

4 Der Mann mit dem Hammer oder Welche Physik steckt im Marathonlauf?

Wir Menschen lieben ja die extremen Dinge. Deshalb ist in der Leichtathletik neben dem Sprint vor allem auch der Marathonlauf populär. Und bei diesem gibt es eine Menge Aspekte, die man physikalisch durchleuchten kann. Ich möchte das Beispiel zum Anlass nehmen und zeigen, dass Physik wirklich allgegenwärtig ist. Wir werden spielerisch ein paar Dinge abschätzen und durchrechnen. Aber keine Angst, es tut nicht wirklich weh! Nehmen wir für unsere Abschätzungen einen Modellathleten mit 70 kg, der den Marathon in 3 Stunden bewältigt.

Wie viel Energie setzt unser Läufer während des Laufes um? Es gibt zum Laufen eine sehr griffige Faustregel, die vom italienischen Physiologen *Rodolfo Margaria* stammt.⁵ Sie lautet, dass man pro Kilometer und pro Kilogramm eine Kilokalorie umsetzt. Dieser Energieumsatz ist weitgehend unabhängig von Lauftempo, Alter und Geschlecht, ja sogar vom Trainingszustand. Unsere Person mit 70 kg setzt also pro Kilometer 70 kcal um. Leicht zu merken! In der Physik verwendet man aber die Einheiten Joule und Kilojoule ($1 \text{ kcal} = 4,2 \text{ kJ}$). Leider ist die Faustregel dann nicht mehr ganz so knackig: Der Umsatz beträgt $4,2 \text{ kJ}$ pro Kilometer und pro Kilogramm.

Nachdem man beim Marathon 42,2 km bewältigen muss, setzt unser Modellathlet in Summe 12.410 kJ

$$4,2 \cdot 70 \cdot 42,2 = 12.406,8 \text{ kJ}$$

(2954 kcal) um. Das ist sehr beachtlich, weil man einen durchschnittlichen Tagesumsatz mit 10.000 kJ (2381 kcal) annehmen kann. Unser Läufer darf also an seinem Marathon tag unbeschadet mindestens doppelt so viel essen wie der durchschnittliche Zuschauer am Straßenrand. Spannend wird es jetzt, wenn wir die physikalische Leistung ausrechnen. Geben Sie bitte einen Tipp ab, bevor Sie weiterlesen! Mit wie viel Watt läuft unser Held während des Marathons, um 3 Stunden zu erreichen?

Leistung ist als Arbeit pro Zeit definiert und es gilt: 1 Watt ist 1 Joule pro Sekunde. Unsere drei Stunden entsprechen 10.800 s. Weil wir in Joule und nicht in Kilojoule rechnen, müssen Sie beim Umsatz noch drei Nullen dranhängen. Für die Leistung erhalten wir dann $12.410.000 \text{ J} / 10.800 \text{ s} \approx 1150 \text{ W}$. Das ist wahrlich beachtlich, denn es entspricht etwa der Heizleistung eines Toasters oder eines Föhns! In der Regel tippt man hier wesentlich weniger! Der Grund ist der, dass man auf Fitnessgeräten stets die Nettoleistung angibt, also den mechanischen Output. Dummerweise wird bei der Übertragung von Energie immer sehr viel Wärme erzeugt. Beim Laufen gehen über den Daumen gepeilt 80 % der Energie sofort als Wärme verloren und können mechanisch nicht genutzt werden. Die oben berechneten 1150 W sind die Bruttoleistung, also das, was der Körper innen drin tatsächlich aufwenden muss. Der mechanische Output beträgt davon 20 % und somit knapp 230 W. Fitnessstudiogängern kommt diese Größenordnung sicher wesentlich gewohnter vor.

$2000 \cdot 1000$
 $3 \cdot 3600$
 $= 1148 \text{ W}$
 $\downarrow 20\%$
 230 watt

Wärme ist der Friedhof der Energie. Auch jene Energie, die zwischenzeitlich in die Bewegung der Muskeln investiert wird, wird schlussendlich ihrer letzten Bestimmung zugeführt. Der Körper unseres Marathonläufers wird also mit 1150 W geheizt. Zu Beginn steigt seine Körpertemperatur um etwa 2°C an, erreicht aber relativ bald ein Plateau. Klar, sonst würde sich der Sportler während des Marathons selbst durchkochen. Die Temperatur halten zu können, bedeutet natürlich auf der anderen Seite, dass der Körper nach dem Warmlaufen eine Kühlleistung von 1150 W benötigt, damit sich die Effekte die Waage halten.

Der Schweiß spielt dabei eine wichtige Rolle. Um das Wasser zu verdunsten, muss man die elektrischen Kräfte zwischen den Wassermolekülen überwinden. Dazu ist Energie nötig, die das Wasser von der Körperwärme abzwackt. Das ist die Kühlungswirkung von Schweiß. Es ist natürlich sehr wetterabhängig, aber man kann Pi mal Daumen von einem Schweißverlust von 3 l während eines Marathons ausgehen. Jeder Liter Wasser entzieht beim Verdunsten dem Körper 2430 kJ (580 kcal). Gehen wir vereinfacht davon aus, dass tatsächlich der gesamte Schweiß verdunstet. Das ist natürlich nicht der Fall. Der eine oder andere Tropfen fällt sicher ungenutzt von der Nasenspitze zu Boden. 3 l verdunsteter Schweiß in 3 Stunden bedeuten eine Kühlleistung von immerhin 675 W. Das ist etwas über die Hälfte der benötigten Kühlleistung. Die restliche Abkühlung erfolgt gewissermaßen gratis, also passiv ohne Anstrengung des Körpers, über Konvektion der Luft und Wärmestrahlung.

$$P = \frac{W}{t}$$

$$\frac{2430 \cdot 1000 \cdot 3}{3600 \cdot 3}$$

$$3 \text{ h, } 3 \text{ l} = 675 \text{ watt}$$

Und nun kommen wir zum „Mann mit dem Hammer“. Damit ist im Laufsport nicht die populäre nordische Gottheit Thor gemein, sondern es handelt sich dabei um eine griffige Metapher für den abscheulichen Tempoeinbruch, der aufgrund der Kohlenhydratverarmung des Körpers auftreten kann – Übelkeit und Schwindelgefühl inklusive. Der Mann mit dem Hammer wartet, wenn man das Marathon-tempo ungünstig erwischt, um den Kilometer 35 herum auf den Läufer. Wie und warum passiert das aber?

Masse des Modellathleten	70 kg
Muskelmasse (40 % der Körpermasse)	28 kg
davon beim Laufen verwendet (50 %)	14 kg
in der Laufmuskulatur gespeicherte Kohlenhydrate (2 % der Muskelmasse)	280 g
in der Leber gespeicherte Kohlenhydrate	75 g
Gesamtbrennwert der verfügbaren Kohlenhydrate in Muskeln und Leber (355 g)	6035 kJ (1437 kcal)
Leistung, wenn diese Kohlenhydrate komplett in 3 Stunden verbrannt werden	560 W

Tab. 3: Schätzwerte der Kohlenhydratspeicher und ihr Beitrag zur Leistung in unserem Beispiel.

Für Ausdauerleistungen stehen unseren Muskeln zwei Energiespeicher zur Verfügung: Kohlenhydrate und Fette. Die Kohlenhydratspeicher sind zwar viel, viel kleiner, aber dafür kann man den Muskel, verglichen mit Fetten, mit der doppelten Leistung betreiben. Wenn man also schnell läuft und eine hohe Leistung benötigt, dann verbrennt man zwangsläufig vor allem Kohlenhydrate. Lläuft man lang-

sam, schont der Körper die lebensnotwendigen Kohlenhydratspeicher und verbrennt eher die Fette.

In Tab. 3 habe ich realistische Daten zur Größe der Kohlenhydratspeicher für unseren Marathonisten abgeschätzt. Im Idealfall hat man die Kohlenhydrate genau dann verbraucht, wenn man gerade den Fuß über die Ziellinie gesetzt hat. Wie man das schafft, kann man mithilfe von sportmedizinischen Tests im Vorfeld abschätzen, muss es aber letztlich mithilfe des Trial-and-Error-Prinzips für sich selbst in Erfahrung bringen. Wenn wir diesen günstigsten aller Fälle annehmen, dann liefern die Kohlenhydrate in unserem Beispiel mit 560 W ziemlich genau die Hälfte der benötigten 1150 W. Wenn unser Athlet aber zu Beginn zu schnell wegbrettert, werden die Kohlenhydrate zu schnell verbraucht, gehen leider deutlich vor der Ziellinie zur Neige, und dann macht er die unangenehme Bekanntschaft mit dem gefürchteten Herrn und seiner unangenehmen Gerätschaft. Und nicht nur das. Selbst wenn sich unser Läufer ins Ziel kämpft, wird die Zeit bescheiden sein, weil man im Fettstoffwechsel allein eine viel geringere Leistung erbringen kann. Man verliert also gegen Ende wesentlich mehr Zeit, als man zu Beginn eventuell gewonnen hat.

Wie sehr die Laufökonomie beim Marathon eine Rolle spielt, soll das folgende Beispiel zeigen. Wenn wir uns fortbewegen, dann heben und senken wir dabei unseren Körperschwerpunkt (KSP). Darunter versteht man jenen virtuellen Punkt, an dem man sich die gesamte Masse des Körpers vereinigt denken kann. Diese KSP-Hebung ist notwen-

$$P = \frac{W}{t}$$

$$= \frac{6035 \cdot 1000}{3 \cdot 3600}$$

$$= 558 \text{ W}$$

?
wie?

$\text{36} \rightarrow 42.26 \text{ m}$ $v = \frac{s}{t} \Rightarrow \frac{42200}{3.3600} = 39 \text{ m/s}$

Masse des Modellathleten	70 kg
Schrittlänge	1,5 m
Schritte pro Marathon	28.133
überflüssige Hebung des Schwerpunkts	1 cm
überflüssige Gesamthebung beim Marathon	281 m
Lauftempo bei Marathon in 3 Stunden	3,9 m/s (14,1 km/h)
Schrittdauer bei 1,5 m Schrittlänge und 3,9 m/s Lauftempo	0,38 s
Nettoarbeit zur Hebung des Schwerpunkts um 1 cm ($W_1 = mgh$)	6,9 J
Bruttoarbeit zur Hebung des Schwerpunkts um 1 cm inkl. Wirkungsgrad von 20 %	34,5 J
Leistung zur Hebung des Schwerpunkts ($P = W/t$)	90 W
reduzierte Leistung, die dem Vortrieb dient (1150 W - 89 W)	1060 W

Tab. 4: Abschätzung der reduzierten Leistung, wenn der Schwerpunkt pro Schritt um bloß 1 cm zu viel gehoben wird.

dig, weil jeder Schritt beim Laufen quasi zu einem schiefen Wurf des ganzen Körpers führt. Während der Luftfahrt muss man das hintere Bein wieder nach vorne bringen. Diese KSP-Hebung ist kein Selbstzweck, sondern dient letztlich ausschließlich dem Vorwärtsschritt.

Was jedoch passiert, wenn man unökonomisch läuft, ist in Tab. 4 exemplarisch gezeigt. Nehmen wir an, unser inzwischen liebgewonnener Athlet hebt den Schwerpunkt unnötigerweise bei jedem Schritt um 1 cm zu viel. Damit meine ich, dass diese Hebung nicht dem Vorwärtsschritt dient, sondern wirklich überflüssig ist. Bei einer Schrittlänge von 1,5 m würde sich die zusätzliche Hebung auf 281 m sum-

mieren. Es wirkt also in Summe so, als würde das Ziel 281 Höhenmeter über dem Start liegen! Dabei vergeudet er eine Leistung von 90 W, weil diese nicht dem Vorwärtsschritt dient. Wenn wir annehmen, dass er beim Marathon mit 1150 W auskommen muss, reduziert sich die Leistung fürs Vorwärtsschritt auf 1060 W. Das ergibt aber eine Endzeit von 3 Stunden und 15 Minuten, also einen Zeitverlust von einer Viertelstunde. Das verdeutlicht sehr eindrücklich die Wichtigkeit einer guten Laufökonomie!

- ① $\frac{42200}{1.5} = 28133$
- ② $28133 \cdot 0.01 = 281 \text{ m}$
- ③ $v = \frac{s}{t} \rightarrow t = \frac{s}{v} = \frac{1.5 \text{ m}}{39 \text{ m/s}} = 0.38 \text{ s}$
- ④ $m \cdot g \cdot h = 70 \cdot 9.81 \cdot 0.01 = 6.867 \text{ J} = 6.9 \text{ J}$
- ⑤ $20\% \rightarrow 5 \cdot 6.9 = 34.5 \text{ J}$
 $P = \frac{W}{t} = \frac{34.5}{0.38} = 90 \text{ W}$
 oder $281 \text{ m} \approx 36 \cdot 20\%$
 $\rightarrow P = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot 5}{3.3600} = 89.33 \text{ W}$
- ⑥ $1150 \text{ Watt} \approx 180 \text{ min}$
 $1060 \text{ Watt} \approx 195 \text{ min} = 3 \text{ h } 15 \text{ min}$