01 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Eine Kraft überträgt Energie entlang eines Weges

Beim Verschieben einer Kiste betrachten wir eine bestimmte Kraft und den Weg der Kiste. So können wir beschreiben, welche mechanische Energie durch diese Kraft übertragen wird.



Drei idealisierte Fälle einer konstanten Kraft an einer bewegten Kiste. Der Weg zeigt jeweils nach rechts; die Arbeit der betrachteten Kraft hängt von ihrer Richtung ab.

1 · Mechanische Arbeit hat eine genaue Bedeutung

Mechanische Arbeit beschreibt Energieübertragung durch eine Kraft entlang eines Weges. Ihr Formelzeichen ist W, ihre Einheit **Joule**, abgekürzt J. Eine Kraft in Bewegungsrichtung kann einem Körper Energie zuführen. Eine entgegenwirkende Kraft kann ihm Bewegungsenergie entziehen.

Lege zuerst fest, welche Kraft und welchen Körper du betrachtest. An derselben Kiste können gleichzeitig Zugkraft, Reibung, Gewichtskraft und Stützkraft wirken. Ihre Beiträge zur Arbeit werden zunächst getrennt bestimmt. Die Summe erklärt die Änderung der Bewegungsenergie.

2 · Bei gleicher Richtung werden Kraft und Weg multipliziert

Wirkt eine konstante Kraft in Wegrichtung, gilt $W = F \cdot s$. Der Buchstabe F bezeichnet den Kraftbetrag, s den Weg. Beispiel: Eine Kiste wird mit 20 N über 3 m gezogen. Gesucht ist die Arbeit dieser Zugkraft.

$W = F \cdot s$
$W = 20\ \text{N} \cdot 3\ \text{m}$
$W = 60\ \text{J}$

Ein Joule entspricht einem Newtonmeter: $1\ \text{J} = 1\ \text{N} \cdot \text{m}$. Verdoppelst du bei gleicher Kraft den Weg, verdoppelt sich die Arbeit. Für die Rechnung müssen Meter und Newton passend eingesetzt werden.

3 · Die Richtung der Kraft entscheidet mit

Wirkt dieselbe Kraft von 20 N über 3 m gegen die Bewegungsrichtung, beträgt ihre Arbeit −60 J. Beim Bremsen wird dadurch Bewegungsenergie vermindert. Wirkt eine Kraft genau senkrecht zum Weg, beträgt ihr Arbeitsbeitrag für diesen Weg 0 J.

Beim waagrechten Tragen einer Tasche steht die tragende Handkraft ungefähr senkrecht zum Weg. Ihr mechanischer Arbeitsbeitrag an der Tasche ist dann 0 J. Der Körper benötigt trotzdem Energie für Muskelaktivität und andere Lebensvorgänge. Alltagserleben und physikalische Betrachtung beziehen sich hier auf verschiedene Vorgänge.

Das gehört zusammen: Wähle Körper, Kraft und Weg. Die Richtung der Kraft bestimmt, wie viel mechanische Energie sie auf diesem Weg überträgt.

Öffne „Kraft & Weg“. Stelle dieselbe Kraft und denselben Weg ein und wechsle zwischen „In Wegrichtung“, „Senkrecht zum Weg“ und „Gegen den Weg“.

01 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Jede Kraft hat einen eigenen Arbeitsbeitrag

20 N wirken über 3 m

In Wegrichtung
Die betrachtete Kraft verrichtet +60 J Arbeit.

Senkrecht zum Weg
Der Arbeitsbeitrag dieser Kraft beträgt 0 J.

Gegen den Weg
Die betrachtete Kraft verrichtet −60 J Arbeit.

Gleicher Kraftbetrag und gleicher Weg; allein die Richtung verändert den Arbeitsbeitrag.

Wenn eine Kiste gezogen wird, wirken mehrere Kräfte gleichzeitig. Für eine klare Erklärung untersuchst du zuerst **die Arbeit einer bestimmten Kraft**. Die Zugkraft kann Energie übertragen, während Reibung Energie aus der geordneten Bewegung abführt. Bei gleichförmigem Ziehen kann sich beides hinsichtlich der Bewegungsenergie ausgleichen. Die Zugkraft verrichtet trotzdem positive Arbeit. Deshalb bedeutet eine unveränderte Geschwindigkeit nicht, dass überhaupt keine Energie übertragen wird.

Der Arbeitsbeitrag hängt auch von der Richtung ab. Wirkt die Kraft in Wegrichtung, ist ihr Beitrag positiv; wirkt sie dagegen, negativ. Bei genau senkrechter Richtung ist dieser Beitrag null. Diese drei Fälle lassen sich bei gleichem Kraftbetrag und gleichem Weg direkt vergleichen. Ein negatives Ergebnis ist dabei kein Rechenfehler, sondern beschreibt die Richtung der Energieübertragung. Achte außerdem auf die betrachtete Strecke: Wird eine Kiste zuerst hochgehoben und dann waagrecht getragen, sind das zwei verschiedene Abschnitte. Eine gemeinsame Alltagsbeschreibung wie „Tasche tragen“ reicht für eine eindeutige Rechnung noch nicht. **Körper, Kraft, Richtung und Weg** müssen zusammen angegeben werden. Erst danach entscheidest du, welche Formel für diesen Abschnitt passt.

Die **Bewegungsenergie** wächst besonders stark mit der Geschwindigkeit. Bei gleicher Masse besitzt ein doppelt so schneller Körper die vierfache Bewegungsenergie. Beim Bremsen muss entsprechend mehr Energie übertragen werden. Das erklärt, warum eine kleine Geschwindigkeitssteigerung den nötigen Bremsweg deutlich verlängern kann, wenn die Bremskraft ungefähr gleich bleibt. Die Masse wirkt anders: Eine doppelte Masse besitzt bei gleicher Geschwindigkeit doppelt so viel Bewegungsenergie.

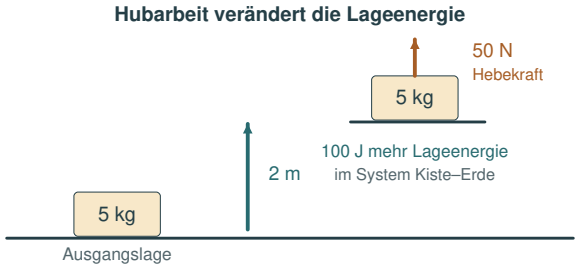
Ein Bremsbeitrag
Eine konstante Bremskraft von 20 N wirkt auf 3 m gegen die Bewegung.
Grundgleichung: $W = -F \cdot s$
Einsetzen: $W = -20\ \text{N} \cdot 3\ \text{m}$
Ergebnis: $W = -60\ \text{J}$
Dieser Arbeitsbeitrag vermindert die Bewegungsenergie. Weitere Kräfte werden getrennt betrachtet.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Wenn die Kiste gleich schnell fährt, wird keine Arbeit verrichtet.
So stimmt es: Die einzelnen Kräfte können gleichzeitig positive und negative Arbeit verrichten. Erst ihre Summe beschreibt die Änderung der Bewegungsenergie.

02 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Beim Heben verändert sich gespeicherte Energie

Dieselbe Kiste kann unten auf dem Boden oder oben im Regal stehen. Zusammen mit der Erde besitzt sie in der höheren Lage mehr gespeicherte Energie. Der Hub verbindet Kraftrechnung und Energiebilanz.



Gleichförmiges Heben einer 5-kg-Kiste um 2 m mit g = 10 N/kg. Die Hebekraft verrichtet 100 J positive Arbeit; die Lageenergie des Systems Kiste-Erde nimmt um 100 J zu.

4 · Die Gewichtskraft bestimmt den ruhigen Hub

Beim gleichförmigen Heben wirkt die Hebekraft nach oben und die Gewichtskraft nach unten. Ihre Beträge sind im einfachen Modell gleich groß. Für die Gewichtskraft gilt $F_G = m \cdot g$. Wir verwenden nahe der Erdoberfläche die Schulnäherung g = 10 N/kg.

Eine Kiste von 5 kg hat damit 50 N Gewichtskraft. Während des gleichförmigen Hubs bleibt ihre Geschwindigkeit konstant. Die Hebekraft verrichtet positive Arbeit, die Gewichtskraft negative Arbeit. Für die Kiste allein gleichen sich diese Arbeitsbeiträge hinsichtlich der Bewegungsenergie aus.

5 · Hubarbeit lässt sich schrittweise berechnen

Wie viel Arbeit verrichtet die Hebekraft, wenn die 5-kg-Kiste um 2 m steigt? Bei gleichförmigem Heben gilt für die positive Hubarbeit:

$W_{Hub} = m \cdot g \cdot h$
$W_{Hub} = 5\ kg \cdot 10\ N/kg \cdot 2\ m$
$W_{Hub} = 100\ J$

Die Höhe h ist der senkrechte Höhenunterschied. Doppelte Masse oder doppelte Höhe ergeben jeweils doppelte Hubarbeit. Die Lageenergie des Systems Kiste-Erde nimmt dabei um 100 J zu. Die Wahl des betrachteten Systems macht diese Energiebeschreibung eindeutig.

6 · Energie kann verschiedene Formen annehmen

Energie kann gespeichert und übertragen werden. Ein fahrender Wagen besitzt Bewegungsenergie; ein angehobener Körper besitzt zusammen mit der Erde Lageenergie. Eine gespannte Feder speichert Energie durch ihre Verformung.

Beim Fallen kann Lageenergie in Bewegungsenergie übergehen. Beim Bremsen wird mechanische Energie unter anderem in innere Energie von Bremsen, Reifen und Umgebung umgewandelt. Dabei bleibt die Gesamtenergie einer passenden Gesamtbetrachtung erhalten. Ein Hebel oder Flaschenzug verändert die benötigte Kraft und den zugehörigen Weg; dieselbe ideale Hubarbeit führt zur gleichen Höhenänderung.

Das gehört zusammen: Kraft erklärt die Wechselwirkung, Arbeit die Energieübertragung und Energie den Zustand eines gewählten Systems. Beim Heben gehören diese Beschreibungen zusammen.

Öffne „Hubarbeit“. Stelle 5 kg Masse und 2 m Höhe ein. Starte den Hub und vergleiche anschließend „Masse verdoppeln“ mit „Höhe verdoppeln“.

02 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Höhengewinn, Bewegungsenergie und Energieerhaltung

Ein Hub als Energieübertragung

1. Ausgangszustand
Die Kiste ruht auf dem Boden.

→

2. Heben
Eine äußere Kraft überträgt Energie.

→

3. Endzustand
Die Kiste ruht höher; Kiste und Erde besitzen mehr Lageenergie.

Für denselben Körper hängt die Änderung der Lageenergie vom Höhenunterschied ab.

Beim Heben sind Anfang und Ende besonders hilfreich: Eine Kiste steht zunächst auf dem Boden und später auf einem Regal. Wenn sie am Anfang und am Ende ruht, ist ihre Bewegungsenergie in beiden Zuständen gleich. Die Lageenergie des **Systems Kiste und Erde** ist jedoch gestiegen. Im idealen Fall entspricht dieser Zuwachs der Hubarbeit. Nicht die gesamte zurückgelegte Strecke entscheidet, sondern der senkrechte Höhenunterschied zwischen Anfang und Ende.

Eine Rampe kann denselben Höhengewinn mit kleinerer Kraft entlang eines längeren Weges ermöglichen. Ohne Reibung wird dadurch keine Hubarbeit gespart. Bei einer rauen Rampe ist sogar zusätzliche Arbeit nötig, die unter anderem die innere Energie erhöht. Auch die Zeit ist eine eigene Frage: Eine Kiste langsam oder schnell auf dasselbe Regal zu bringen verändert die ideale Hubarbeit nicht. Beim echten Anfahren und Abbremsen treten zusätzliche Bewegungsänderungen auf. Die einfache Hubarbeitsrechnung beschreibt deshalb besonders übersichtlich einen Vorgang mit Ruhe am Anfang und am Ende. Diese Trennung hilft beim Übertragen auf andere Themen: **Kraft sparen**, **Energie übertragen** und **schneller arbeiten** beschreiben verschiedene Eigenschaften. Eine gute Erklärung benennt jeweils, was konstant bleibt und welche Größe du veränderst.

Energieübertragung endet nicht automatisch beim sichtbaren Stillstand. Beim Abbremsen eines fallenden Körpers können sich Unterlage und Körper verformen, erwärmen und Schall aussenden. Die mechanische Energie ist dann weniger gut für einen neuen Hub nutzbar, aber die Gesamtenergie verschwindet nicht. Für eine vollständige Betrachtung muss die Grenze deshalb groß genug gewählt werden: Körper, Erde und betroffene Umgebung gehören zu der gemeinsamen Energiebilanz.

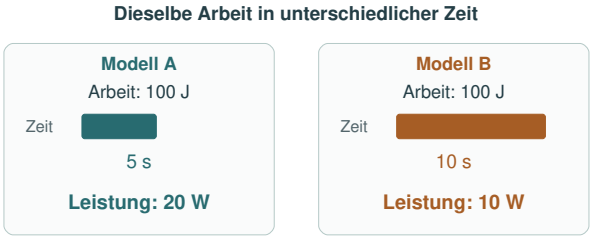
Eine leichte Kiste auf das Regal
Eine Kiste von 2 kg wird um 1,5 m gehoben. Verwende g = 10 N/kg.
Grundgleichung: $W_{Hub} = m \cdot g \cdot h$
Einsetzen: $W_{Hub} = 2\ kg \cdot 10\ N/kg \cdot 1{,}5\ m$
Ergebnis: $W_{Hub} = 30\ J$
Das gilt für den idealen Hub.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Mit einem Flaschenzug braucht derselbe Hub weniger Energie.
So stimmt es: Ein idealer Flaschenzug senkt die Zugkraft und verlängert den Zugweg. Für dieselbe Last und Höhe bleibt die Hubarbeit gleich.

03 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Die Zeit macht aus Arbeit eine Leistung

Zwei Modelle heben dieselbe Last auf dieselbe Höhe. Beide verrichten dieselbe Hubarbeit. Das schnellere Modell überträgt in jeder Sekunde durchschnittlich mehr Energie und hat die größere Leistung.



Gleiche Arbeit von 100 J bei zwei Zeiten: Modell A benötigt 5 s, Modell B 10 s. Die Leistungswerte sind Mittelwerte über den gesamten Vorgang.

7 · Leistung ist Arbeit je Zeit

Die **mittlere Leistung** beschreibt die verrichtete Arbeit geteilt durch die benötigte Zeit. Ihr Formelzeichen ist P. Die Einheit heißt **Watt**, abgekürzt W. Ein Watt entspricht einem Joule je Sekunde. Beispiel: 100 J Hubarbeit werden in 5 s verrichtet.

P = W : t
P = 100 J : 5 s
P = 20 W

Bei derselben Arbeit in 10 s beträgt die mittlere Leistung 10 W. Die kürzere Zeit ergibt die größere Leistung. Das W als Formelzeichen für Arbeit unterscheidest du vom Einheitenzeichen W hinter einem Leistungswert.

8 · Reale Geräte verteilen die zugeführte Energie

Ein Motor nimmt Energie auf und gibt davon einen Teil als gewünschte Nutzarbeit ab. Weitere Anteile gelangen zum Beispiel als innere Energie in Motor und Umgebung. Der **Wirkungsgrad** ist der Anteil der aufgenommenen Energie, der für den betrachteten Zweck nutzbar wird.

Beispiel: Ein Motor nimmt 200 J auf und liefert 100 J Hubarbeit. Der Wirkungsgrad wird mit η bezeichnet.

η = Nutzarbeit : zugeführte Energie
η = 100 J : 200 J
η = 0,5 = 50 %

Die übrigen 100 J treten in anderen Energieformen auf. Leistung und Wirkungsgrad beschreiben unterschiedliche Eigenschaften des Geräts.

9 · Vorgänge mit drei Fragen vergleichen

Frage zuerst nach dem gewünschten Ergebnis: Welche Last soll auf welche Höhe gelangen? Bestimme dann die Arbeit mit passenden Kräften und Wegen. Frage anschließend nach der Zeit, um die mittlere Leistung zu berechnen. Erst danach ergänzt du Verluste und Wirkungsgrad eines realen Geräts.

Dieses Vorgehen verbindet Mechanik mit Alltag und Biologie. Ein Mensch setzt chemische Energie aus Nahrung um und verrichtet damit unter anderem mechanische Arbeit. Seine gesamte Energieumsetzung umfasst zusätzlich Wärmeabgabe und Lebensvorgänge. Eine Modellrechnung beschreibt jeweils den ausdrücklich ausgewählten Anteil.

Das gehört zusammen: Arbeit beschreibt die übertragene Energie, Leistung deren Übertragung je Zeit und Wirkungsgrad den nutzbaren Anteil. Diese Größen beantworten unterschiedliche Fragen.

Fachbücher und Quellen stehen auf Seite 7. Die Onlinefassung verlinkt außerdem die passenden Lehrbuchkapitel.

03 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Leistung und Wirkungsgrad getrennt beurteilen

Gleiche Arbeit, verschiedene Zeiten

Modell A
100 J in 5 s → mittlere Leistung 20 W

Modell B
100 J in 10 s → mittlere Leistung 10 W

Gemeinsames Ergebnis
Gleiche Last erreicht dieselbe Höhe; die Hubarbeit bleibt 100 J.

Nur die Hubzeit wird verändert. Der Vergleich sagt nichts über den Wirkungsgrad realer Antriebe aus.

Zwei Motoren können dieselbe Last auf dieselbe Höhe heben und dafür unterschiedlich lange brauchen. Der schnellere Motor überträgt die nötige Energie in kürzerer Zeit. Seine **mittlere Leistung** ist größer. Das ist eine Aussage über das Tempo der Energieübertragung. Sie sagt zunächst nichts darüber, wie viel zugeführte Energie zusätzlich an die Umgebung gelangt. Dafür brauchst du den **Wirkungsgrad** und eine klare Angabe, welche Energie als Nutzen zählt.

Ein langsames Gerät kann einen hohen Wirkungsgrad besitzen; ein leistungsstarkes Gerät kann ebenfalls sparsam oder verschwenderisch arbeiten. Für einen fairen Vergleich hältst du den gewünschten Nutzen fest: etwa dieselbe Kiste auf demselben Regal. Dann vergleichst du benötigte Zeit und Energiezufuhr getrennt. Bei gleicher Hubarbeit und verschiedenen Zeiten ergeben sich unterschiedliche Leistungen. Wenn du anschließend die Masse oder Höhe veränderst, ändert sich auch die Arbeit. Du untersuchst dann eine andere Frage. Achte außerdem auf die Einheiten: Joule oder Kilowattstunden beschreiben Energie, Watt oder Kilowatt beschreiben Leistung. Eine große Leistung über eine kurze Zeit kann dieselbe Energiemenge übertragen wie eine kleine Leistung über eine längere Zeit.

Die Einheit **Kilowattstunde** verbindet Leistung und Zeit. Ein Gerät mit konstant 1 kW Aufnahmeleistung nimmt in einer Stunde 1 kWh Energie auf. Eine Kilowattstunde entspricht 3,6 Millionen Joule. Ein Gerät mit 2 kW braucht für dieselbe Energiemenge eine halbe Stunde. Bei wechselnder Leistung müssen die Beiträge der einzelnen Zeitabschnitte berücksichtigt werden. Die Angabe auf einem Gerät beschreibt daher nicht allein seinen gesamten Energieverbrauch.

Die schnellere Ausführung
Für 100 J Hubarbeit benötigt Modell A 5 s.
Grundgleichung: P = W : t
Einsetzen: P = 100 J : 5 s
Ergebnis: P = 20 W
Bei doppelter Zeit wären es 10 W. Die Arbeit bleibt dabei in beiden Fällen 100 J.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Mehr Leistung bedeutet automatisch weniger Energieverbrauch.
So stimmt es: Leistung beschreibt Energie je Zeit. Für den Energiebedarf bei gleichem Nutzen ist zusätzlich wichtig, wie effizient das Gerät die zugeführte Energie nutzt.

Wissen anwenden und weiterdenken

Drei ergänzende Entdeckeraufträge. Erkläre deine Beobachtungen mit den Zusammenhängen aus dem Wissenstext.

1 · Kraft & Weg

Ausprobieren: Stelle 20 N und 3 m ein. Wechsle zwischen „In Wegrichtung“, „Senkrecht zum Weg“ und „Gegen den Weg“.

Beobachten: Vergleiche das Vorzeichen und den Betrag der Arbeit.

Erklären: Warum sagt die Zahl 20 N allein noch nicht, wie viel Arbeit diese Kraft verrichtet?

Modellgrenze: Die Kraft ist konstant; das Modell zeigt ihren Beitrag und keine vollständige Energiebilanz eines Motors.

2 · Hubarbeit

Ausprobieren: Stelle 2 kg und 1,5 m ein. Vergleiche „Masse verdoppeln“ mit „Höhe verdoppeln“, jeweils aus derselben Ausgangslage.

Beobachten: Lies ab, wie sich die Hubarbeit in beiden Fällen verändert.

Erklären: Warum führen beide Änderungen zur doppelten Hubarbeit?

Modellgrenze: Start, Stopp und Reibung sind vereinfacht; die Rechnung verwendet den konstanten Ortsfaktor 10 N/kg.

3 · Leistung vergleichen

Ausprobieren: Wähle gemeinsame Masse 5 kg und Höhe 2 m. Stelle 5 s für A und 10 s für B ein; starte beide Modelle.

Beobachten: Vergleiche die Hubarbeiten und mittleren Leistungen nach dem Hub.

Erklären: Welche Größe erklärt den Unterschied, obwohl beide dieselbe Arbeit verrichten?

Modellgrenze: Der Vergleich ist idealisiert und berechnet keine realen elektrischen Verluste der Antriebe.

Interaktive Werkstatt öffnen →

Fachliche Quellen und weiterführende Literatur

College Physics 2e