhin schon fünfmal in diesem Jahrtausend geschehen ist), gewinnt niemand. Fällt genau ein Tor, dann im Mittel in zwei von drei Fällen für Dortmund, in einem von drei für Schalke. Die doppelt so gute Mannschaft verliert bei einem Tor also in 33 Prozent der Fälle. Zeichnet man alle Möglichkeiten auf, dass drei Tore in einem Spiel fallen, kann man abzählen, dass die doppelt so gute Mannschaft dann schon in 20 von 27 Spielen, also 74 Prozent der Fälle gewinnt. In der Realität des Revierderbys ist der Unterschied zwischen den Mannschaften übrigens nicht so deutlich und er hängt zusätzlich ganz stark davon ab, wer die Heimmannschaft ist – das hat sehr viel mit Emotionen zu tun.

Bei Ballsportarten, in denen pro Spiel viel mehr Treffer erzielt werden, etwa bei Basketball oder



▼ Ergebnisbaum eines Fußballspiels. Alle dargestellten Ergebniszweige sind gleich wahrscheinlich, da Team Gelb doppelt so häufig das nächste Tor schießt wie Team Blau – jedenfalls in unserem vereinfachten statistischen Modell. Oben in der ersten Zeile steht, wer das erste Tor schießt, in der zweiten, wer das zweite schießt, und so weiter. Das Ergebnis, wenn man alle Wege abzählt: Eine von drei Ein-Tor-Partien (33,3 Prozent, „X“ in der Grafik) gewinnt die schwächere Mannschaft. Fallen zwei Tore, gewinnt Team Blau sogar nur eines von neun Spielen (11,1 Prozent), bei drei Toren sieben von 27 Spielen (26 Prozent).

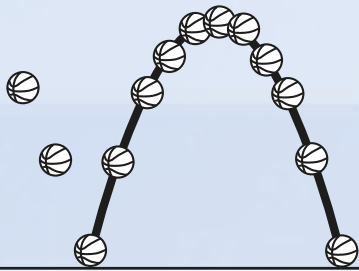
▲ Beim Basketball fallen um ein Vielfaches mehr Treffer als beim Fußball. Dirk Nowitzki machte im März 2017 seinen sage und schreibe 30.000. Punkt in der US-amerikanischen Profiliga NBA.



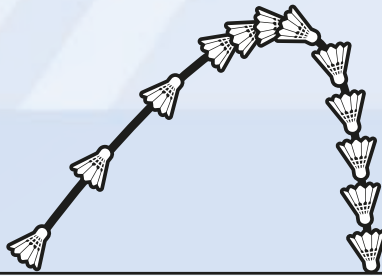
▼ Basketballle fliegen auf kurzer Distanz in fast perfekten Parabelkurven, weil bei ihrem Tempo der Luftwiderstand vernachlässigbar ist. Beim Badminton hingegen ist die Flugkurve stark ballistisch – der Ball fällt nach hoher Anfangsgeschwindigkeit von bis zu 500 km/h fast senkrecht zu Boden. Die Ursache dafür ist der hohe Luftwiderstand bedingt durch die spezielle Form des Federballs.

▼ Beim Fußballabschlag ist der Luftwiderstand entscheidend: Ohne ihn würde ein gleich geschossener Ball höher und fast doppelt so weit fliegen.

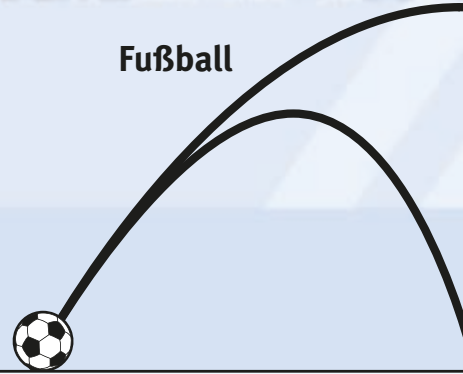
Basketball



Badminton



Fußball



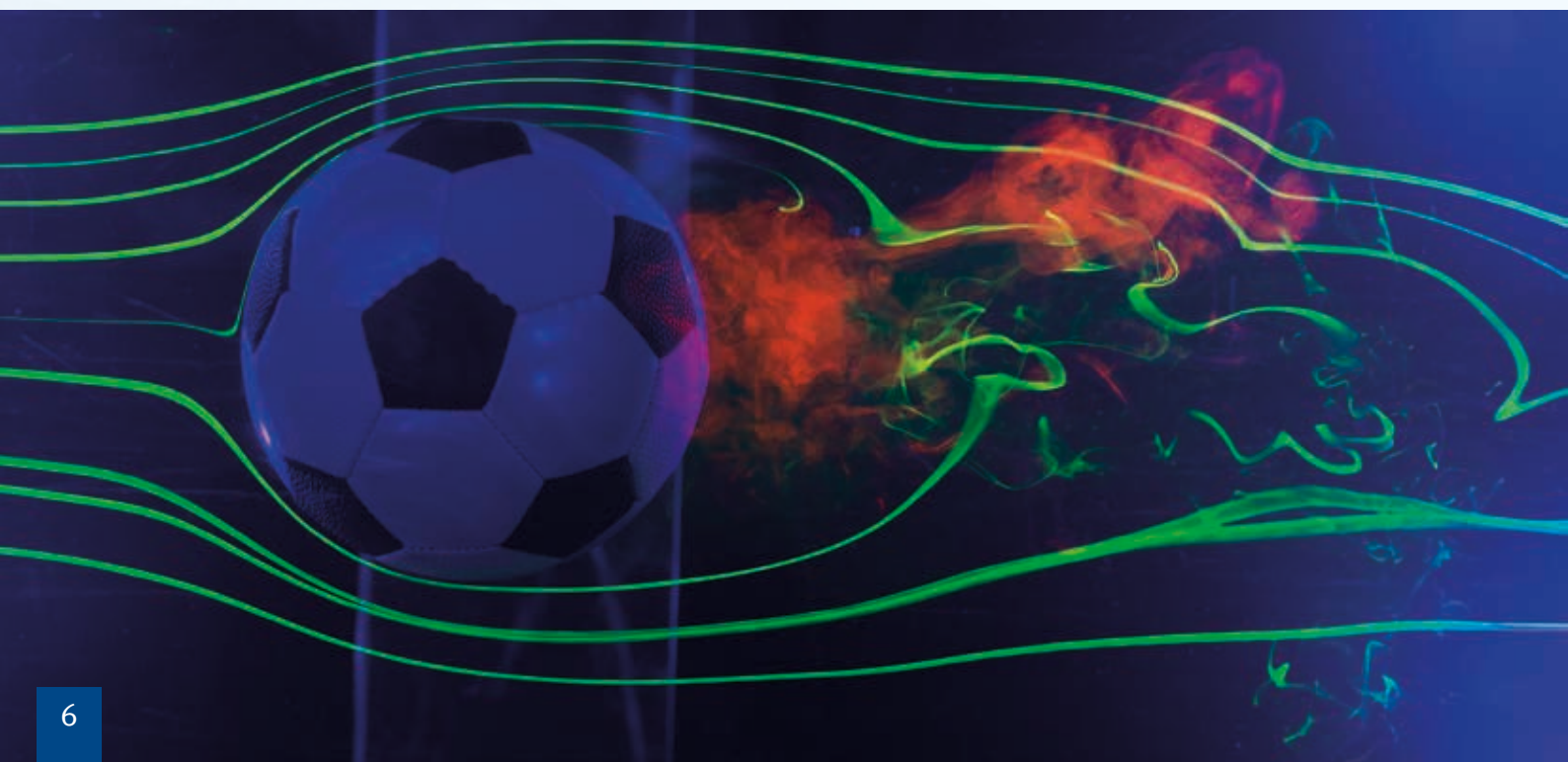
Handball, geht es daher viel gerechter zu, in dem Sinne, dass statistisch gesehen die stärkere Mannschaft viel öfter gewinnt. Ob die Spiele dadurch spannender sind? Wohl eher nicht.

Ganz ohne Statistik kommt die klassische Mechanik aus, mit der sich die Flugbahnen der Spielbälle aller möglichen Sportarten sehr genau berechnen lassen. Für den einfachsten Fall gehen drei Aspekte in die Berechnung der Flugweite eines Balls mit ein: Die Abwurf- oder Schussgeschwindigkeit, der Steigungswinkel und die Eigenschaften des Balls, nämlich seine Masse, seine Größe und sein Luftreibungsbeiwert (c_w -Wert). Grund-

sätzlich gilt dabei: Je schwerer der Ball ist und je langsamer er unterwegs ist, desto geringer ist der Einfluss der Luftreibung auf seine Flugbahn. Daher hat die Bahn eines vergleichsweise langsam geworfenen Basketballs fast die Form einer Parabel, während ein Fußball und viel stärker noch ein Federball „ballistisch“ unterwegs sind: Ihre Flugbahn auf dem absteigenden Ast ist viel steiler als die aufsteigende, da die Fluggeschwindigkeit durch den Luftwiderstand stark gebremst wird.

Wie weit ein Ball genau kommen kann, wurde wissenschaftlich berechnet: Der Federball beim Badminton sollte nach 14 Metern durch den

▼ Fußball im Strömungskanal: Die dünne Grenzschicht in Ballnähe ist entscheidend für dessen Flugverhalten. Hinter dem Ball bewirkt seine raue Oberfläche eine geringere Unterdruckzone (hier rot) – dadurch fliegt er weiter.



▼ Auf dem Mond mit seiner geringen Gravitation würde ein widerstandsloser Schuss sogar fast 500 Meter weit fliegen.



Luftwiderstand so stark gebremst sein, dass er abstürzt. Passend dazu ist das Badminton-Feld 13,40 Meter lang. Ein Fußball sollte 75 Meter weit fliegen können, auch hier passt die Feldgröße von 100 bis 110 Metern Länge gut dazu. Ob berechnet oder durch Versuch ermittelt – auf jeden Fall mit Hilfe der Physik zu verstehen.

Überraschend ist auf den ersten Blick die hohe Geschwindigkeit, mit der im Fußball, im Tennis oder gar im Badminton die Bälle gespielt werden. Profifußballer erreichen 120 bis 140 Kilometer pro Stunde (km/h), ein Aufschlag im Herrentennis erreicht bis zu 250 km/h und der Weltrekord beim Badmin-

ton liegt noch einmal doppelt so hoch. Zwei Elemente sind für so hohe Geschwindigkeiten verantwortlich: das doppelte (bzw. dreifache) Gelenk bei der Schlagbewegung und die Elastizität von Ball bzw. Schläger.

Das mehrfache Gelenk sorgt zunächst für eine hohe Aufprallgeschwindigkeit von Fuß und Ball: Der Oberschenkel dreht sich um die Hüfte, sodass das Knie zum Auftreffpunkt eine Geschwindigkeit von rund 20 km/h erreicht. Doch der Unterschenkel bringt noch zusätzliche 20 km/h, dazu die Anlaufgeschwindigkeit, sodass der Fuß den Ball mit etwa 50 km/h treffen kann.

▼ Flugweite eines Balls (ohne Luftwiderstand):

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

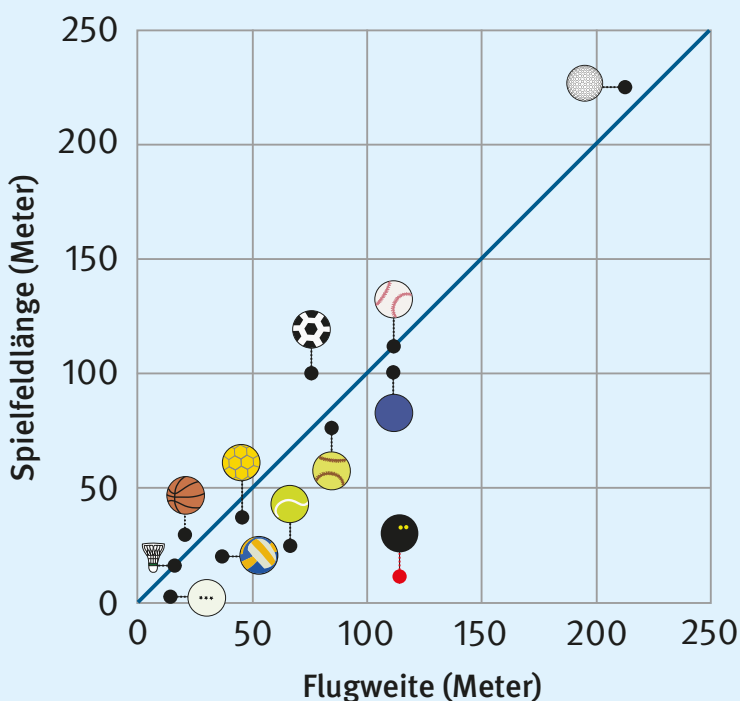
s: Schussweite

v: (Ball-)Geschwindigkeit

g: Schwerebeschleunigung (9,81 m/s²)

α: Abschusswinkel

▼ Vergleich von Flugweiten und Spielfeldgrößen im Ballsport.





INFO



RASENDE FEDERBÄLLE

Wenn man Wetten darüber abschließen würde, welche Ballsportart die höchsten Fluggeschwindigkeiten erzielt, käme wohl kaum jemand auf Federball. Doch der malaiische Badminton-Profi Tan Boon Heong erreichte 2009 bei den Japan-Open-Spielen eine gemessene Ballgeschwindigkeit von 421 km/h. Im August 2013 erzielte er sogar in einer speziellen Versuchsanordnung bei einem Aufschlag gigantische 493 km/h – Weltrekord. Keine andere Ballsportart mit oder ohne Schläger erreicht auch nur annähernd solche Geschwindigkeiten. Zum Vergleich: Im Tennis hält der Australier Sam Groth den offiziellen Weltrekord mit 263 km/h, im Squash der Australier Cameron Pilley mit 283 km/h. Im Frauentennis ist die Spanierin Georgina Garcia Pérez mit 220 km/h Weltrekordlerin.

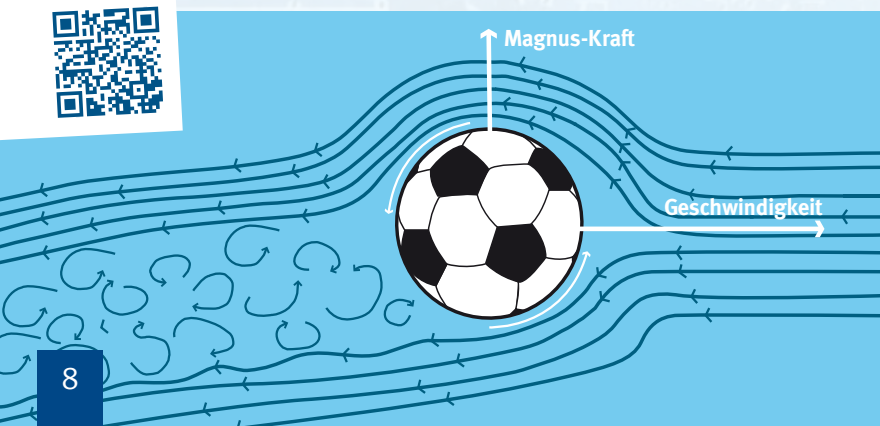
Aber warum kann man einen Federball mit einem Schläger auf die Geschwindigkeit eines Turbopropflugzeugs bringen? Das hat mehrere Gründe. Erstens sind Federbälle mit fünf Gramm Leichtgewichte, genauso die Badminton-Schläger mit 70 bis 90 Gramm. Ein Tennisschläger wiegt mindestens das Dreifache. Ein Mensch kann daher einen Badminton-Schläger auf besonders hohe Schlaggeschwindigkeiten beschleunigen. Ein weiterer Faktor ist die im Vergleich zu Tennis oder Squash viel weichere Bespannung. Beim Schlag gibt sie stärker nach und ist daher über eine relativ lange Schlagdistanz im Kontakt mit dem Federball. Wie eine Schleuder kann sie so dem Ball mehr Bewegungsenergie mitgeben.

◀ Badminton-Profi Tan Boon Heong hält den aktuellen Weltrekord in Sachen Geschwindigkeit. Unter Testbedingungen beschleunigte er einen Federball auf knapp 500 km/h.

Der Ball nimmt durch seine Elastizität einen Teil des Impulses des Fußes auf. Berechnet man dies mit der einfachen Formel des elastischen Stoßes, dann ergibt sich für den Ball eine Geschwindigkeit von 100 km/h. Beim Rekordhalter Badminton erreichen die Sportlerinnen und Sportler durch drei Gelenke (Schulter, Ellenbogen und Hand, die den Schläger führt) schon allein die hohe Auftreffgeschwindigkeit von weit über 100 km/h. Durch die Impulsübertragung beim elastischen Stoß werden daraus dann die dreimal so hohen Geschwindigkeiten für den Ball.

In der Sportrealität fliegen Bälle allerdings nicht nur geradeaus und fallen allmählich zu Boden. Besonders beim Fußball sind „Bananenflanken“ bekannt, die krumm durch die Luft ziehen, als ob der Ball ein Eigenleben hätte. Ursache für dieses Verhalten der Bälle ist ihre Rotation, die wir bei der vorherigen Betrachtung außer Acht gelassen haben.

Dreht sich der Ball nämlich, dann bewegt sich seine Oberfläche auf der einen Seite mit und auf der anderen Seite gegen den „Fahrtwind“. Auf der Seite mit der niedrigeren Relativbewegung – also der Seite, in deren Richtung sich der Ball dreht – kann die Strömung daher länger am Ball anliegen, während auf der Seite mit der höheren Geschwindigkeit schon früher Luftwirbel entstehen. Dieser asymmetrische Strömungsabriss sorgt dafür, dass der Ball eine Kraft in Drehrichtung erfährt. Der sogenannte Magnus-Effekt sorgt also dafür, dass ein mit Drall angeschossener Ball eine gebogene Flugbahn nimmt – in Richtung der Drehung. So lassen sich Mauern beim Freistoß überwinden. Und für Torhüter sind solche Bälle besonders schwer vorherzusehen und damit schwierig zu halten.



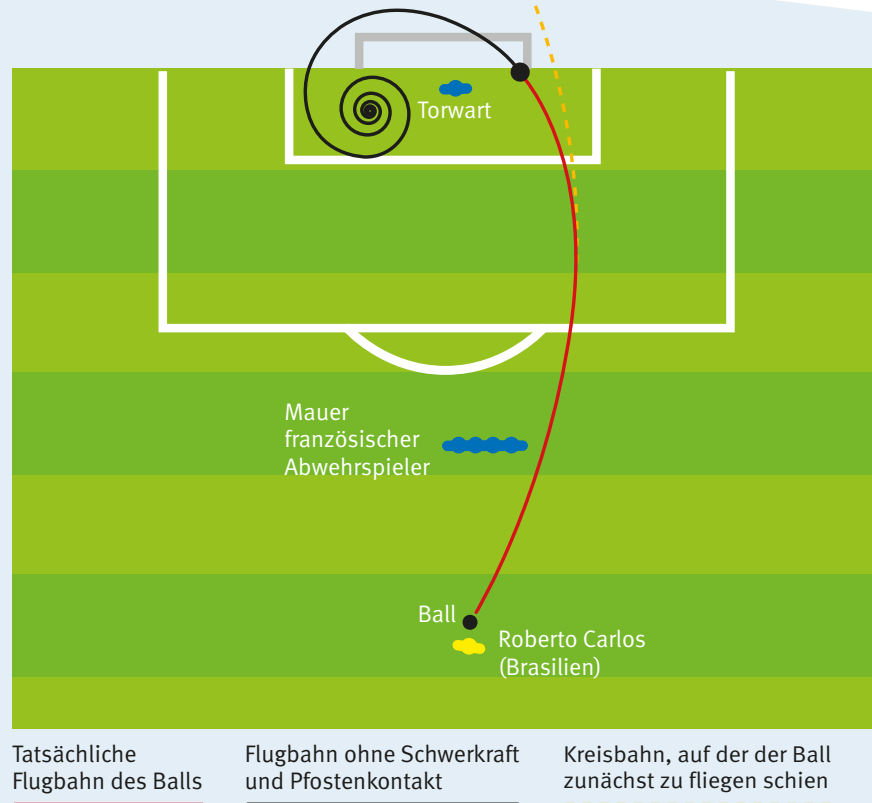
◀ Der Magnus-Effekt: Wird ein Fußball durch einen Schuss in Rotation versetzt, driftet er in die Richtung, in der sich seine Oberfläche parallel zur Luftströmung bewegt. Grund ist das durch die Drehung asymmetrische Ablösen der Luftwirbel von der Balloberfläche. Dadurch wird die Wirbelschlepe hinter dem Ball leicht zur Seite gelenkt und der Ball in die Gegenrichtung gedrückt.

Aber nicht nur seitliche Drallbewegungen finden wir im Sport. Dreht sich der Ball so, als würde er über den Boden rollen, dann ist dies ein „Top-spin“. Mit der gleichen Argumentation wie oben bedeutet dies, dass der Ball einen zusätzlichen Abtrieb erhält. Er fliegt deutlich kürzer als allein die Schwerkraft vermuten lassen würde. Besonders beim Tennis und Tischtennis sind solche angeschnittenen Schlagtechniken verbreitet.

► Roberto Carlos' Wundertor: Es war die 21. Minute, als sich Roberto Carlos im Stade de Gerland in Lyon den Ball für einen Freistoß zurechtlegte. Der Ball prallte nach „unmöglicher“ Flugkurve vom Innenpfosten ins Tor. In der Wiederholung sieht es zwischenzeitlich so aus, als ob er weit am Tor vorbeigehen sollte.

▼ Julia Görges, aktuell zweitbeste deutsche Tennisspielerin. Der Magnus-Effekt lässt sich auch in ihrem Sport nutzen: Lässt man den Ball durch geschicktes Schlagen schnell genug rotieren, nimmt er eine für den Gegner schwer vorhersehbare Flugkurve ein.

Das Tor von Roberto Carlos gegen Frankreich, 1997





HÖHER, SCHNELLER, WEITER

▲ Dem jamaikanischen Sprinter Usain Bolt (rechts) gelang es bislang als einzigem Menschen, die 100 Meter in weniger als 9,6 Sekunden zu laufen.

OB SPRINT ODER MARATHON: LAUFEN IST BIOMECHANIK UND DAMIT PHYSIK IN AKTION.

Knapp unter zehn Sekunden für einhundert Meter und 44 km/h Spitze. Schneller laufen kann kein Mensch. Damit sind wir den Spezialisten des Tierreichs im Sprint, etwa den Geparden, deutlich unterlegen. Diese Kleinkatzen erreichen für einige Sekunden über 90 km/h. Aber im Dauerlauf sind wir Menschen Weltklasse: Menschen haben nämlich vielen Tieren gegenüber den Vorteil, dass sie großflächig über die Haut schwitzen und so ihre Körper effizienter kühlen können. Das befähigt sie zu einer überlegenen Ausdauer. Manche Naturvölker nutzen diesen Vorteil bei der Jagd auf wesentlich schnellere Beutetiere aus, indem sie diese in den Hitzekollaps hetzen. Das Wärmeproblem führt direkt zu Eigenschaften von Muskeln, die in mancher

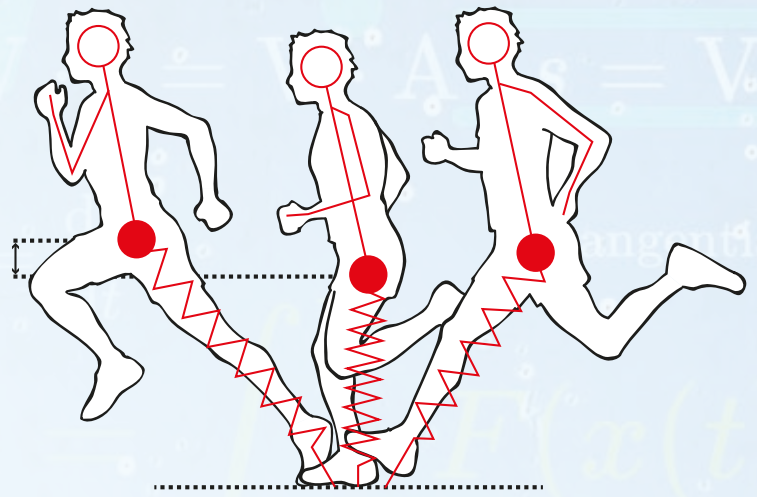
Hinsicht physikalischen Wärmekraftmaschinen verblüffend ähneln: Wie diese können Muskeln nur grob ein Viertel der von ihnen verbrauchten chemischen Energie aus Nahrung in mechanische Bewegung umsetzen. Das entspricht ungefähr dem Wirkungsgrad von Autos mit Verbrennungsmotoren. Den Rest muss der Körper als Abwärme – unterstützt durch Verdampfen von Wasser – loswerden.

Allerdings würden wir zu Fuß nicht weit kommen, wenn wir allein mit Muskeln, Knochen und Gelenken ausgestattet laufen müssten. Knochen und Gelenke würden zwar schon als Stützen dienen und als Hebel mechanische Kräfte in die erforderliche Richtung lenken. Doch die Muskeln müssten den Körper ständig aktiv gegen die Schwerkraft aufrecht halten und vorwärts bewegen. Das hätte einen extrem hohen Energieverbrauch zur Folge. Dieses Problem hat die Evolution mit der genia-

len Erfindung der elastischen Sehnen gelöst. Zusammen mit Muskeln und Knochen wirken sie als mechanisches Federsystem, das mit der Masse des Körpers zusammenspielt. Beim Aufsetzen der Füße drückt der Körperschwerpunkt der Gravitation folgend nach unten. So spannt er das Federsystem der Beine und speichert darin Bewegungsenergie in Form von elastischer Energie. Beim Abdrücken setzen die Beine diese Energie wieder als Vorwärts- und Aufwärtsbewegung frei. Läuft man mit gleichmäßigem Tempo auf einer flachen Ebene, dann muss die Beinmuskulatur im Prinzip nur die Reibungsverluste ausgleichen.

Besonders schön kann man das bei der Weltspitze im Hundertmetersprint beobachten. Die hochtrainierten Beine dieser Läuferinnen und Läufer verhalten sich wie sehr starke Federn. Wichtig hierfür ist das Zusammenspiel der ausgeprägten Wadenmuskulatur mit den Sehnen am Unterschenkel und Fuß, vor allem der Achillessehne. Die Oberschenkelmuskeln sorgen für den Vortrieb. Sie müssen während der Beschleunigungsphase auf den ersten 30 Metern unter Volllast arbeiten. Für den Rest der Distanz kommt die in den Beinen gespeicherte elastische Energie verstärkt zum Einsatz. Bis etwa 60 Meter können die Beinmuskeln noch

▼ Ekaterini Stefanidi ist die amtierende Welt- und Europameisterin im Stabhochsprung. In dieser Phase des Sprungs wird sie durch die im Stab gespeicherte Energie nach oben katapultiert. Damit dies in einer koordinierten Bewegung geschieht, werden sehr viele Muskeln des Körpers gleichzeitig beansprucht – ein Bewegungsablauf, der viele Jahre des Trainings bedarf.



die Verluste durch mechanische Reibung und Luftreibung ausgleichen und das Tempo halten. Danach ist der für den Sprint wichtigste Energielieferant im Muskel aufgebraucht. Auf den letzten grob 40 Metern trägt also zunehmend die abwechselnd im linken und rechten Bein gespeicherte Federenergie die Läuferinnen und Läufer voran.

Hochsprung und Stabhochsprung sind aus physikalischer Sicht die Sportarten, in denen es darum geht, Bewegungsenergie möglichst vollständig in Lageenergie umzuwandeln. Damit lässt sich auch schon ganz einfach erklären, warum der Weltrekord im Stabhochsprung bei knapp über 6 Me-

▲ Masse-Feder-Modell des Rennens auf zwei Beinen. Der Körperschwerpunkt wird durch den roten Punkt symbolisiert. Dieser drückt nach dem Aufsetzen des Fußes nach unten. Dabei speichert das Bein wie eine zusammengedrückte Feder Bewegungsenergie in Form von elastischer Energie. Der nächste Schritt setzt diese wieder frei.

▼ Über die Anlaufgeschwindigkeit sammeln Stabhochspringer kinetische Energie, die beim Absprung auf den Stab übertragen und im Moment der Streckung von Stab und Körper in potenzielle Energie umgewandelt wird. Die Linie zeigt die Bahn des Körperschwerpunktes (KSP).

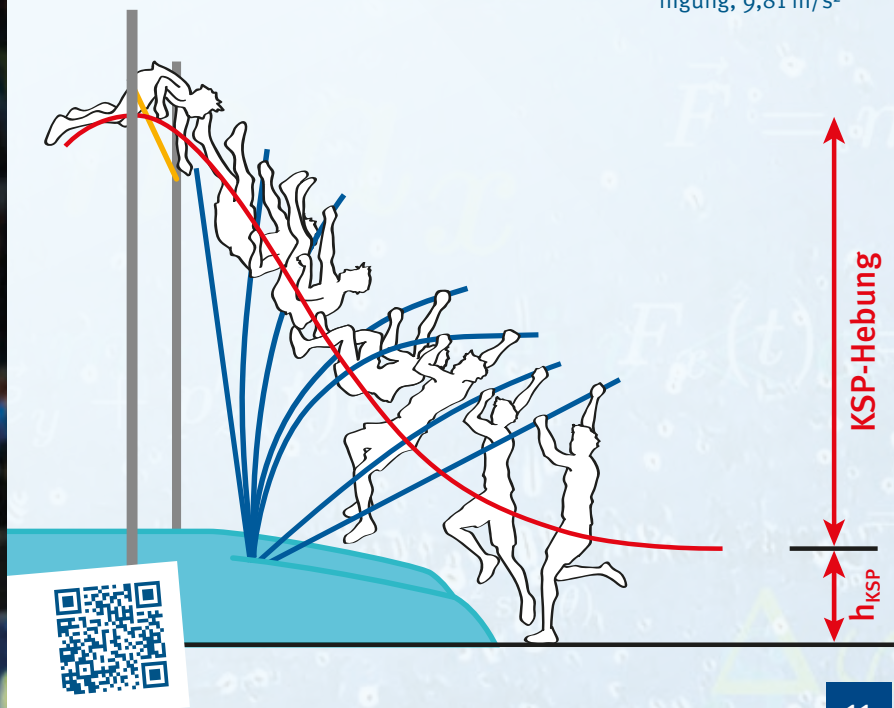
▼ Stabhochsprung:

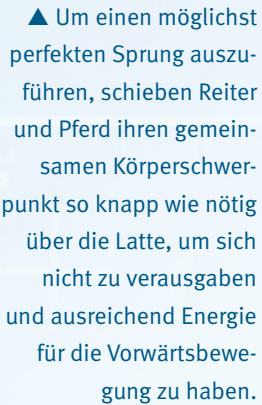
$$h = \frac{v^2}{2g}$$

h: Höhe in Metern

v: Anlaufgeschwindigkeit (in m/s)

g: Schwerebeschleunigung, 9,81 m/s²





▼ Schwimmen mit Stil:
Kraulen, Schmetterling,
Brust- und Rücken-
schwimmen unter-
scheiden sich deutlich
voneinander.

tern liegt und in Zukunft nicht mehr stark steigen kann: Die Bewegungsenergie erreicht ein Stabhochspringer durch die Beschleunigung beim Anlauf. Die weltbesten Springer erreichen dabei fast die Durchschnittsgeschwindigkeit von Hundertmeterläufern, also knapp 10 Meter pro Sekunde. Rechnet man mit den Formeln für kinetische und potenzielle Energie, dann ergibt sich, dass der Körperschwerpunkt um 5,1 Meter steigen kann. Befindet sich der Schwerpunkt beim Anlauf in einem Meter Höhe, dann kann die Latte in 6,1 Metern Höhe gerade eben überwunden werden. Notwendig dafür ist allerdings, dass die Bewegungsenergie möglichst vollständig in Lageenergie umgewandelt wird. Und genau dafür sind der Sprungstab und die komplizierte Sprungtechnik verantwortlich. Durch das Einstechen des Stabes wird seine Spitze schlagartig abgebremst. Die Bewegungsenergie des Sportlers sorgt dafür, dass der Stab sich verformt – er speichert die Energie. Nun ist es dem Geschick des Athleten zu verdanken, dass er diese Energie wieder als Bewegung in die richtige Richtung – nach oben – abgibt.

Diese Sprungtechnik verdankt ihren Erfolg der Materialentwicklung: Erst Stäbe aus glasfaserverstärk-

tem Kunststoff (GFK), wie sie seit Beginn der 1960er Jahre eingesetzt wurden, biegen sich um bis zu einen Meter durch. Sie speichern dabei einen viel größeren Anteil der Bewegungsenergie aus dem Anlauf kurzzeitig als elastische Energie, als ältere Stäbe aus Metall oder Holz es tun. Moderne Hochsprungstäbe bestehen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK). Aktuell hält der Franzose Renaud Lavillenie mit 6,16 Metern den Weltrekord, der vorige Rekord von 6,15 Metern von Serhij Bubka bestand für mehr als 20 Jahre – das zeigt, wie schwer jetzt noch eine weitere Verbesserung ist.

Dass es beim Hochsprung ohne Stab nicht so hoch hinaus geht, liegt einzig daran, dass die Muskeln und Sehnen der Athletinnen und Athleten nicht im gleichen Maß die Bewegungsenergie speichern und sofort wieder abgeben können wie der Sprungstab. Aber auch hier gibt es einen Physik-Trick, der Sprunghöhen von über zwei Metern erlaubt: Die Hochspringer biegen nämlich am höchsten Punkt der Flugbahn ihren Körper so weit durch, dass ihr Körperschwerpunkt nach unten wandert. Zwar muss der Schwerpunkt bei genauer Betrachtung auch etwa die Höhe der Latte erreichen, aber durch das Durchbiegen spart man doch einige Zentimeter ein. Diese aktuell genutzte Sprungtechnik für den Hochsprung, der „Flop“, wurde auf internationaler Bühne erstmals bei den olympischen Spielen 1968 genutzt – und bescherte dem Athleten Dick Fosbury den Sieg. Die Technik setzte sich gegen den zuvor gebräuchlichen Seitwärts-Rollsprung („Straddle“) allerdings erst in den 1980er-Jahren vollständig durch. Auch der Straddle nutzte den Schwerpunkt-Trick, allerdings wurde der Bauch der Latte zugewandt und nicht wie beim Flop der Rücken. Dadurch liegt der Schwerpunkt beim Straddle am höchsten Punkt des Sprungs vermutlich etwas höher als beim Flop. Wichtiger für den Erfolg des Flops ist die bessere Umsetzung der Anlaufgeschwindigkeit in Höhe, da ähnlich wie der Stab beim Stabhochsprung hier der kräftige Oberschenkelmuskel die Bewegungsenergie beim Absprung speichert und wieder abgibt.

Um Springen geht es auch in einer uralten sportlichen Partnerschaft von Mensch und Pferd. Hier ist wieder die Biomechanik interessant. Wenn beim Springreiten ein Pferd mit Reiterin oder



► Sein Bein verlor Markus Rehm mit 14 Jahren beim Wakeboarden, dennoch wurde er zwei Jahre später deutscher Vize-Jugendmeister. Heute hält er den paralympischen Rekord im Weitsprung.

Reiter über ein Hindernis springt, dann bewegen sich zwei Körper mit ihren Schwerpunkten auf Parabelbahnen durch die Luft. Hohe Hindernisse bewältigen beide zusammen durch einen Trick, der an den Hochsprung erinnert. Um dem Pferd Kraft und Energie beim Absprung zu sparen, „schieben“ beide Partner ihren gemeinsamen Körperschwerpunkt so tief wie möglich über die Latte. Dazu heben sich die Reiter noch vor dem Absprung aus dem Sattel und bringen damit den Schwerpunkt zunächst nach oben. Während des Sprungs beugen sie sich möglichst tief hinunter, was den Schwerpunkt nach unten schiebt. Das reduziert die Höhenänderung des Schwerpunkts – und nur diese ist für die notwendige Sprungkraft verantwortlich. Beim Absprung wirken vor allem die Beine der Pferde als starke Federn mit beeindruckender Kraftentfaltung. Sie drücken mit einer Kraft, die ein Mittelklasseauto anheben könnte, und bei der Landung müssen sie sogar fast 2,5 Tonnen abfangen. Die zierlich aussehenden Pferdebeine besitzen dafür sehr kräftige Beinsehnen, zudem wirken die Hufe als effiziente Dämpfer.

Neben den Fortbewegungen zu Lande und in der Luft messen sich Menschen auch bei Wettkämpfen im Wasser. Dass Menschen überhaupt schwimmen können, liegt daran, dass sie ungefähr die Dichte von Wasser besitzen. Allerdings neigen die Beine zum Absinken, sobald man den Kopf aus dem Wasser hebt, was wiederum für die Atmung notwendig ist. Das Brustschwimmen ist daher ein dauernder Wechsel zwischen einer Vortriebsphase, bei der der Kopf zum Atmen aus dem Wasser gebracht wird, und einer Gleitphase, in der eine möglichst waagerechte und damit stromlinienförmige Position eingenommen wird. Interessant ist ein Blick auf den Energieverbrauch der verschiedenen Schwimmstile. Am meisten Energie verbraucht der Schmetterlingsstil, dicht gefolgt vom Brustschwimmen; Rückenschwimmen und Kraul sind noch effektiver. Kraulschwimmen ist auch am schnellsten. Wissenschaftliche Untersuchungen deuten darauf hin, dass Menschen unter Wasser schneller als über Wasser schwimmen können. Der Grund: Die auf der Wasseroberfläche erzeugten Wellen entziehen der Vorwärtsbewegung Energie. Wer taucht, kann diese Schwellen weitgehend vermeiden.



INFO

TECHNISCHER VORTEIL?

Mit Beinprothese auf Weltniveau laufen und weitspringen – das klingt zunächst unglaublich. Doch wenn man die Weitsprungergebnisse der Paralympics in der Wettkampfklasse der Unterschenkelamputierten betrachtet, findet sich Erstaunliches: Der Weitsprungrekord – gehalten von Markus Rehm – liegt mit 8,47 Metern nur 8 Zentimeter unter dem deutschen Rekord nichtbehinderter Sportler. Mehr noch: Bei den deutschen Leichtathletikmeisterschaften 2014 startete Rehm gemeinsam mit den Nichtbehinderten und gewann den Titel. Als Prothesen benutzte er Blattfedern, die aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff bestehen. Ihre C-Form ist von den Hinterläufen des Gepards inspiriert.

Nicht zuletzt der Sieg bei der Deutschen Meisterschaft führte zu einer Diskussion darüber, ob die Unterschenkelprothese möglicherweise sogar Vorteile gegenüber einem natürlichen Bein haben könnte. Tatsächlich können die Blattfedern sehr effizient elastische Energie speichern und abgeben. Überdies haben sie eine geringere Masse als Unterschenkel. Folglich müssen die Oberschenkelmuskeln weniger Arbeit leisten, um die während des Laufens pendelnden Beine permanent zu beschleunigen und abzubremesen. Allerdings sind die Prothesen rein passive Elemente, ihnen fehlt die aktive Rolle von Fuß und Unterschenkel.

Trotz intensiver wissenschaftlicher Untersuchungen ist es bis heute umstritten, ob Federprothesen beim Laufen insgesamt Vor- oder Nachteile gegenüber natürlichen Beinen haben. Markus Rehm jedenfalls arbeitet eng mit der Forschung zusammen, um diese Frage zu beantworten. Gut möglich, dass die Vorteile am Sprungbein durch Nachteile in der Koordination und Symmetrie mehr als ausgeglichen werden. Der Leichtathletikverband hat entschieden, dass Rehm mit Nichtbehinderten starten darf, aber getrennt gewertet wird – seinen Titel aus dem Jahr 2014 wird er also zunächst nicht wiederholen können.



HERZRASEN

▲ Eine 3D-Darstellung der Anatomie des menschlichen Herzens. Das zentrale Organ ist maßgeblich für die Leistungsfähigkeit von Mensch und Tier.

SPORT OHNE HERZ WÄRE UNDENKBAR. ES BEFÄHIGT ERST DEN KÖRPER ZU VERBLÜFFENDEN SPORTLICHEN LEISTUNGEN. WIE KANN DAS HERZ EINE SO LEISTUNGSFÄHIGE UND HALTBARE PUMPE SEIN?

1988 legte die US-Amerikanerin Florence Griffith-Joyner in Indianapolis einen Jahrhundertssprint hin. Bis heute hält ihr Weltrekord über hundert Meter von 10,49 Sekunden mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 34,3 km/h. 2009 drückte der Jamaikaner Usain Bolt in Berlin den Männer-Weltrekord auf 9,58 Sekunden, also 37,6 km/h im Durchschnitt. Dabei erreichte er eine Spitzengeschwindigkeit von fast 45 km/h. Um einen Menschen mit 94 Kilogramm Masse in sechs Sekunden auf diese Geschwindigkeit zu

beschleunigen, ist eine Leistung von 1,2 Kilowatt über diese Zeit notwendig – oder, in der noch immer viel geläufigeren Maßeinheit, 1,6 PS. Diese Energie wird für die kurze Dauer eines Sprints direkt aus schnell erreichbaren Energiespeichern in den Muskeln gewonnen. Nach wenigen Sekunden sind diese aufgebraucht. Für längere Aktivitäten ist Ausdauerleistung gefragt.

Dabei stoßen wir erneut auf verblüffende Ähnlichkeiten mit Maschinen. Grundsätzlich benötigt der Stoffwechsel, der den Muskeln Energie liefert, Sauerstoff – wie ein Verbrennungsmotor. Und wie dieser „verbrennt“ der Körper energiereiche organische Moleküle als Treibstoff: Zucker, Kohlenhydrate, Fette und Proteine.

Der Sauerstoff muss zuerst durch die Lunge in den Körper gelangen. Die Brusthöhle wirkt dabei

► Mit einem einzigen Atemzug können Apnoetaucher über 100 Meter tief tauchen. Ihr Lungenvolumen kann bis zu acht Liter betragen.

wie eine Art Blasebalg, mit der Atemmuskulatur als Antrieb. Im Durchschnitt haben erwachsene Menschen ein Lungenvolumen von 5 bis 6 Litern, von denen pro Atemzug in Ruhe allerdings nur etwas weniger als ein halber Liter ein- und ausgeatmet wird. Männliche Apnoetaucher kommen sogar auf bis zu 8 Liter. Allerdings ändern sich Atemvolumen und Atemfrequenz ganz erheblich, wenn der Körper mehr Leistung abruft. Dann können zwischen 120 und 170 Liter Luft pro Minute geatmet werden statt etwa nur 7,5 Liter.

Für den Sauerstoffaustausch sorgen mehrere hundert Millionen winzige Lungenbläschen. Zusammen bilden sie eine Membranfläche von 50 bis 100 Quadratmetern, was etwa der Fläche einer Wohnung entspricht. Die Membranen – also die Wände der Lunge – sind mit nur 200 Millionstel Meter ungefähr so dünn wie ein Haar. Durch sie wandern Sauerstoffmoleküle aus der Luft ins Blut, dieser Vorgang wird Diffusion genannt. Während eines Atemzugs sinkt der Luftsauerstoffgehalt in der Lunge von 21 auf 16 Prozent, nur ein Viertel des Sauerstoffs schafft es durch die Membran. Den umgekehrten Weg nimmt Kohlendioxid als Abgas des Stoffwechsels.

Auf der anderen Seite der Membranen befinden sich die Blutgefäße des Lungenkreislaufs. Im Blut übernehmen rote Blutkörperchen die Rolle der Sauerstofftransporter. Zoomt man in sie hinein, dann stößt man auf ein großes, grob kugelförmiges Proteinknäuel, das Hämoglobin. Beim Menschen besteht es aus vier Proteinen mit jeweils einer Tasche. In jeder sitzt ein Eisenatom, das ein Sauerstoffmolekül festhalten kann. Dass wir heute die chemische Struktur von Hämoglobin Atom für Atom kennen, verdanken wir Methoden der Physik, die das nächste Kapitel vorstellt.

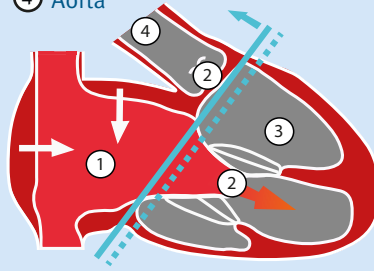
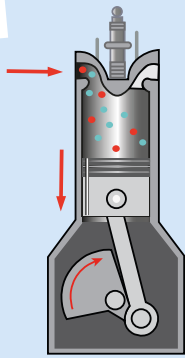
Entscheidend für die körperliche Leistungsfähigkeit ist das Herz. Es ist eine unvergleichlich zuverlässige Pumpe, die den Blutkreislauf im Körper antreibt. Wenn es um die Pumpfrequenz geht, unterliegen Warmblüterherzen einer ähnlichen Gesetzmäßigkeit wie Verbrennungsmotoren: Je größer so ein Motor ist, desto langsamer rotiert seine Kurbelwelle. Kleine Modellflugzeugmotoren erreichen grob hundert Mal höhere Drehzahlen als riesige Schiffsdiesel. Der Kolbenhub,



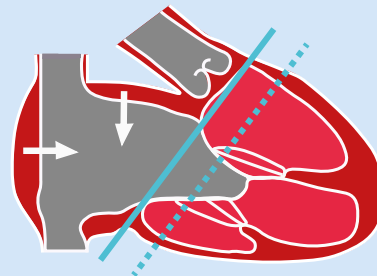
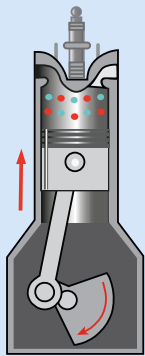


Linkes Herz:

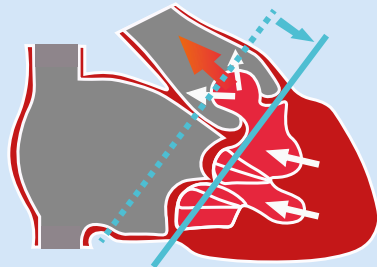
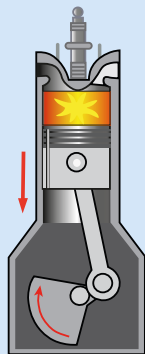
- ① Linker Vorhof
- ② Herzklappen
- ③ Linke Kammer
- ④ Aorta



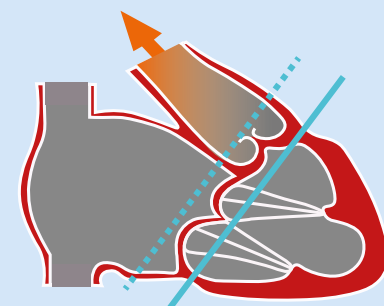
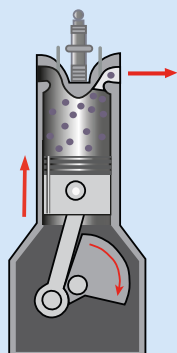
M \\\ Ansaugen des Benzin-Luft-Gemisches in den Zylinder.
H \\\ Blut fließt vom Vorhof in die Kammer.



M \\\ Verdichten des Gasgemisches.
H \\\ Der Druck im Inneren der Herzhöhle erhöht sich.



M \\\ Explosionsartige Verbrennung des Gemisches und Wegdrücken des Kolbens.
H \\\ Die Segelklappen öffnen sich und das Blut strömt aus den Kammern in die Gefäße.



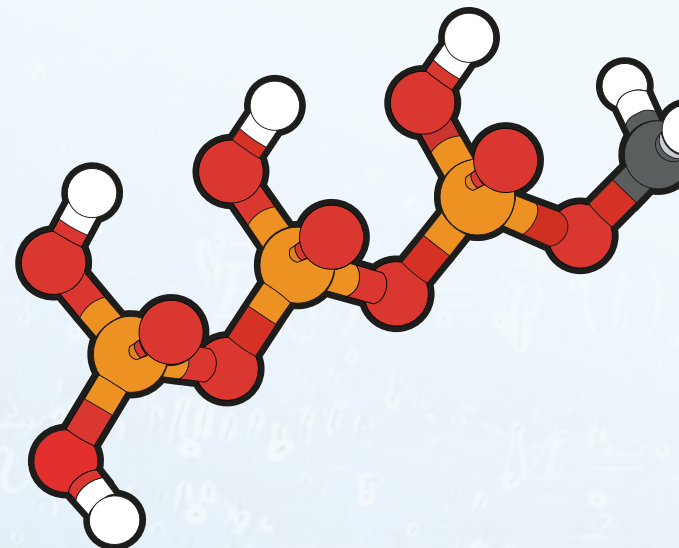
M \\\ Der Kolben schiebt die Gase aus dem Zylinder.
H \\\ Die Herzmuskelzellen erschlaffen, die Herzklappen schließen sich.

also wie weit sich der Kolben im Motor auf und ab bewegt, multipliziert mit der Maximaldrehzahl ergibt für alle Verbrennungsmotoren eine ähnliche Zahl.

Ursache ist die Belastungsgrenze des Materials, hier von Stahl: Der Kolben darf sich bei den maximalen Beschleunigungen im Zylinder nicht zu stark verzerren. Ähnlich ist es bei Warmblüterherzen: Hier ist die Frequenz des Herzschlags multipliziert mit dem Herzdurchmesser eine fast universelle Konstante. Das winzige Herz einer Spitzmaus schlägt in der Minute ungefähr tausend Mal, das eines Blauwals sechs Mal. Auch hier scheinen die Materialeigenschaften des Herzgewebes Grenzen zu setzen. Deshalb schlagen größere Sportlerherzen langsamer als die Herzen Untrainierter: Ausdauersportlerinnen und -sportler haben einen Ruhepuls um 40 Schläge pro Minute, das Herz normal trainierter Erwachsener schlägt in Ruhe etwa 70 Mal pro Minute.

Auch die Funktion der Herzklappen erinnert an Maschinen. Als Ventile sorgen sie dafür, dass das Blut nur in der gewünschten Richtung gepumpt wird. Da Blut genauso wie Wasser nicht zusammendrückbar ist, hört man das schlagartige Schließen der Klappen als Herzschlag. Allerdings pumpt ein Herz das Blut nicht mit stampfenden Kolben, sondern in einer auswringenden Drehbewegung. In der Laufleistung übertrifft es die Technik bei weitem, denn lebendes Gewebe kann sich aktiv an Belastungen anpassen und selbst reparieren. Für Säugetiere gilt die Faustregel, dass das Herz ungefähr eine Milliar-

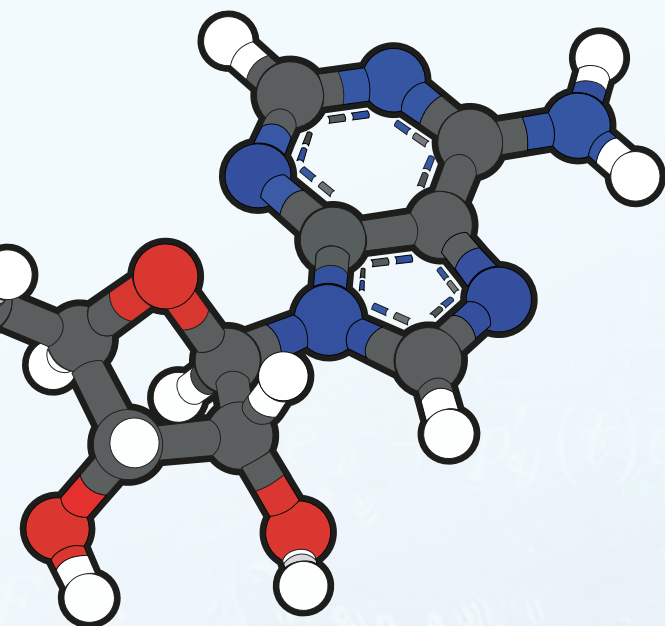
◀ Natürliche und mechanische Maschine: Herz- (H) und Motoraktivität (M) lassen sich in vier Phasen einteilen, wobei die Funktionsweise natürlich nicht ganz deckungsgleich ist.



► Je größer ein Tier ist, desto kräftiger sind seine Knochen im Vergleich zur Länge. Hier in ungefähr gleich großer Darstellung das Bein eines Tyrannosaurus rex (links) und das eines Huhns (rechts). T. rex wog geschätzt 5 bis 7 Tonnen, ein Haushuhn wiegt nur wenige Kilogramm.

de Mal in der Lebenszeit schlägt – bei Menschen sind es sogar drei Milliarden Mal!

Herz- und Skelettmuskeln gehören zur sogenannten quergestreiften Muskulatur: Sie bestehen aus Fasern, die sich zusammenziehen und Arbeit leisten können. Die benötigte Energie kommt aus der Nahrung, die der Stoffwechsel in mehreren Stufen in sogenanntes Adenosintriphosphat (ATP) umwandelt. Das passiert in den Kraftwerken der Zellen, den Mitochondrien. Das energiereiche ATP ist der universelle Treibstoff im Körper. Ein arbeitender Muskel erhält ATP aus verschiedenen „Tanks“. Der schnellste Lieferant ist das Kreatinphosphat im Muskel. Es kann ATP aber nur für wenige Sekunden abgeben. Als nächste Stufe startet die für den Sprint wichtige anaerobe Glykolyse. Sie wandelt den Zucker Glukose ohne Sauerstoff in Milchsäure (Lactat) und ATP um. Glukose ist in Form von Glykogen in Muskeln und der Leber gespeichert. Ab etwa einer Minute Ausdauersport laufen Prozesse an, die Sauerstoff aus der Lunge benötigen. Sie „verbrennen“ Glukose und Fettsäuren zu Wasser und Kohlendioxid und produzieren dabei besonders viel ATP. Diese aeroben Prozesse sind der Schlüssel für die Ausdauerleistung des Menschen.



INFO

KNOCHENARBEIT

Knochen sind höchst lebendige Organe. Und sie faszinieren seit langem die Physik. Galileo Galilei befasste sich bereits mit der Frage, warum zum Beispiel die Beinknochen großer Tiere wesentlich dicker im Vergleich zur Länge sind, als die zierlichen Gegenstücke kleiner Tiere. Das liegt daran, dass die Masse eines Tiers mit seinem Volumen enorm zunimmt. Daher sehen Knochen eines Elefanten viel gedrungener aus als die einer Maus. Knochen passen sich Belastungen an – wer viel trainiert, stärkt sie.

Für die Bionik, die von den effizienten Lösungen der Natur lernen will, sind Knochen höchst interessant. Die Gelenkteile der langen Knochen in Armen und Beinen sind zum Beispiel innen mit einer Art Hartschaum gefüllt: Diese „Trabekel“, feine Knochenverästelungen, bilden ein komplexes Tragwerk, das lebt und aktiv auf Kräfte reagieren kann. Mit dieser Eigenschaft könnte eine Brücke ihre Traglast allmählich einem erhöhten Verkehrsaufkommen anpassen. An Knochen kann man daher auch ablesen, was ein Mensch trainiert. Skelette römischer Gladiatoren mit einseitig langen, kräftigen Armknochen verraten sie als Schwertkämpfer.

◀ Stäbchenmodell der räumlichen Struktur von Adenosintriphosphat (ATP). Grau steht für Kohlenstoff, weiß für Wasserstoff, rot für Sauerstoff, blau für Stickstoff, orange für Phosphor.



RÖNTGENBLICK UND HEILENDE STRAHLEN

▲ Bestrahlungsplatz am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum HIT, das von BMBF und Uniklinikum Heidelberg gemeinsam aufgebaut wurde. Der Patient wird auf einem Bestrahlungstisch gelagert, der von einem computergesteuerten Roboter exakt eingestellt wird. Eine Kunststoffmaske dient der Fixierung während der Bestrahlung.

SEIT DER ENTDECKUNG DER RÖNTGENSTRAHLUNG HAT DIE PHYSIK DIE MEDIZIN UM VIELE METHODEN BEREICHERT. SPORTVERLETZUNGEN UND VIELE ERKRANKUNGEN SIND SO BESSER DIAGNOSTIZIERBAR GEWORDEN UND LASSEN SICH BESSER HEILEN.

Bewegung beim Sport – das ist in den vorigen Kapiteln deutlich geworden – ist immer mit großen Kräften auf Knochen, Sehnen und Muskeln verbunden. Dabei kommt es leider zuweilen auch zu Verletzungen, obwohl Sport treiben an sich natürlich für den Organismus insgesamt sehr empfehlenswert ist. Mit physikalischen Methoden können Ärztinnen und Ärzte Verletzungen seit über hundert Jahren nicht nur ertasten, sondern sichtbar machen: Röntgenstrahlung durchdringt nämlich

das weiche Gewebe und wird nur von den Knochen zurückgehalten, die dann auf Aufnahmen im Röntgenlicht sichtbar werden. Wenn man noch genauer hinschaut, lassen sich auch Sehnen und andere Strukturen erkennen. Die Röntgengeräte von heute haben nach einem Jahrhundert der Entwicklung mit den alten, auf chemischen Fotoplatten basierenden Geräten so viel gemeinsam, wie die Kamera eines modernen Smartphones mit einer Plattenkamera aus dem vorletzten Jahrhundert. Mit Computertomografen kann man nicht nur zweidimensionale Bilder einmal quer durch den Körper gewinnen, sondern in drei Dimensionen hochaufgelöst kleinste Verletzungen erkennen.

Neben reichlich Rechenleistung in den Bildverarbeitungscomputern verdankt die heutige Technik ihre Leistungsfähigkeit auch hochempfindlichen Detektoren. Wie die Kamerasensoren in Digitalka-

meras sind sie aus einzelnen Bildpixeln aufgebaut. Die Pixel reagieren allerdings nicht auf sichtbares Licht, sondern auf die viel kurzwelligere Röntgenstrahlung. Neben der leichten Auslesbarkeit der Daten und der Bildschärfe ist ein wesentlicher Vorteil der digitalen Röntgendetektoren, dass sie mit weniger Röntgenstrahlung auskommen, um ein Bild zu produzieren. Damit wird der zu untersuchende Organismus wesentlich weniger als früher durch die Strahlung belastet.

Die Technik dieser modernen Röntgendetektoren stammt aus der Kern- und Elementarteilchenphysik. Deren Teilchenbeschleuniger stehen in Deutschland meist in den großen Forschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren. Die Grundlagenforschung, wie sie dort betrieben wird, ist die Wiege für bahnbrechende Ideen, für die Medizin und viele technische Anwendungsfelder. Allein der Bund fördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung die Grundlagenforschung an solchen Großgeräten mit jährlich fast 1,2 Milliarden Euro.

Etwas komplizierter als die Bildaufnahme mit Röntgenstrahlung ist die Magnetresonanztomografie (MRT), die ohne die belastenden Strahlen dreidimensionale Bilder des Körpers liefern kann. Sie entwickelte sich über viele Beiträge aus Chemie, Physik und Medizin. Den Anfang machte die Physik mit der Entdeckung, dass bestimmte Atomkerne kleine Magnete sind. Die Voraussetzung dafür ist, dass der Kern einen „Kernspin“ hat – einen quantenmechanischen Magnetkreis. Im Fokus der MRT stehen die Kernspins der Wasserstoffatome, weil Wasser überall im Körper vorhanden ist. Typisch für MRT-Geräte ist der große supraleitende Ring, in den ein Patient geschoben wird. Sein starkes Magnetfeld richtet die Kernspins im Körper wie winzige Kompassnadeln in eine Richtung aus. Bei einer Aufnahme kippt eine Radioantenne mit einem elektromagnetischen Sendesignal die Wasserstoff-Kernspins aus ihrer Ruhelage im Magnetfeld. Anschließend kehren sie wieder in diese Ruhelage zurück. Dabei senden sie selbst ein Radiosignal aus, das die Antenne empfängt. Dieses Signal enthält Informationen über das umgebende Gewebe am Ort des Kernspins. Weitere überlagerte Magnetfelder sorgen dafür, dass der Ursprungsort eines Signals eindeutig lokalisierbar ist. Daraus errechnet der Computer dann die Bilder.

Auch die Geschichte der MRT erinnert an diejenige von Fotografie und Film. Genau wie die ersten

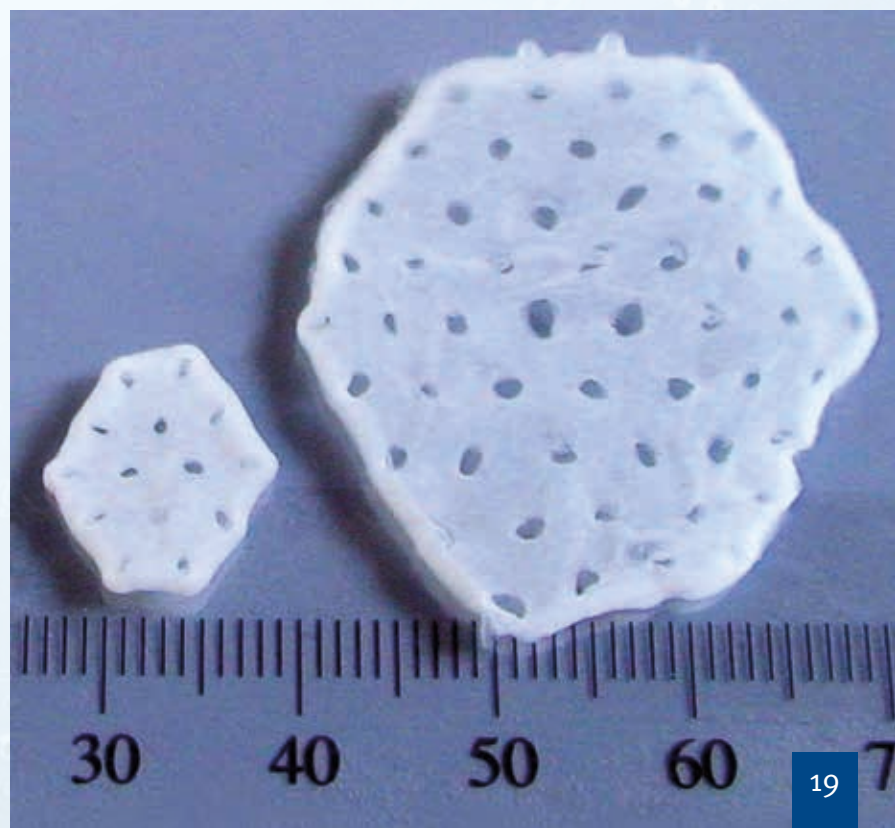


◀ Wilhelm Conrad Röntgen entdeckte 1895 im kurzwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums die später nach ihm benannten Röntgenstrahlen. Eine seiner ersten Aufnahmen war die Hand seiner Frau.

fotografischen Aufnahmen viel Zeit benötigten, brauchte eine einzige MRT-Aufnahme anfangs bis zu 20 Minuten. Erst das von einem Göttinger Physikteam erfundene Flash-Verfahren konnte die Aufnahmezeit massiv verkürzen. Einfach gesagt, kickt es die Kernspins nur ein kleines bisschen an. Sie kehren damit schneller wieder in ihre Ruhelage und reduzieren so die Wartezeit bis zum nächsten Bild. Heute ist das Flash-Verfahren medizinischer Standard. In der gleichen Zeit, in der früher nur ein Einzelbild aufgenommen wurde, gelingen damit heute ganze dreidimensionale Rekonstruktionen. Wie beim Sprung vom Einzelbild in der Fotografie zum Bewegtbild im Film trieb das Göttinger Team die Technik voran, sodass hochaufgelöste Echtzeitvideos aus dem Körper möglich sind. Mit der dynamischen MRT lässt sich zum Beispiel der Herzschlag im Livevideo untersuchen.



▼ Das Herzpflaster in zwei Größen. Es soll verloren gegangenes Herzmuskelgewebe ersetzen und damit das Herz stärken.



Erst mit solchen diagnostischen Möglichkeiten lässt sich ein weiteres großes Forschungsprojekt angehen, in dem die Physik Hand in Hand mit der Medizin arbeitet. Ziel ist die Entwicklung eines „Herzpflasters“. Nach einem Herzinfarkt, dem Verschluss einiger feiner Blutgefäße, die den Herzmuskel versorgen, bleibt vernarbtes Muskelgewebe zurück. Es kann sich nicht mehr richtig zusammenziehen, weshalb die Pumpleistung des geschädigten Herzens sinkt. Auch sportliche Überbelastung kann ähnliche Schäden verursachen. Das Herzpflaster soll nun diese schadhafte Stellen mit gesundem Muskelgewebe überbrücken, welches aus Stammzellen gezüchtet wird.

Allerdings sorgt beim gesunden Herzen eine komplexe Choreografie der einzelnen Muskelpartien für die Pumpbewegung. Deshalb muss das Herzpflaster exakt an das geschädigte Muskelgewebe angepasst sein. Dazu wird das Patientenherz zuerst während des Herzschlags mit bildgebenden Verfahren wie Computertomografie, Ultraschall oder dynamischer MRT durchleuchtet. Danach wird ein virtuelles Modell erstellt. Das zeigt, wie beim Pumpen das Blut durch die Herzkammern strömt. Ein Physikteam forscht an der Simulation der komplexen Strömungsmuster. Die Simulation soll der Chirurgie

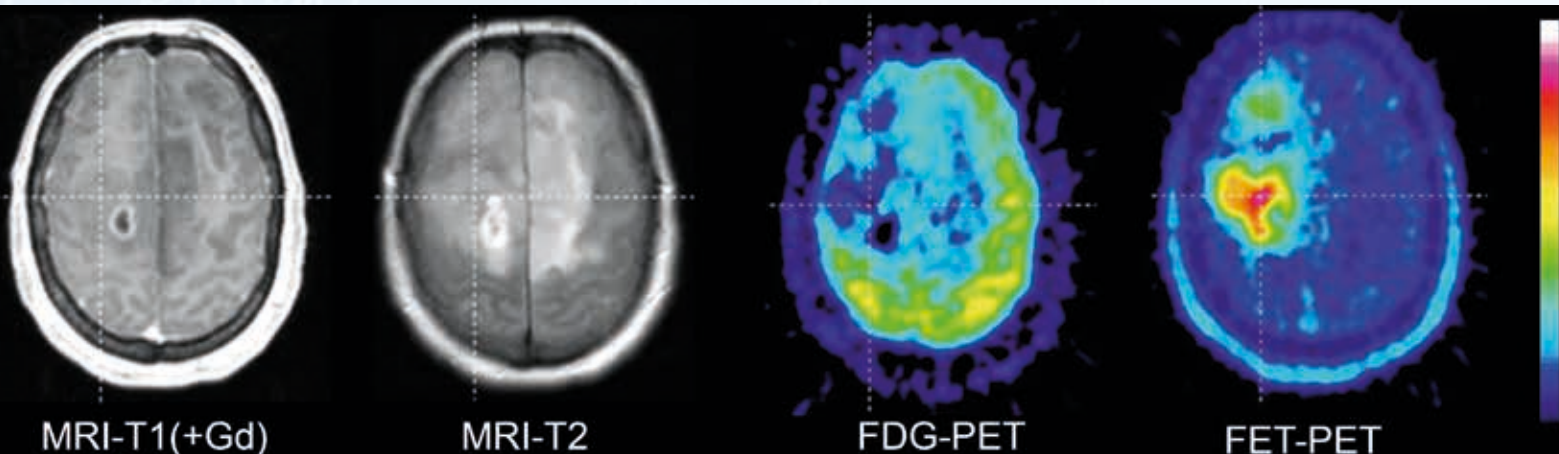
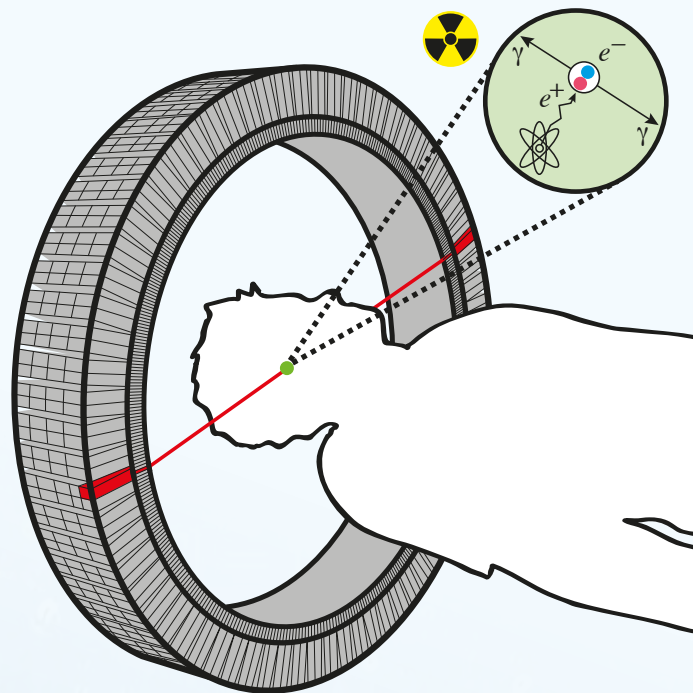
am virtuellen Modell zeigen, wie das Herzpflaster konstruiert und angebracht werden muss, damit das Herz wieder effizient pumpt.

Aus der schon zuvor angesprochenen Grundlagenforschung mit Großgeräten ist die Positronen-Emissions-Tomografie (PET) hervorgegangen. Bei ihr werden Patienten Markierungssubstanzen gespritzt, die ein leicht radioaktives Element, zum Beispiel Fluor-18, enthalten. Diese Marker sammeln sich in Tumoren, die sich durch eine besonders hohe Stoffwechselrate auszeichnen. Dort zerfallen die radioaktiven Elemente und senden dabei schwache Gammastrahlung aus. Diese wird von Halbleiterdetektoren wie in der Computertomografie (CT) aufgenommen. PET wird oft mit CT oder MRT kombiniert, um genaue Bilder von der Lage eines Tumors im Gewebe zu gewinnen.

Aus der Physik könnte künftig auch eine Alternative zu radioaktiven Markern kommen. Dabei werden dem Körper winzige Magnetpartikel zugeführt. Sie basieren auf einer Eisenverbindung, die der Stoffwechsel problemlos abbauen kann.

▼ Mittels MRT ist es häufig schwierig, Tumore von unspezifischen Gewebsveränderungen abzugrenzen (Aufnahmen 1 und 2). Die PET bietet hier wesentliche Zusatzinformationen. Da der Glukose-Stoffwechsel im Tumorbereich vermindert ist (Bild 3), erlaubt die FET-PET (Bild 4) eine klare Darstellung des Tumorgewebes.

► Ein PET-Scanner kann den Weg einer verabreichten Substanz im Körper exakt verfolgen und Strahlung, die der Körper abgibt, messen. Die Substanz emittiert Positronen (e^+). Bei der Wechselwirkung eines Positrons mit einem Elektron im Körper (e^-) werden zwei hochenergetische Photonen (γ) in genau entgegengesetzte Richtungen ausgesandt. Das PET-Gerät enthält viele ringförmig um den Patienten angeordnete Detektoren für die Photonen. Das Prinzip der PET-Untersuchung besteht darin, das gleichzeitige Auftreten zweier Ereignisse an gegenüberliegenden Detektoren aufzuzeichnen. Aus diesen Ergebnissen werden im Anschluss Schichtbilder erstellt, aus denen ein Computer ein räumliches 3D-Bild erstellen kann.



Diese Magnetpartikel reichern sich als Marker im Tumorgewebe an. Wie beim MRT lassen sie sich über Magnetfelder orten. Daraus kann der Computer ein dreidimensionales Bild von der Lage eines Tumors errechnen. Magnetfelder können überdies solche Partikel gezielt an bestimmte Stellen im Körper transportieren. Als winzige Kapseln könnten sie zum Beispiel ein Medikament zu einem erkrankten Organ bringen.

INFO

HIRNTUMOR UNTER BESCHUSS

Für den Dortmunder Fußballprofi Heiko Herrlich war es eine schockierende Nachricht. Im Herbst 2000 fand man bei ihm einen bösartigen Hirntumor. Zum Glück konnte er geheilt werden – mit Strahlentherapie. Viele Hirntumore können heute mit einer Kombination aus Bestrahlung und Chemotherapie erfolgreich bekämpft werden. Meist werden Röntgenstrahlen eingesetzt, zudem kurzwelligere Gammastrahlung.

Alle diese Methoden haben aber den Nachteil, dass die Bestrahlung auch das gesunde Gewebe belastet. Diese Belastung vermeidet die sogenannte Ionenstrahlentherapie weitgehend. Sie stammt aus der Teilchenphysik, entwickelt hat sie maßgeblich das GSI Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt zusammen mit medizinischen Forschungseinrichtungen in Dresden, Marburg und Heidelberg. Für die Entwicklung der im Routinebetrieb einsetzbaren Ionenbeschleunigeranlage am Universitätsklinikum Heidelberg war die Erfahrung aus der Entwicklung von Teilchenbeschleunigern für die Grundlagenforschung eine wichtige Voraussetzung. Nur durch diese Expertise konnte in Zusammenarbeit auch mit industriellen Partnern diese weltweit führende Anlage zur Tumorbehandlung errichtet werden.

Bei der Ionenstrahltherapie schießt ein kleiner Teilchenbeschleuniger einen feinen Strahl aus elektrisch geladenen Atomen – Ionen – in den Tumor hinein. Verwendet werden Atomkerne von Wasserstoff (Protonen), von Kohlenstoff oder sogar von Antiwasserstoff. Solche Ionen haben den Vorteil, dass sie zunächst durch Gewebe fliegen, ohne größere Schäden zu verursachen, bis sie fast schlagartig abbremsen. Dort platzieren sie weitgehend ihre Energie und zerstören Zellen.



Wie weit die Ionen durch das Gewebe fliegen, lässt sich sehr genau über ihre Energie steuern. Deshalb kann man mit Ionenstrahlen sehr genau auf den Tumor zielen und ihn präzise abstrahlen. Dazu dient neben Bestrahlungstischen für direkte Ionenstrahlen die weltweit einzigartige, in sechs Achsen einstellbare sogenannte Gantry am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum (HIT). Die Gantry im HIT ist eine gigantische Konstruktion aus Stahl: Sie ist 25 Meter lang, im Durchmesser 13 Meter groß und wiegt 670 Tonnen, wovon 600 Tonnen mit Submillimeterpräzision drehbar sind. Die Gantry arbeitet sehr präzise: Der Strahl erreicht den Patienten mit bis zu drei Vierteln der Lichtgeschwindigkeit, kann bis zu 30 Zentimeter ins Gewebe eindringen und weicht dennoch höchstens einen Millimeter vom Ziel ab. Die Technik für die Bewegung des Giganten kommt dabei aus der Raumfahrtindustrie.

▲ Gigantische Gantry: Die weltweit einmalige Konstruktion aus Stahl ist 670 Tonnen schwer, 25 Meter lang, 13 Meter im Durchmesser und drei Stockwerke hoch.



REISE IN DIE MOLEKULARE WELT DES KÖRPERS

▲ Aktinfilamente dienen der strukturellen Gestalt und Stabilität einer Zelle. Auch bei der Zellteilung und Zellbeweglichkeit spielen sie eine wichtige Rolle. Die unterschiedlichen Farben deuten bei dieser Visualisierung verschiedene Schichten an.

DIE „SUPERMIKROSKOPE“ DER PHYSIK ERMÖGLICHEN EINEN SCHARFEN BLICK IN DIE MOLEKULARE WELT DES KÖRPERS. SIE BASIEREN AUF TEILCHEN- BESCHLEUNIGERN.

Unsere Skelettmuskulatur besitzt verschiedene Typen von Muskelfasern mit unterschiedlichen Eigenschaften. Im Mikroskop sehen diese Muskelzellen quergestreift aus. Es gibt langsame Muskelfasern (Typ I) und schnelle Muskelfasern (Typ II). Eine Spezialisierung auf Sprint trainiert vor allem die Typ-II-Fasern. Sie sind sozusagen die Rennmotoren der Muskulatur, die Energie für ihre Arbeit liefern zwei Prozesse, die für einen kurzen Zeitraum ohne Sauerstoff auskommen. Die Verfügbarkeit ihrer Energieträger begrenzt die Sprintdauer auf 10 bis 20 Sekunden, danach müssen sie langsam neu gebildet werden. Bei Ausdauer-

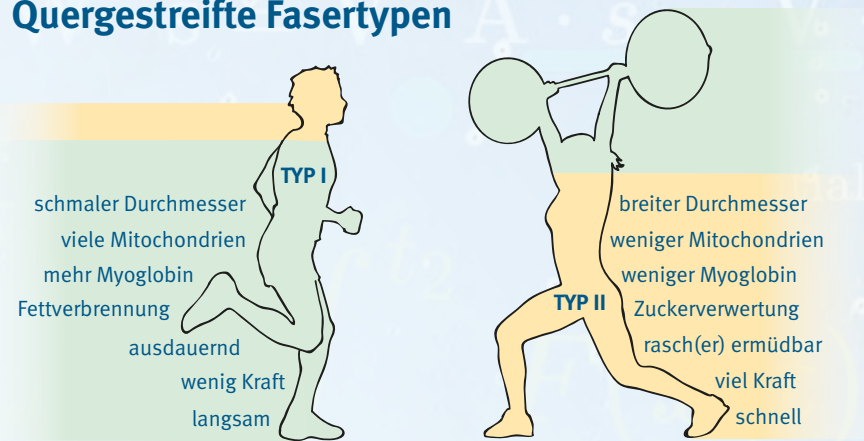
sportarten sind hingegen die langsameren Typ-I-Fasern gefragt. Sie können zwar nicht so viel Kraft entfalten wie die Typ-II-Fasern, halten dafür aber viel länger durch. Ihr Energielieferant sind die aeroben Stoffwechselprozesse, also solche, für die wir den Sauerstoff aus der Luft benötigen. Sie ermöglichen die große Ausdauerleistungsfähigkeit des Menschen. Aber was erzeugt die Kraft in den Muskeln?

Auf der Suche nach einer Antwort müssen wir in die Muskelfasern hineinzoomen, und hierfür brauchen wir Physik. Denn sobald man versucht, in den molekularen Maschinenraum lebender Zellen hineinzublicken, landet man bei Methoden der physikalischen Grundlagenforschung. Man kann nämlich nicht einfach ein Stück Muskelgewebe unter ein herkömmliches Lichtmikroskop legen und die Vergrößerung beliebig erhöhen. Dabei

würde längst alle Information aus dem Bild verschwinden, bevor das Mikroskop einzelne Atome im Molekül optisch auflösen kann. Das liegt daran, dass die Wellenlänge von sichtbarem Licht mit einigen Hundert Nanometern (Millionstel Millimeter) viel zu lang ist im Vergleich zur Größe von Atomen, die mit Zehntelnanometern Durchmesser grob tausend Mal kleiner sind. Das wäre so, als würde man versuchen, mit einem Boxhandschuh die Noppen auf einer Lego-Platte zu ertasten. Will man aber die Funktion von Biomolekülen in Zellen entschlüsseln, dann muss man deren chemische Struktur Atom für Atom aufklären. Also braucht man dazu eine passende kurzwellige Strahlung. Die Natur bietet dafür grundsätzlich zwei verschiedene Strahlungsarten an: Elektronen, mit denen Elektronenmikroskope arbeiten, und extrem kurzwellige Röntgenstrahlung.

Mit Röntgenstrahlen wurde unter anderem der molekulare Antrieb enträtselt, mit dem sich quergestreifte Muskelzellen zusammenziehen (kontrahieren). Zuständig für diese Kontraktion ist ein Grundbaustein der Muskelzellen, das Sarkomer. Das ist ein wenige Mikrometer (Tausendstel Millimeter) kurzes, röhrenartiges Gebilde. In ihm arbeiten die Proteine Aktin und Myosin. Sobald der Muskel ein entsprechendes Nervensignal erhält, ziehen viele dieser beiden Moleküle das Sarkomer zusammen. Eine weitere wichtige Rolle spielt ein Protein namens Titin im Sarkomer. Mit Computersimulationen konnte die Biophysik zei-

Quergestreifte Fasertypen



gen, dass es einen molekularen Sensor enthält, der bei hoher Belastung mutmaßlich Muskelwachstum auslöst.

Das Bild, wie Sarkomere funktionieren, wurde über viele Zellen in Gewebeproben gemittelt gewonnen. Allerdings verrät es zum Beispiel nicht, wie der Antrieb ganz genau in einer einzelnen Muskelzelle verankert ist. Das will ein deutsches Biophysikteam herausbekommen. Dazu entwickelt es eine Methode, einzelne Herzmuskelzellen mit einem superfeinen Strahl aus Röntgenlicht abzurastern. Das Verfahren soll sogar mit lebenden Zellen funktionieren. Diese Forschung gehört ebenfalls zum Herzpflaster-Projekt, das wir im vorigen Kapitel kennengelernt haben.

Solche und viele andere Forschungsprojekte werden beispielsweise am Synchrotron Petra III

▲ Grundsätzlich verfügt der Mensch über zwei Arten von quergestreiften Muskelfasern. Abhängig von den Anforderungen ihrer Sportart trainieren Spitzensportler eher die eine oder die andere Gruppe.

▼ Gewichtheben:

$$W = F \cdot s$$

W: Arbeit, Energie

F: Kraft

s: Strecke

Wenn ein Gewichtheber ein Gewicht von 100 Kilogramm um 2 Meter anhebt, ist dafür eine Energie von rund 2000 Newtonmeter = 2 Kilojoule nötig.

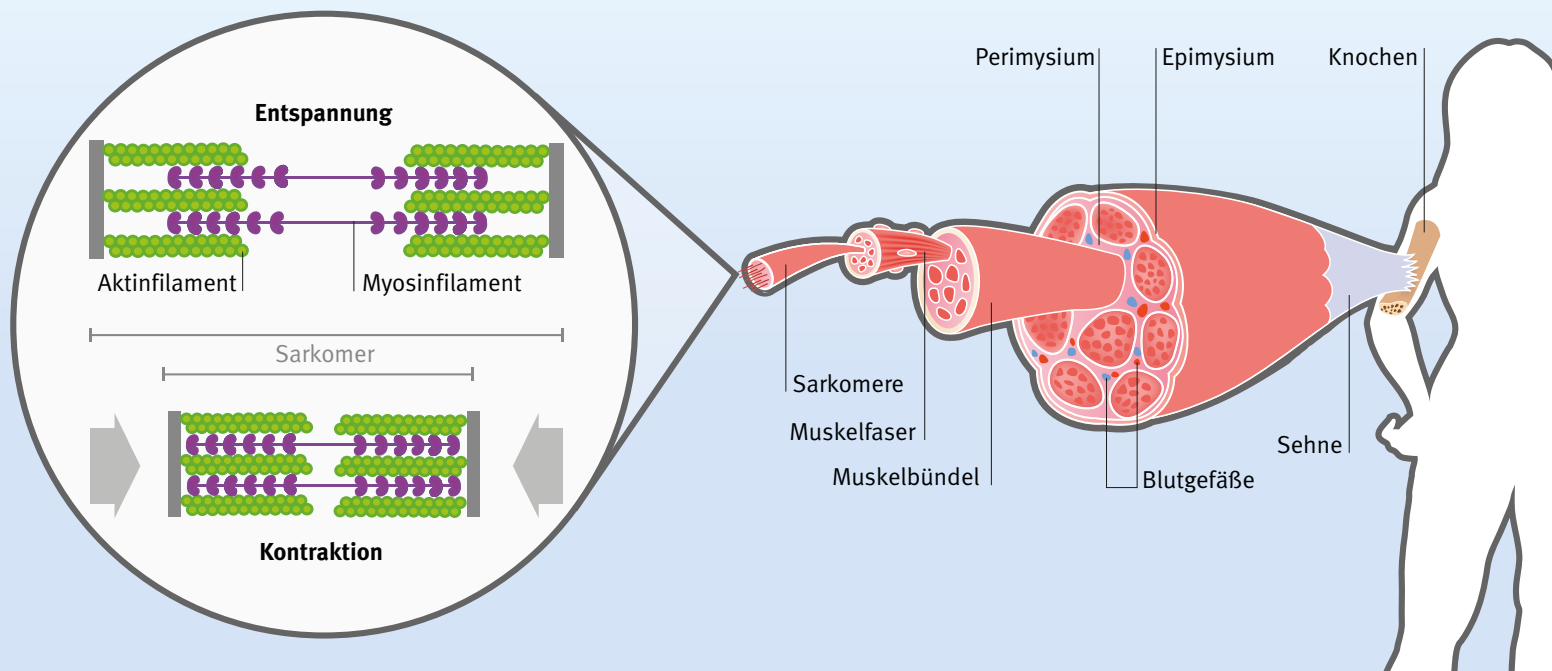
◀ Geschafft. Nach tausenden Kilometern Strecke erreichen die Fahrer der "Tour de France" den Zielort Paris. Bei Ausdauersportarten sind vor allem Fasern des Typs I gefragt, wenn gleich kurz vor dem Ziel die Sprinter ihren Vorteil aus der Typ-II-Muskulatur abrufen.





▼ Die kleinste funktionelle Einheit der Skelettmuskulatur ist das Sarkomer, das sich aus Aktin- und Myosinfilamenten bildet. Durch das Ineinanderschieben dieser Filamente entsteht die Kontraktion (Verkürzung) der Muskulatur. Im weiteren Aufbau bilden

mehrere Muskelfasern ein Primärbündel, das wiederum von einem Bindegewebe umhüllt ist, dem Perimysium. Umschlossen werden diese von einer Muskelfaszie, dem Epimysium, welche den Muskel bildet.

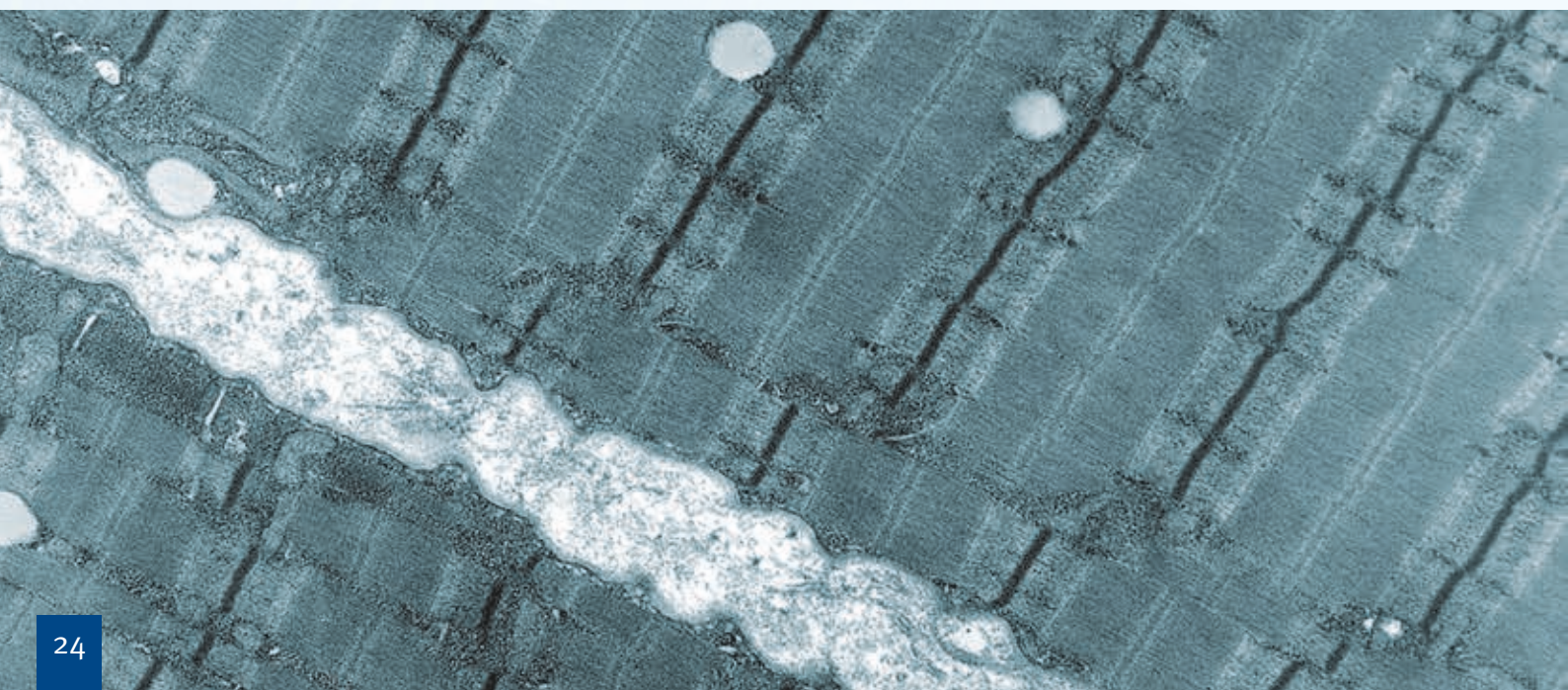


▼ Einblicke dank Groß-
geräteforschung: Muskel-
fibrillen im Elektronen-
mikroskop.

durchgeführt, einer der weltweit leistungsfähigsten Anlagen ihrer Art. Petra III befindet sich in Hamburg und ist eine Einrichtung des Deutschen Elektronensynchrotrons DESY, eines Forschungszentrums der Helmholtz-Gemeinschaft. Petra III kann einen sehr dünnen Strahl aus hochbrillanter Röntgenstrahlung erzeugen, der sich zum Abrastern biologischer oder materialwissenschaftlicher Proben eignet. Ein Synchrotron ist ein Ringbeschleuniger, in dem elektrisch geladene Teilchen, in der Regel Elektronen, in einer Vakuumröhre kreisen. Sie werden bis fast auf Lichtgeschwindigkeit gebracht. Die permanente Be-

schleunigung in der Kurvenfahrt zwingt sie, Energie in Form von Synchrotronstrahlung auszusenden. Bei modernen Synchrotronen wird dies noch durch besondere magnetische Elemente, sogenannte Undulatoren, verstärkt, die die Elektronen gezielt auf Slalombahnen bringen.

Mit einem Synchrotron konnte zum Beispiel das Team der Chemie-Nobelpreisträgerin Ada Yonath die Struktur des Ribosoms präzise aufklären – ein Teil der Arbeiten fand in Hamburg statt. Das Ribosom liest in der Zelle die genetische Information





des Erbgutmoleküls DNS aus. Mit diesem Wissen, so die Hoffnung der Forschenden, kann eine neue Generation von Antibiotika entwickelt werden. Diese sind dann chemisch so designt, dass sie die Ribosomen von gefährlichen Bakterien blockieren können. Heute heißt eine der Experimentierhallen von Petra III „Ada-Yonath-Halle“.

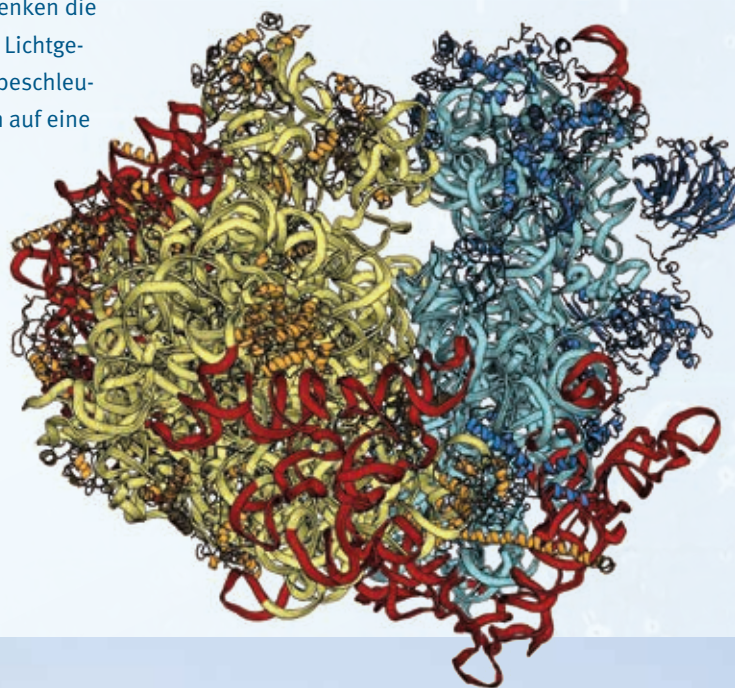
Besonders brillant ist das Licht des European XFEL, der am 1. September 2017 in der Metropolregion Hamburg in Betrieb ging. Er ist der derzeit stärkste Röntgenlaser der Welt (siehe nächste Doppelseite). Elf Länder haben ihn ab 2009 als internationales Gemeinschaftsprojekt gebaut. Von den Baukosten von 1,22 Milliarden Euro trägt Deutschland 58 Prozent, aufgeteilt zwischen dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hamburg und Schleswig-Holstein. Russland übernimmt 27 Prozent, die anderen internationalen Partner steuern zwischen ein und drei Prozent bei.

Der European XFEL kann extrem detailscharfe Momentaufnahmen des atomaren Aufbaus von Molekülen liefern. Damit kann man die Funktion von Biomolekülen in lebenden Zellen entschlüsseln, chemische Reaktionen „filmen“ und Materialien untersuchen. Er bietet weltweit einzigartige Forschungsbedingungen für Biowissenschaften, Chemie, Materialwissenschaften, Medizin und Materialforschung. Teams aus aller Welt melden sich in Hamburg an, um am European XFEL forschen zu können.

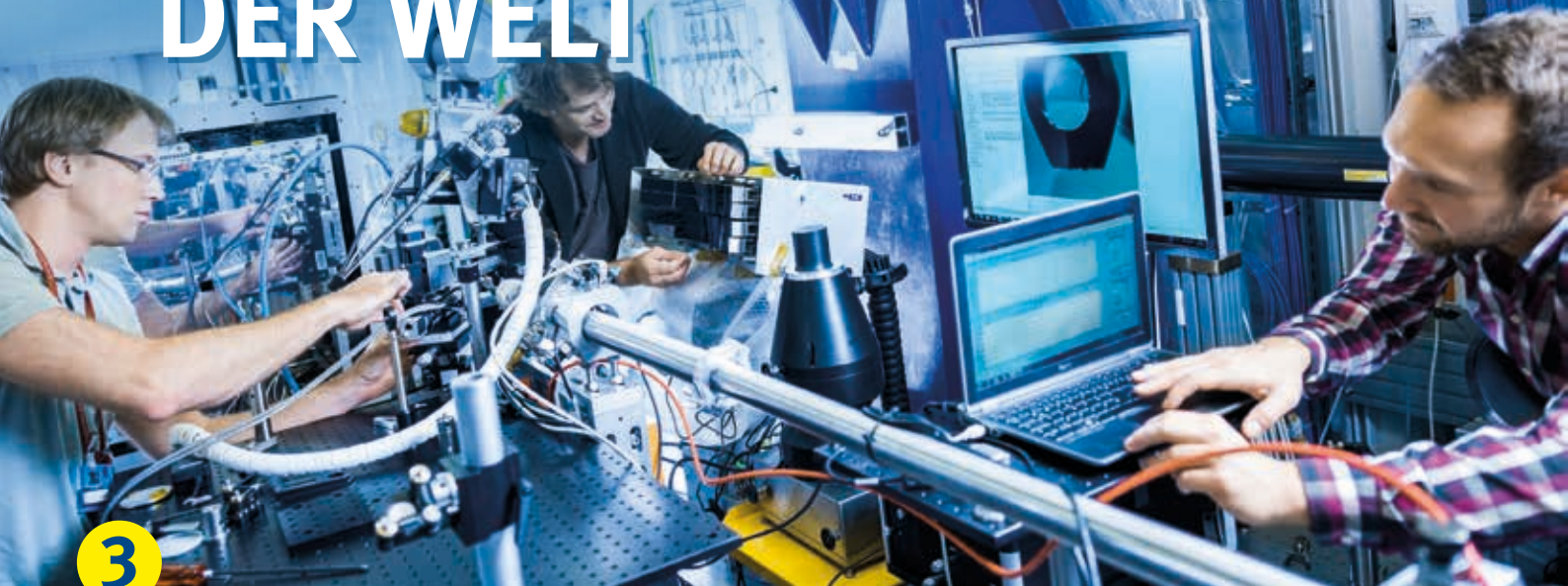
► Ada Yonath, israelische Nobelpreisträgerin, vor einer nach ihr benannten Experimentierhalle von PETRA III. Die Strukturbiologin führte am DESY wichtige Arbeiten zu Ribosomen durch.

▲ Das Strahlrohr von PETRA III zwischen den Magneten eines Undulators (oben und unten). Magnetfelder lenken die auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Teilchen auf eine Kreisbahn.

▼ Ribosomen sind die Proteinfabriken der Zellen – und selbst hoch komplexe Biomoleküle.

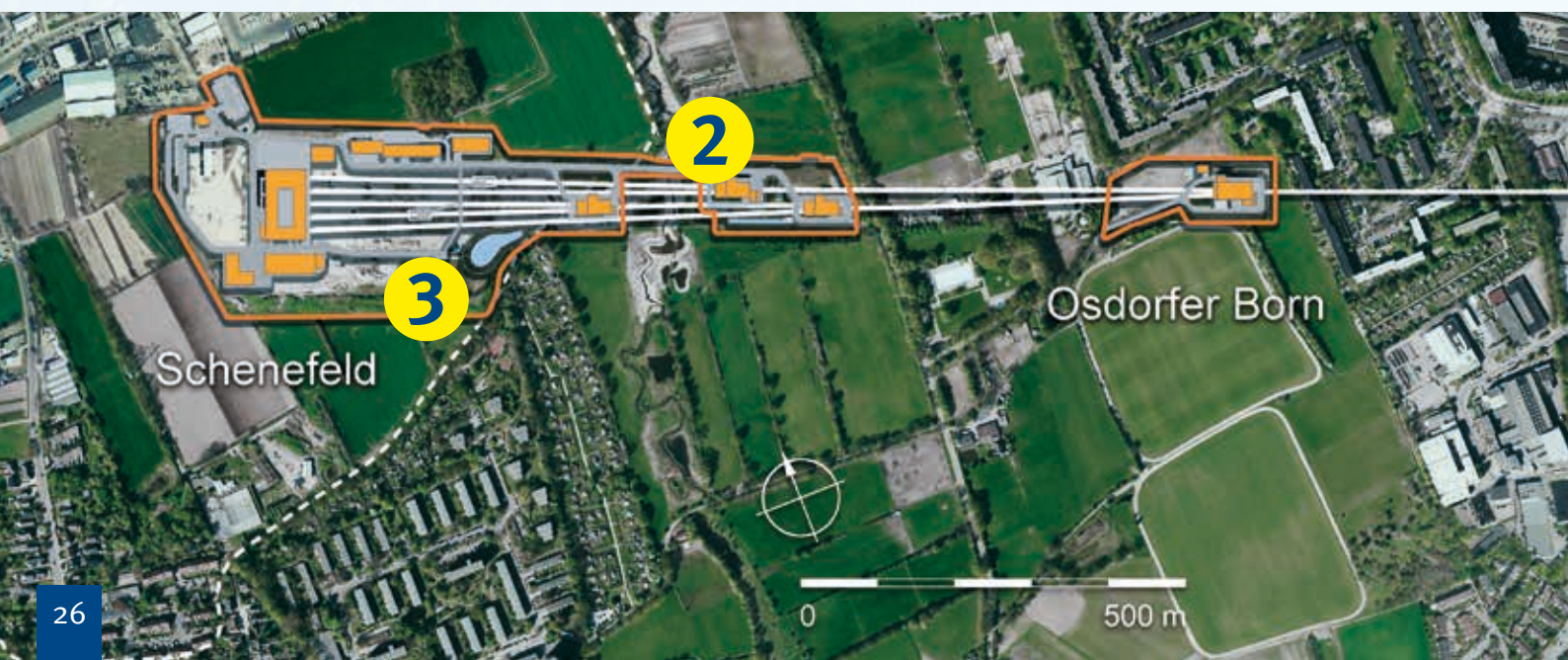


DER STÄRKSTE RÖNTGENLASER DER WELT

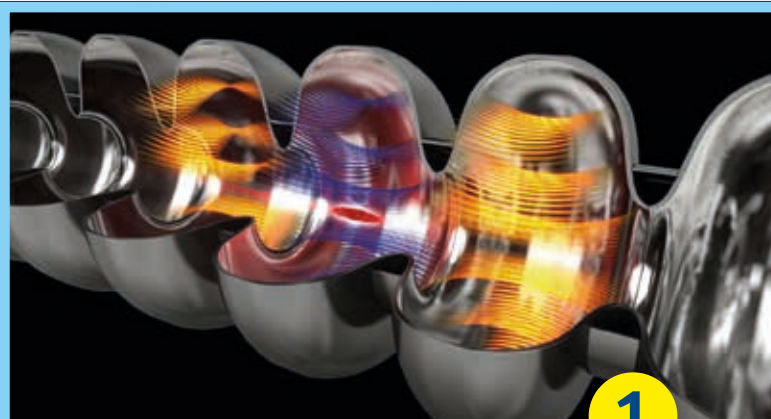
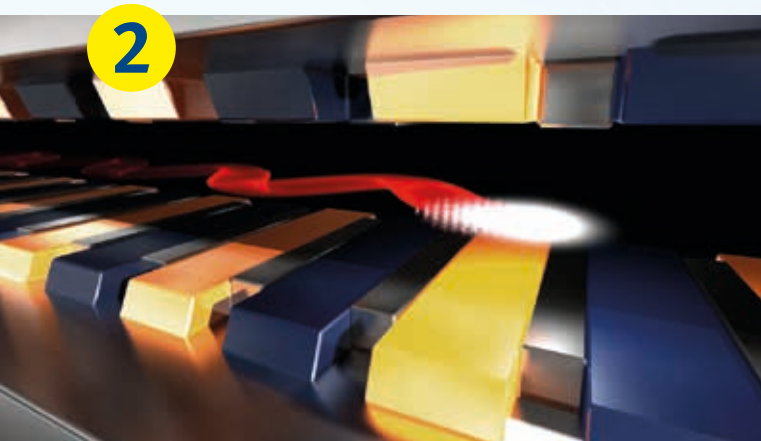
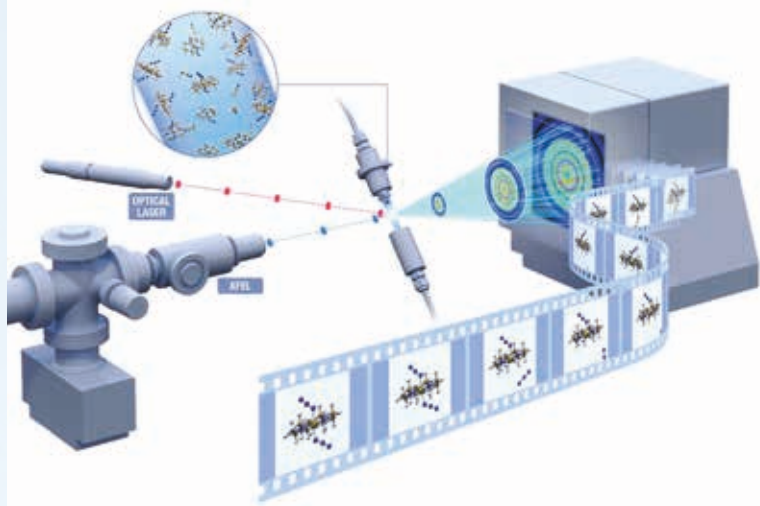


3
Tausende Wissenschaftler haben auf das Datum hingefiebert: Am 1. September 2017 wurde der weltweit stärkste Röntgenlaser, der European XFEL, eröffnet. Die Großforschungsanlage in der Metropolregion Hamburg, die zurzeit sechs Messplätze für die atomgenaue Untersuchung am Ende eines 3,4 Kilometer langen Elektronenbeschleunigers bietet, wird Materialwissenschaften, Pharmazie, Chemie, Physik, Nanowissenschaften und viele weitere Bereiche auf ein neues Niveau heben. Laserlicht – und damit auch das Laserlicht im Röntgenbereich – hat wichtige Eigenschaften, die es für die wissenschaftliche Nutzung so wertvoll macht. Die Lichtwellen bewegen sich im Gleichtakt, sodass bei der Streuung an Atomen ganz bestimmte, verhältnismäßig leicht zu

analysierende Muster entstehen. Durch seine kurze Wellenlänge kann das Röntgenlaserlicht dabei als Hochgeschwindigkeitskamera mit atomarer Auflösung dienen. Von 2009 bis 2016 wurde der European XFEL von einem Konsortium aus zwölf Ländern errichtet, danach erfolgte die Inbetriebnahme. Heute stellt ein Stammpersonal von mehr als 300 Personen den Röntgenlaser für Nutzerinnen und Nutzer der ganzen Welt – ausgewählt nach wissenschaftlicher Exzellenz – zur Verfügung. Die wissenschaftlichen Fragestellungen der meist international zusammengesetzten Forschungsgruppen reichen dabei von der Funktionsweise von biochemischen Prozessen im menschlichen Körper bis zur Materialentstehung im Innern von Planeten.



Die Alleinstellungsmerkmale des European XFEL sind seine hohe Lichtstärke und seine schnelle Pulsfolge. 27.000 Mal pro Sekunde feuert der Elektronenbeschleuniger – jedes Mal gibt es einen Röntgenblitz. Dass damit besonders schnell und effizient sehr genaue Analysen möglich sind, konnte ein internationales Forschungsteam unter Leitung des MPI für medizinische Forschung in Heidelberg kürzlich zeigen: Ihnen gelang es, Eiweißmoleküle zu entschlüsseln, die in einem Flüssigkeitsstrahl durch den Röntgenlaserstrahl flogen. In ihrem Experiment wurden tausende von einzelnen Aufnahmen gemacht, die in einem Computer zu einem dreidimensionalen Abbild der Moleküle rekonstruiert werden konnten.



WIE EIN RÖNTGENLASER FUNKTIONIERT

Zunächst werden Elektronen in supraleitenden Resonatoren (1) praktisch auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Dann werden sie durch sogenannte Undulatoren (2), abwechselnd unterschiedlich gepolte Magnetfelder, gelenkt. Die „rütteln“ so an den Elektronen, dass sie Licht aussenden. Da die Slalomstrecken sehr lang sind, beeinflussen sich Licht und Elektronen gegenseitig und senden koordiniertes – „kohärentes“ – Licht im Röntgenbereich aus. Dieses wird an den Messplätzen (3) zur Untersuchung verschiedener Proben genutzt.





ADRENALIN- RAUSCH

▲ Big-Air-Wettbewerb in Alaska, USA. Sprünge über eine große Absprungrampe lassen bei diesem Sport spektakuläre Sprungakrobatiken zu. Um diese zu beschreiben, ist eine Menge Physik vonnöten.



MANCHE SPORTART LÄSST DEN ADRENALINSPIEGEL HOCHSCHNELLEN – WENN ETWA TURNER MIT GEWAGTEN FIGUREN UM DAS RECK SCHLEUDERN UND NACH EINEM DREIFACHSALTO SICHER LANDEN.

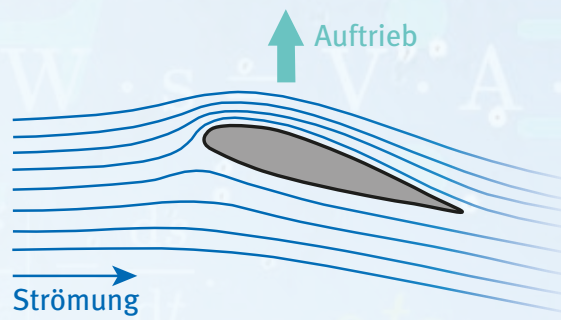
Wem Turnen in der Halle etwas zu altbacken ist, der kann Sprünge, Drehungen und Salti auch auf Brettern erleben: mit Skate- oder Snowboard oder beim Freestyle-Skiing. Die wohl spektakulärsten Sprünge gibt es bei den Snowboard-Disziplinen Big Air an der Schanze und in der Half Pipe zu sehen. Anna Gasser, Shaun White, Kea Kühnel und viele mehr begeisterten zuletzt bei den olympischen Winterspielen 2018 in Südkorea mit spektakulären Sprüngen. Aus Sicht der Physik lassen sich die Drehungen in der Luft in die Kategorien der echten und der scheinbaren Rotationen unterteilen. Echte Rotatio-

nen sind zum Beispiel der Salto und die Schraube. Dabei sorgt der Absprung für eine Drehbewegung: Physikalisch gesehen, geben die Athletinnen und Athleten ihren Körpern für den Flug einen Drehimpuls mit. Einmal in der Luft, können sie diesen Drehimpuls aber nicht mehr ändern, weil sie sich nicht abstützen können. Ihre Bewegungsfigur können sie aber über eine sogenannte Scheinrotation ändern. Dazu müssen sie einen Teil ihres Körpers verwinden und zum Ausgleich dafür mit einem anderen Teil eine Gegenrotation machen. Diesen Effekt nutzen viele Sportarten vom Snowboard bis zum Turmspringen. In Zeitlupenaufnahmen des Turmspringens ist oft schön zu erkennen, wie etwa die Arme beim Übergang vom Schraubensalto zum normalen Salto asymmetrisch geführt werden.

Wenn es um Fliegen und Adrenalin geht, ist Basejumping unübertroffen. Spektakuläre Videos

aus Helmkameras zeigen atemberaubende Flüge durch Felsentore. Gefährlich ist Basejumping allemal! Aber ist es auch echtes Fliegen? Tatsächlich sorgen die Wingsuits für einen Gleitflug. Der wesentliche Auftrieb kommt daher, dass die Flächen unter den Wingsuits die anströmende Luft umlenken – wie bei einem Papierflieger. Physikalisch sorgt das für eine Impulsänderung der Luftmoleküle in der Strömung. Diese drückt die Flügelfläche „nach oben“ und verlängert die Flugbahn. Hinzu kommt ein gewisser Tragflächeneffekt durch die gekrümmten Wingsuitflächen. Allerdings trägt dieser aerodynamische Effekt beim Basejumping eher wenig zum Auftrieb bei.

Dass auch Segelboote etwas mit der Physik des Fliegens zu tun haben, mag vielleicht überraschen. Am 24. November 2012 raste die Vestas Sailrocket vor Namibias Küste mit fast 130 km/h über die Wellen. Sie war damit weit mehr als doppelt so schnell wie der Wind, der nur mit etwa 46 km/h blies. Auch die Katamarane und Trimarane in Rennen wie dem America's Cup erzielen Geschwindigkeiten um die 90 km/h bei deutlich langsamerem Wind. An zwei herausgehobenen Stellen sind hier die Aero- und Hydrodynamik für Auftrieb und Vortrieb verantwortlich. Den Antrieb besorgt ein Hauptsegel, das wie ein Flugzeugtragflügel geformt ist. Entscheidend ist dabei die Konstruktion des Segels: Alte Schiffe mit Rahsegeln wurden einfach vom Wind angeschoben, wegen der hohen Reibung im Wasser blieben sie weit unterhalb der Windgeschwindigkeit. Moderne Segler nutzen hingegen mit ihren gewölbten, schräg zum Wind gedrehten Segeln den Tragflächeneffekt. Besonders ausgeprägt ist dieser, wenn das „Segel“ als starre Tragfläche mit Flügelprofil ausgeformt ist – als würde man einen Flugzeugflügel senkrecht auf den Schiffsrumpf schrauben.



Die zweite wichtige Zutat sind Kielbauteile und Ruder in Form von Tragflügeln. Diese heben den Rumpf komplett aus dem Wasser! Das vermeidet die Reibungswiderstände im Wasser, die konventionelle Boote massiv bremsen. Dabei sparen sie auch den Energieverlust durch die Wellen ein, die ein im Wasser liegender Rumpf erzeugt. Daher kann ein über die Wellen fliegendes (die Segler sprechen von „foilen“, von engl. „foil“ für Tragfläche) Tragflügelboot mit Abstand die höchsten Geschwindigkeiten erzielen. Dass das Boot insgesamt leicht genug ist, um sich aus dem Wasser zu heben, ist ganz nebenbei auch ein Erfolg der Werkstofftechnik: Rumpfe aus kohlefaserverstärktem Kunststoff sind leicht und stabil und im Regattabereich Stand der Technik.

Eine Tragfläche ist so geformt, dass die Luft oder das Wasser entlang der Oberseite etwas weniger Platz für die Strömung hat. Dadurch müssen Luft oder Wasser dort schneller strömen. Zwangsläufig entsteht dabei auf der Oberseite ein Unterdruck und damit eine Kraftkomponente senkrecht nach oben. Dies erlaubt es einem Segelschiff, gegen den Wind zu kreuzen. Und spezielle Hochgeschwindigkeitssegler können so viel schneller als der Wind segeln.

Wind kann allerdings auch ein Feind sein. Das gilt vor allem für den Gegenwind beim Fahrradsport. Trotzdem ist das Fahrrad die effizienteste Art,

◀ Effekte, die für Auftrieb sorgen: (1) Die Luft strömt gegen die Unterseite des Flügels und gibt so Impuls ab. (2) Das Flügelprofil engt den Raum ein, den die Luft oberhalb des Flügels nehmen kann, wodurch sich die Strömungsgeschwindigkeit erhöhen muss. In der Folge entsteht oberhalb des Flügels ein Unterdruck.

▼ Flug über Dubai. Beim Einsatz von Wingsuits begeben sich die Springer in einen Gleitflug – anströmende Luft wird umgelenkt, die Flugbahn verlängert sich.

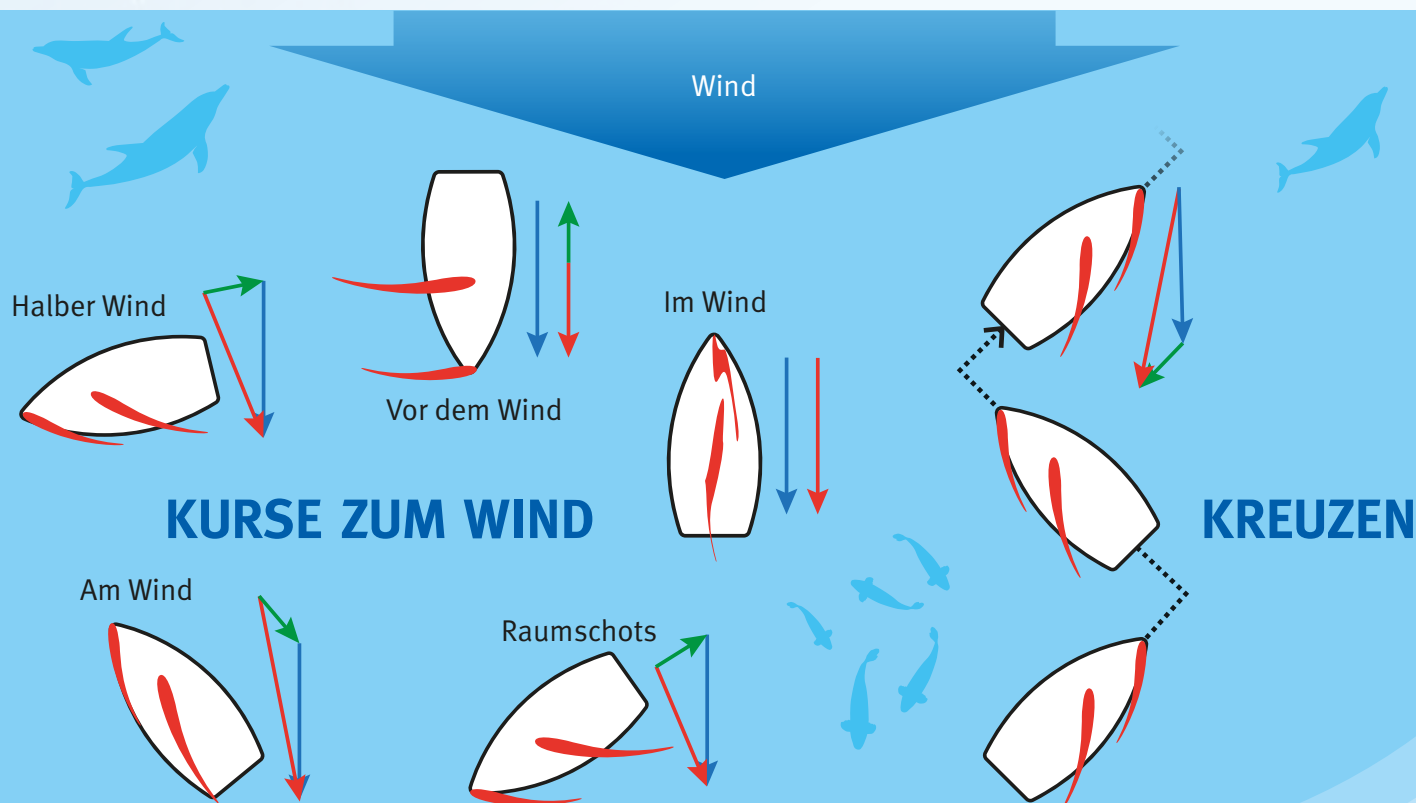


▼ Das Fortkommen beim Segeln ist nicht so trivial, wie es auf den ersten Blick scheinen mag. Eine entscheidende Rolle spielt der scheinbare Wind.

sich fortzubewegen. Das zeigt ein Vergleich der gemessenen Kohlendioxid-Emissionen pro Kilometer für den Transport von vier Personen. Vier schnelle Läufer in einer Gruppe stoßen zusammen rund 100 Gramm Kohlendioxid beim Atmen aus. Das ist weniger als die meisten Autos mit verschiedenen Verbrennungsmotoren emittieren, in denen vier Passagiere sitzen. Vier Fußgänger kommen auf nur 50 Gramm Kohlendioxid. Doch eine nicht zu angestrengt radelnde Vierergruppe emittiert sogar nur 25 Gramm Kohlendioxid! Das

demonstriert, wie effizient wir Menschen uns mit Muskelkraft fortbewegen können.

Wir haben gesehen, dass in vielen Sportarten erstaunlich viel Physik steckt. Ihre Methoden lassen sich für ein optimales Training oder medizinische Behandlungen nutzen. Eines ist sicher: Die physikalische Grundlagenforschung wird immer wieder neue Entdeckungen hervorbringen. Manchen davon werden auch der Medizin und dem Sport zugutekommen.



Schneller als der Wind

DIE PHYSIK DES SEGELNS

Beim Segeln spielt der Wind eine entscheidende Rolle. Doch welcher Wind? Der wahre Wind (blaue Pfeile), ist der Wind, den man wahrnehmen und messen kann, wenn man sich an einem festen Ort befindet – zum Beispiel am Ufer. Der Fahrtwind (grün) ist immer genau gegen die Fahrtrichtung des Bootes gerichtet, kommt also von vorne. Aus diesen beiden Winden resultiert, den Regeln der Vektorrechnung folgend, der sogenannte scheinbare Wind (rot). Dieser Wind ist für das Vorankommen des Bootes entscheidend. Doch das Boot bewegt sich nur, wenn das Segel bis zu einem gewissen

Winkel zum Wind steht. Wird dieser bei Kurs „Im Wind“ unterschritten, kann sich am Segel kein Wind mehr fangen. Gegen den (wahren) Wind segeln, ist nur durch geschicktes Kreuzen möglich. Je nach Ausrichtung von Boot und Segel kann der scheinbare Wind sogar stärker sein als der wahre Wind, der rote Pfeil ist dann länger als der blaue. Bei einer in etwa in Richtung des scheinbaren Windes ausgerichteten Segelstellung verhält sich das Segel zudem wie eine Flugzeugtragfläche, auf dessen einer Seite ein Unterdruck entsteht. In Summe ermöglicht dies ein schnelleres Segeln als der Wind.

— Segel — Wahrer Wind — Fahrtwind — Scheinbarer Wind

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Heinemannstraße 2
53175 Bonn

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)
Hauptstraße 5
53604 Bad Honnef

AUTOREN

Roland Wengenmayr, Dr. Jens Kube

REDAKTION

Prof. Dr. Eberhard Bodenschatz, Dr. Axel Carl, Ruben Düchting,
Dr. Marius Groll, Max Heiland, Lisa Hölzer, Prof. Dr. Arnulf Quadt,
Elina Schick, Prof. Dr. Metin Tolan

KONZEPT UND GESTALTUNG

iserundschmidt GmbH (ius)
Agentur für Wissenskommunikation
(Verantw.: Ruben Düchting, Marleen-Christin Schwalm)
ius.pr@dpg-physik.de

DRUCK

Brandt GmbH, Bonn

STAND

August 2018

BILDQUELLEN

Reihenfolge zeilenweise von links oben nach rechts unten.

- U1/U4: nazarovsergey, BONNINSTUDIO/shutterstock.com;
Motivkomposition: iserundschmidt
- S.4: Markus Unger, CC BY-SA 2.0
- S.5: Keith Allison, CC BY-SA 2.0 / Grafik: Dr. Jens Kube und iserundschmidt
- S.6: Grafik: iserundschmidt nach Richard Bartz, CC BY-SA 3.0; Sports
Physics; Welt der Physik / NASA's Ames Research Center
- S.7: Grafik: iserundschmidt nach New Journal of Physics, März 2014
- S.8: Pierre-Yves Beaudouin, CC BY-SA 4.0 / Grafik: iserundschmidt
- S.9: Grafik: iserundschmidt nach New Journal of Physics / Keith Allison,
CC BY-SA 2.0
- S. 10: Fernando Frazo, Agencia Brasil, CC BY-SA 3.0
- S. 11: Grafik: iserundschmidt nach Ron George / Filip Bossuyt, CC BY-SA
2.0 / Grafik: iserundschmidt nach Österreichischer Bundesverlag
Schulbuch GmbH & Co. KG
- S. 12: Franc-Comtois, CCO / Grafik: iserundschmidt mit Bildmaterial von
pxhere: hugo_motta, CCO (Schmetterling); 2476217, CCO (Brust);
2476217, CCO (Rücken); 12019, CCO (Kraulen)
- S. 13: Stefan Brending, CC BY-SA 3.0
- S. 14: iStock.com, Lars Neumann
- S. 15: boman21, CCO
- S. 16: Grafik Maschine-Herz: iserundschmidt / Grafik ATP: iserundschmidt
nach Jynto
- S. 17: Roland Wengenmayr
- S. 18: Universitätsklinikum Heidelberg
- S. 19: Röntgen: CCO / Herzpflaster: Universitätsmedizin Göttingen,
Zimmermann
- S. 20: Grafik: iserundschmidt nach Jens Maus / Forschungszentrum Jülich
- S. 21: Universitätsklinikum Heidelberg
- S. 22: Howard Vindin, CC BY-SA 4.0
- S. 23: Grafik: iserundschmidt / stokpic, CCO
- S. 24: Grafik: iserundschmidt / Louisa Howard, CCO
- S. 25: DESY / M. Yusupov, IGBMC / DESY, G. Born
- S. 26/27: European XFEL (Jan Hosan, Rey.Hori, Option Z (2x),
Heiner Müller-Elsner), iserundschmidt und Dr. Jens Kube nach DESY
- S. 28: Senior Airman Christopher Gross, CCO
- S. 29: Grafik: iserundschmidt / Richard Schneider, CC BY 2.0
- S. 30: Grafik: iserundschmidt





Veranstalter



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Deutsche Physikalische Gesellschaft

tu technische universität
dortmund

Partner

WILHELM UND ELSE
HERAEUS-STIFTUNG



Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige GmbH



welt
der physik



sankt**reinoldi**
EV. STADTKIRCHE DORTMUND



DORTMUND



Deutsches Röntgen**X**useum

Medienpartner

Ruhr Nachrichten
Das Beste am Guten Morgen

Förderer



e⁺ Elmos
Stiftung



HITACHI
Inspire the Next



Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2018: Herzrasen“ (Dortmund, 17.-22.9.2018). Infos: www.highlights-physik.de