

# Physik und Sport

## Einfache Abschätzungen von Leistungen und Kräften im Sport

DDr. Martin Apolin  
Ph-Didaktik, Uni Wien  
Inst. f. Sportwissenschaften

### Inhalt

#### Der Mensch im „Standby“

Grundumsatz  
Was ist Leben?  
Energiesatz

#### Leistungsumsätze

Leistungen beim Gehen, Laufen und Springen  
auf verschiedenen Wegen abschätzen

#### Abnehmen

durch Gehen und Laufen

#### Kräfte an der Achillessehne

beim Stretksprung  
beim Weltrekord im Hochsprung

## Der menschliche Körper im „Standby“ oder Der Grundumsatz

Der **Grundumsatz** ist die **Energie-**  
**menge pro Tag**, die ein Mensch bei  
Ruhe für die **Aufrechterhaltung**  
**der Körperfunktionen** benötigt.

Streng genommen wird der  
Grundumsatz bei einer  
Raumtemperatur von 28 °C  
ermittelt.

Physikalisch gesehen handelt es sich  
beim Grundumsatz um eine **Leistung**.  
Die SI-Einheit des Grundumsatzes  
ist daher J/s oder **Watt**.

In der Praxis wird aber relativ  
unbeeindruckt weiterhin meist die  
Einheit **Kilokalorien pro 24 Stunden**  
benutzt und die Angabe „pro 24 h“  
oft sogar weggelassen.

## Wie kann man den **Grundumsatz** abschätzen?

Quasi: Was leistet ein Mensch,  
wenn er nur rumliegt?

**Methode 1** Vereinfachte, aber alltagstauglich Faustregel:

**Grundumsatz Frauen**

3,8 kJ/kg/h (0,9 kcal/kg/h)  
Bsp.: Frau, 60 kg, **63 W**

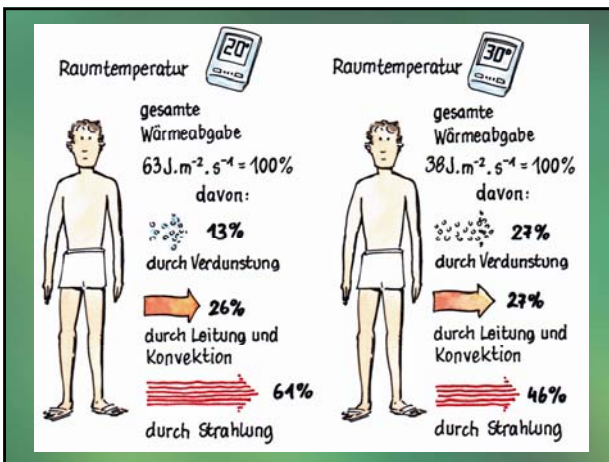
**Grundumsatz Männer**

4,2 kJ/kg/h (1 kcal/kg/h)  
Bsp.: Mann, 75 kg, **88 W**

**Exkurs:** Ein hoher Prozentsatz des Grundumsatzes dient **direkt** zur **Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur**.

Aber: Letztlich wird jede Energie in Wärme umgewandelt (z.B. Skelett- oder Herzmuskel).

**Wärme ist der Friedhof der Energie!**  
Daher kann der Grundumsatz über den Wärmehaushalt abgeschätzt werden.

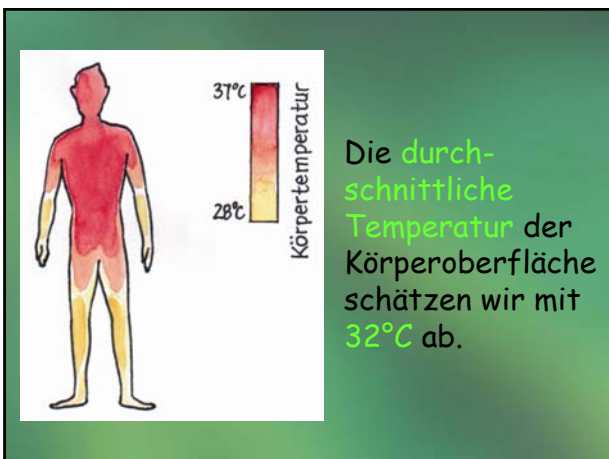


**Methode 2**

Man kann die Wärmeabgabe mit dem **Stefan-Boltzmann-Gesetz** überprüfen:

$$P = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$$

Dazu nimmt man vereinfacht an, dass der Körper ein **Schwarzer Strahler** ist. Weil das auf den Menschen natürlich nicht exakt zutrifft, **überschätzen** wir die Abstrahlung ein wenig. Das Ergebnis ist daher ein oberer Grenzwert des Grundumsatzes.



Bei einer Außentemperatur von **28°C** und der Annahme, dass **46 %** der Wärmeabgabe durch Strahlung erfolgen, ergeben sich

und für **Frauen** (Körperfläche  $1,6 \text{ m}^2$ ) **84 Watt**

für **Männer** (Körperfläche  $1,9 \text{ m}^2$ ) **100 Watt**

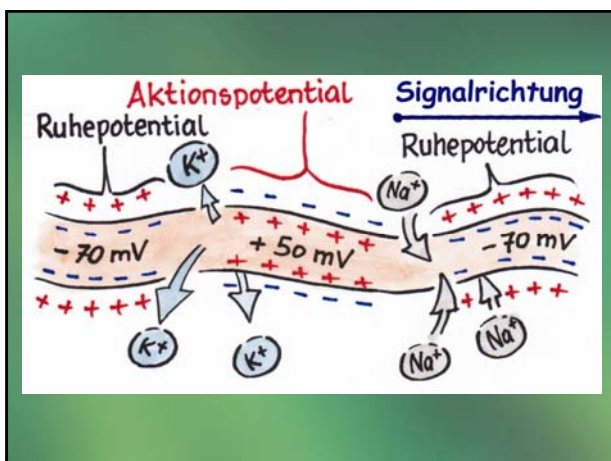
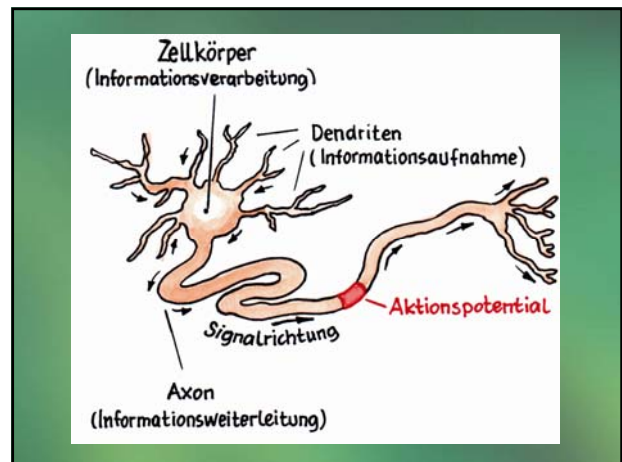
Wie entsteht aber die Wärme?

Exkurs: „Was ist Leben?“

Frei nach Erwin Schrödinger 1944:  
Lebende Systeme nehmen von der Umgebung chemische Energie und negative Entropie auf und geben Wärmeenergie und Entropie ab.

Der Entropie-Erhalt bzw. die Entropie-Absenkung im Inneren muss durch eine Entropie-Erhöhung in der Umgebung kompensiert werden (2. HS. der Wärmelehre).

Kurz: Lebende Systeme müssen immer Wärme abgeben!



Methode 3 Abschätzung mit Hilfe des Membranpotentials.

Welche Leistung ist nötig, damit sich die Zellen gegen die Entropie-Erhöhung wehren und das Ruhepotential aufrecht erhalten können?

Die **Oberfläche aller Zellen** im Körper kann man mit **17.000m<sup>2</sup>** bei **Frauen** und **21.000m<sup>2</sup>** bei **Männern** abschätzen (Horvath 1991).

Bei einer Kapazität von 0,01F/m<sup>2</sup> und einer Spannung von 70mV ergibt sich eine gespeicherte Ladung von **0,41J** bzw. **0,52J**.

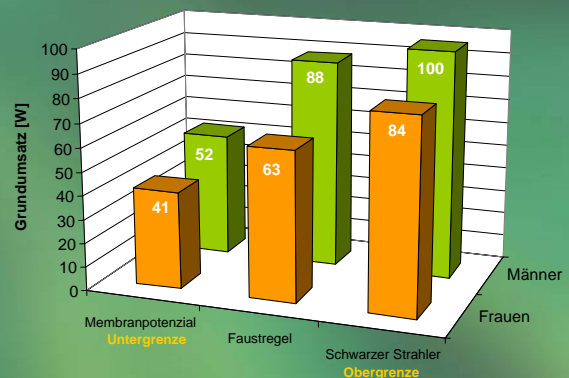
Wie kommt man nun auf eine Leistung?

Nach einem Aktionspotenzial muss der Ausgangszustand wiederhergestellt und die Ionen aktiv mit Hilfe der **Kalium-Natrium-Pumpe** zurückgepumpt werden.

Weil das **10ms** dauert, kann man eine Leistung von **41W** bzw. **52W** abschätzen.

Diese Leistung ist allein dazu nötig, um gegen die **Diffusion**, also gegen die **Entropieerhöhung**, anzukämpfen.

Weil alle anderen Leistungen in diese Abschätzung nicht einbezogen sind, können diese Werte als **untere Grenzwerte** angesehen werden.

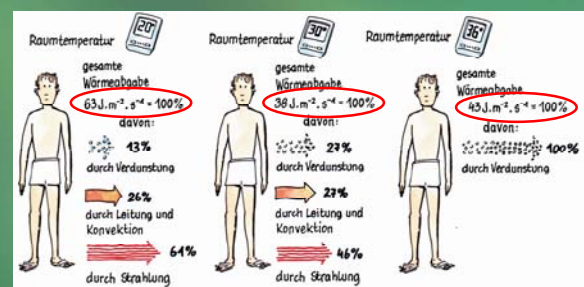


### Zusammenfassung

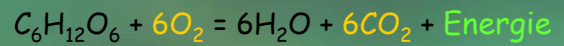
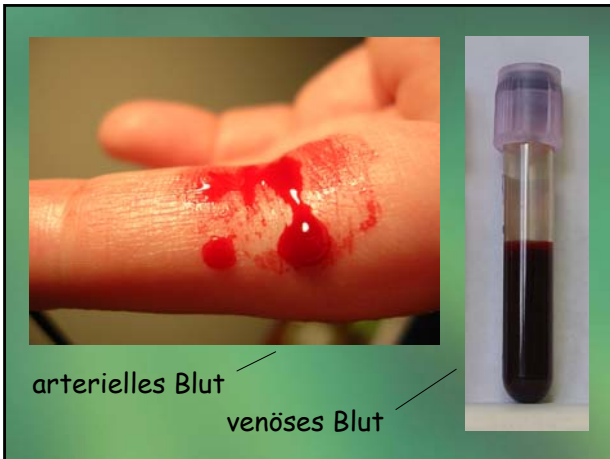
Der Grundumsatz entspricht der Leistung einer mittelhellen bis hellen **Glühbirne**.



**Exkurs:** Bei höheren Außentemperaturen ist der **Grundumsatz geringer**. Das führte zur Entdeckung des **Energiesatzes!**







In den Tropen ist das Blut heller und somit sauerstoffreicher als in Europa. Daraus schloss der Arzt Robert Mayer, dass in den Tropen der Grundumsatz niedriger ist. Man kann also quasi die Höhe des Grundumsatzes an der Farbe des venösen Blutes erkennen.

Wärme ist also auch eine Form der Energie!

Das brachte Robert Mayer auf die Idee, dass die Gesamtenergie generell konstant sein muss.

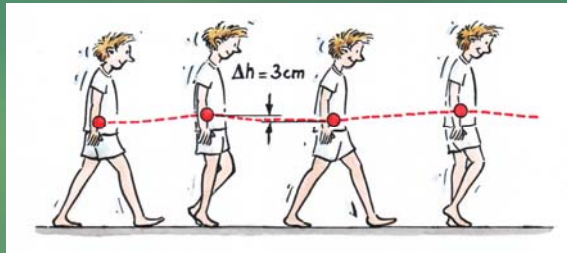
Leistungsumsätze

Leistung beim Gehen

Exkurs: Brutto- und Nettoenergie!

Glühbirne, 100 W	DeLorean DMC 12, 100 kW
Bruttoleistung 100 W	Bruttoleistung 350 kW
Nettoleistung 5 W	Nettoleistung 100 kW

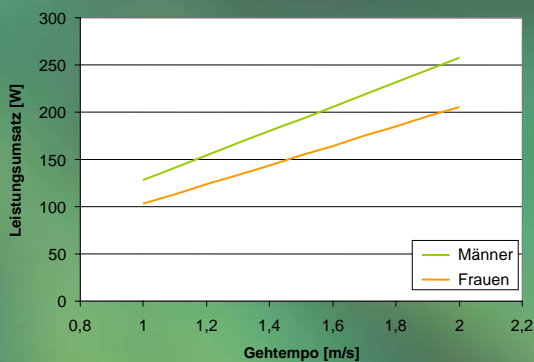
In Alltag und Technik werden Brutto- und Nettoleistung vermischt. Im Folgenden wird immer die „inneren Leistung“ berechnet, also die Bruttoleistung.



Hebeleistung (netto)  $P = (mgh)/t$

Um auf die **Bruttolistung** zu kommen, muss man den **Wirkungsgrad** berücksichtigen! Dieser beträgt etwa 25 %. Die Bruttolistung ist also 4-mal so groß wie die Nettolistung.

$$P = 4 \cdot \frac{mgh}{t} = 4 \cdot \frac{mgh}{\frac{\text{Schrittlänge}}{\text{Geschwindigkeit}}}$$



Annahme: Die Schrittlänge ist 70 cm.

## Leistungen beim Laufen

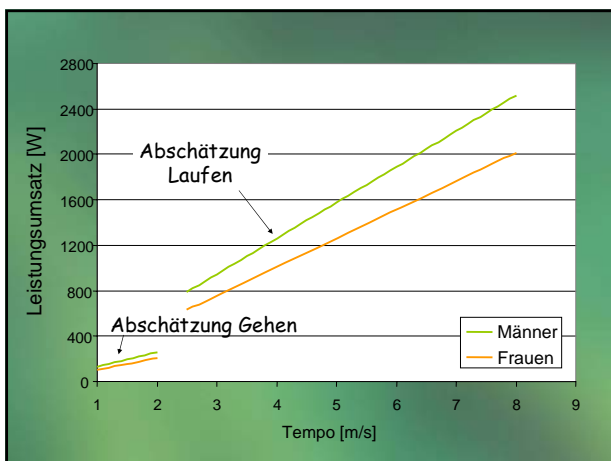


Laufen - Flugphase

Beim **Laufen** lässt sich die Leistung nicht über den einfachen Ansatz der KSP-Hebung abschätzen, weil die Beine hohen **Beschleunigungen** ausgesetzt sind und auf Grund der Flugphase hohe **Bremstöße** abzufangen sind.

Aus Untersuchungen (z.B. Margaria 1982) lässt sich aber folgende brauchbare Faustregel ableiten:

Der **Energieumsatz beim Laufen** beträgt vom Tempo relativ unabhängig **4,2 kJ/kg/km**.

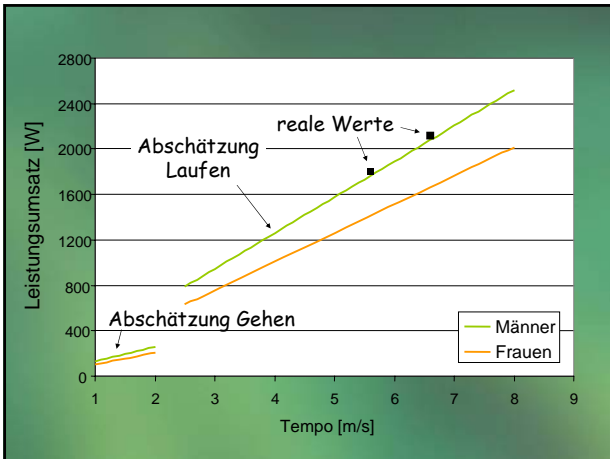


Überprüfen wir diese Faustregel exemplarisch mit Hilfe des **Sauerstoffbedarfs**. Pro Liter verbrauchtem Sauerstoff wird eine Energie von rund **20 kJ** umgesetzt. Den Sauerstoffverbrauch kann man mit Hilfe einer **Spiroergometrie** sehr exakt messen.



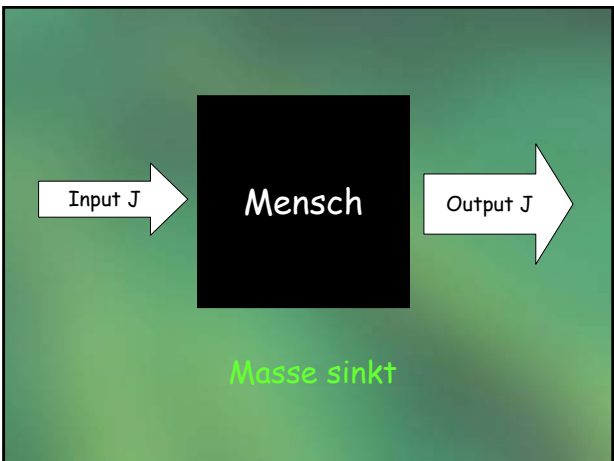
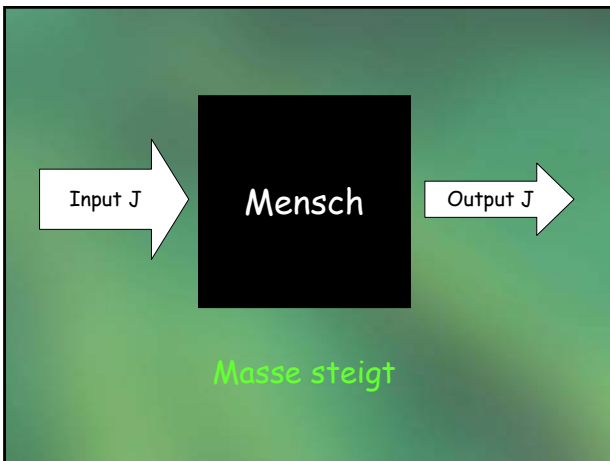
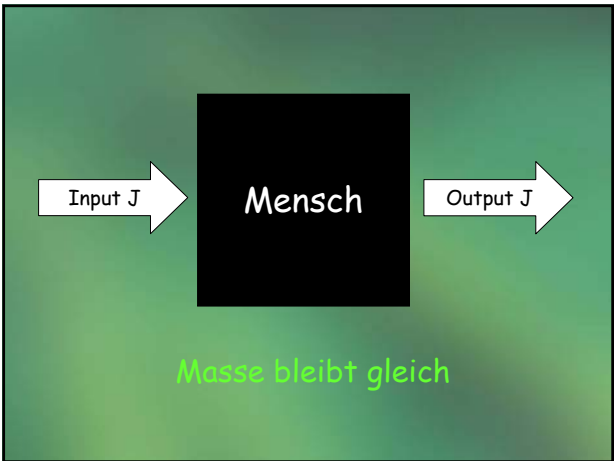
**1 Liter** verbrauchter **Sauerstoff pro Minute** entsprechen  $20.000\text{J}/60\text{s} =$  **333 W**.

Die maximale Menge an Sauerstoff, die ein hochtrainierter Läufer mit 75kg während eines **Marathons** (Weltrekord 2:04:26h oder 5,65m/s) verwerten kann, liegt bei etwa 5,4l, bei einem **3000m-Lauf** (WK 12:37,35min oder 6,61m/s) bei etwa 6,4l. Das ergibt umgerechnet **1806** bzw. **2125W**.

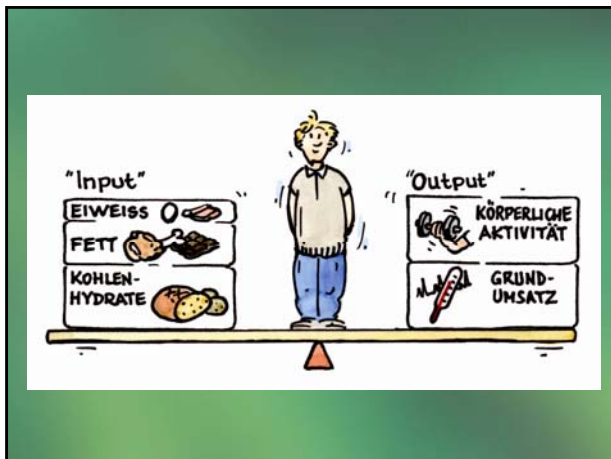


**Zusammenfassung**  
 Der Energieumsatz eines Menschen reicht von etwa 60W (Grundumsatz) bis über 2000W bei Dauerleistungen von einigen Minuten auf Weltklasseniveau.

Abnehmen durch Bewegung







Es gibt nur zwei Möglichkeiten zur Gewichtsabnahme:

Den **Input verringern**, also weniger essen, und/oder den **Output erhöhen**, also Sport machen.

1 kg Fett hat einen Brennwert von 40.000 kJ.

Wie weit muss man gehen, damit man 1kg Fett abnimmt?

Wir rechnen wieder mit einem Wirkungsgrad von 25%.

Pro kg Körpermasse und pro Schritt braucht man  $E = 4 \cdot g \cdot h = 1,2J$ . Bei einer Schrittweite von 70cm macht man 1430 Schritte pro km.

Der Energieumsatz beim Gehen beträgt daher 1,7kJ/kg/km.

Eine Person mit 60kg muss um 1kg Fett abzunehmen rund 392km gehen, eine Person mit 75kg rund 314km. Das ist sehr weit!

Andererseits: Wer pro Tag einen Kilometer zu Fuß geht, nimmt in einem Jahr etwa ein Kilogramm Fett ab (bei Beibehaltung seines restlichen Ernährungs- und Lebensstils).

Wie weit muss man laufen, damit man 1kg Fett abnimmt?

Zur Erinnerung:

Der **Energieumsatz beim Laufen** beträgt vom Tempo relativ unabhängig **4,2 kJ/kg/km**.

Eine **Person mit 60kg** verbrennt pro Kilometer 252kJ. Sie muss daher **159km laufen**.

Eine **Person mit 75kg** verbrennt pro Kilometer 315kJ. Sie muss daher **127km laufen**.

Beim Laufen benötigt man pro zurückgelegtem Weg etwa 2,5-mal so viel Energie wie beim Gehen.

Exkurs: Wie viel nimmt man in einem Jahr zu oder ab, wenn man den **Tagesbedarf** um bloß 1% **verfehlt**? Was entspricht einem 1% des Tagesbedarfs? 1% des **Tagesbedarfs** entsprechen etwa **100kJ**. Das ist der Brennwert von etwa **1,5 Stück Würfelzucker** oder **50 ml Fruchtsaft**.

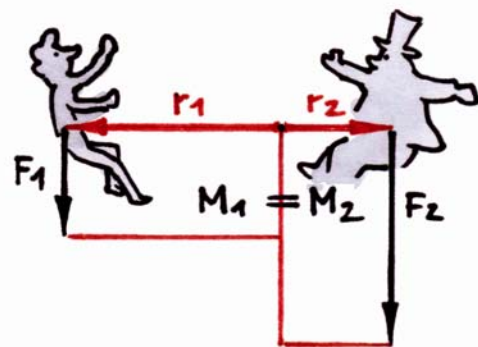
Im Jahr summiert sich das auf 36.500kJ, also rund 1kg Fett.

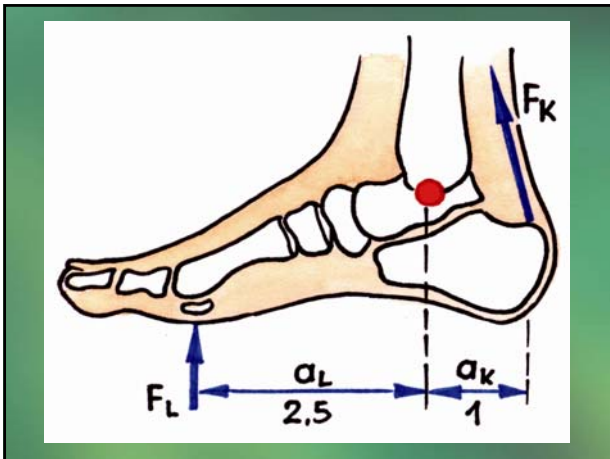
### Zusammenfassung

Abnehmen durch Sport ist ein **Langzeitprojekt**. Je nach Fortbewegungsart (Gehen, Laufen) und Körpermasse muss man etwa **100 bis 400km** zurücklegen, um 1kg Fett zu verbrennen.

### Kräfte im Sport

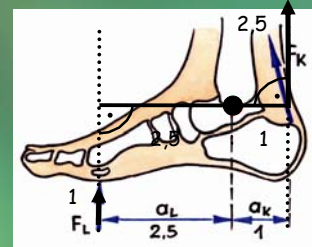
Exemplarisch: Welche Kräfte wirken auf die **Achillessehne**?





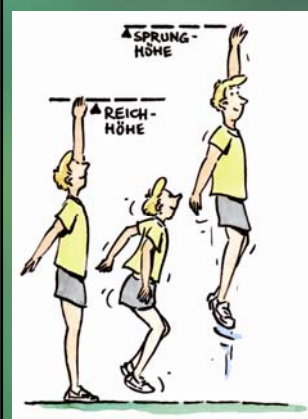
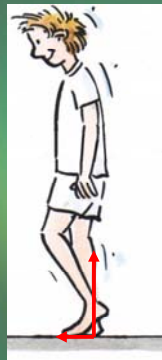
Nehmen wir vereinfacht rechte Winkel an...

Die Kraft an der Achillessehne ist immer **2,5-mal so groß**, wie die Kraft am Fußballen.



Wenn man annimmt, dass beim **Gehen** beim Abheben der Ferse rechte Winkel herrschen, dann wird die Achillessehne mit dem 2,5-fachen Körpergewicht belastet.

Bei einer Körpermasse von **60kg** ergeben sich daher **1500N** und bei **75kg** **1875N**.



Welche Kräfte wirken bei einem **senkrechten Sprung** auf die Achillessehne?

Links ist ein **Jump-and-Reach-Test**, mit dem man die KSP-Hebung messen kann.

Vereinfachte Annahme: Es liegt eine **gleichmäßige Beschleunigung** vor.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad s = \frac{a}{2} t^2$$

Aus der Hebung des Körperschwerpunkts ( $h$ ) lässt sich die benötigte **Absprunggeschwindigkeit** berechnen.

$$v = \sqrt{2gh}$$

Durch Einsetzen und Umformen erhält man:

$$t = \frac{2s}{\sqrt{2gh}}$$

Bei einer **KSP-Hebung** ( $h$ ) von **0,5m** und einer **Beschleunigungsstrecke** ( $s$ ) von **0,3m** ergeben sich für die Zeitdauer des Absprungs **0,19s**.

Für  $a$  folgen daraus  $16,7\text{m/s}^2$ .  
 Zusätzlich kommt aber noch die Erdbeschleunigung dazu, macht also in Summe  $26,7\text{m/s}^2$ .

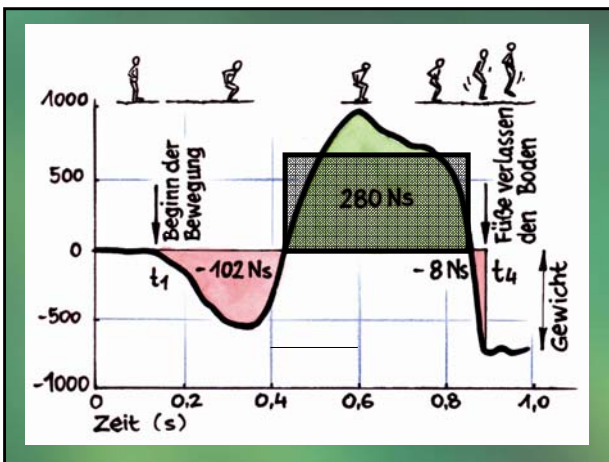
Über  $F = ma$  ergeben sich bei  $60\text{kg}$  eine Kraft von insgesamt  $1600\text{N}$ , also  $800\text{N}$  pro Fuß bzw.  $2000\text{N}$  auf die Achillessehnen.

Bei  $75\text{kg}$  ergeben sich  $2500\text{N}$ .

Wie groß sind aber die Maximalkräfte?

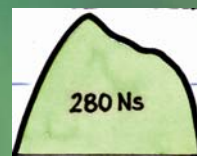
Schätzen wir den Zusammenhang zwischen Durchschnittskraft und Maximalkraft ab.

Wir greifen dazu auf eine Messung bei einem realen Streck sprung zurück.



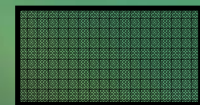
Maximum etwa  $1000\text{N}$

Durchschnitt  $650\text{N}$



$0,43\text{s}$

=



$0,43\text{s}$

Die Durchschnittskraft beträgt etwa  $2/3$  der Maximalkraft.

Für unser Beispiel von vorhin bedeuten das Maximalkräfte von  $3000\text{N}$  (bei  $60\text{kg}$ ) bzw.

$3750\text{N}$  (bei  $75\text{kg}$ ), die auf jeder Sehne wirken.



Welche Kräfte wirken bei einem sehr hohen Hochsprung? Dieser ist von der Belastung mit einem einbeinigen Streck sprung vergleichbar.





Orientieren wir uns an den Weltrekorden, die bei **2,09m** bzw. **2,45m** liegen!

Für **60kg**, 0,3m Beschleunigungsweg und 1m KSP-Hebung ergeben sich im Schnitt 6.500N, **maximal 9.800N**.

Für **75kg**, 0,3m Beschleunigungsweg und 1,2m KSP-Hebung ergeben sich im Schnitt 9.400N, **maximal 14.100N**.

Untersuchungen haben ergeben, dass die Achillessehne **bis zu 18.000N** aushalten kann. Damit könnte man einen Luxusklassewagen abschleppen.



### Zusammenfassung

Die Belastungen der Achillessehne reichen von etwa **1500N** beim Gehen bis zu rund **14.000N** bei sportlichen Spitzenleistungen. Die Sehne hält aber etwa 18.000N aus.

### Leistungen beim Hochsprung

Schätzen wir die **Leistung beim Weltrekordsprung der Männer** ab (2,45m). Mit den oben gewählten Werten ( $h = 1,2\text{m}$  und  $s = 0,3\text{m}$ ) ergibt sich für die **Bodenkontaktzeit** ein Wert von **0,12s**.

$$t = \frac{2s}{\sqrt{2gh}}$$



Der Hochspringer muss die Hebearbeit innerhalb der Kontaktzeit aufbringen. Mit  $m=75\text{kg}$  und  $\eta=0,25$  ergibt sich:

$$P = 4 \frac{mgh}{t} = 29.400\text{W}$$

### Zusammenfassung

Der Energieumsatz eines Menschen reicht von etwa  $60\text{W}$  (Grundumsatz) über  $2000\text{W}$  bei Dauerleistungen von einigen Minuten auf Weltklasseniveau bis zu fast  $30.000\text{W}$  bei Sprungleistungen.

### Literatur

Martin Apolin, Big Bang 5, oebv 2007

Martin Apolin, Big Bang 6, oebv 2008

Adolf F. Fercher, Medizinische Physik, Springer 1992

W. Hollmann, Th. Hettinger, Sportmedizin, Schattauer 2000

Helmuth Horvath, Biologische Physik, hpt 1990

Danke für die  
Aufmerksamkeit