Die folgenden Stichworte und auch die handgezeichneten Abbildungen sind zum größten Teil Lehrmaterial, welches Prof. William Brewer erstellt hat (Prof. William D. Brewer, FB Physik, FU Berlin). Herzlichen Dank dafür an Prof. Brewer.

Traditionelle Einteilung der Physik

1. **Mechanik**
(Grundbegriffe der Physik: Kräfte, Energie, Bewegungen, ..)

2. **Wärmelehre** (Thermodynamik, statistische Mechanik)

3. **Elektrizität und Magnetismus**

4. **EM-Wellen und Optik**

5. **Aufbau der Materie / Moderne Physik** (Quantenphysik, Atome und Moleküle, Röntgenstrahlung, Radioaktivität)

Mechanik

Die Mechanik behandelt **Bewegungen**, ihre Abläufe und ihre Erzeugung. Sie hat etliche Anwendungen in den biomedizinischen Wissenschaften, aber noch wichtiger, sie bietet eine recht anschauliche Grundlage für die restliche Physik sowie Beispiele für die Anwendung der 'wissenschaftlichen Methode'.

Sie ist deshalb vergleichsweise anschaulich, weil unsere täglichen Erfahrungen mit mechanischen Abläufen gemacht worden sind, wir haben alle dafür ein 'Gefühl'.

Zunächst einen Überblick über **physikalische Größen** und **Basiseinheiten**:

Basisgrößen, abgeleitete Größen

Die Physik --wie die anderen Naturwissenschaften-- ist eine *messende Wissenschaft*-- sie beschäftigt sich ausschließlich mit quantitativ, reproduzierbar meßbaren Größen, sogenannten **physikalischen Größen**, die als Produkt einer **Maßzahl** mit einer **Einheit** definiert sind:

Physikalische Größe = Maßzahl × Einheit.

Die **Maßzahl** ist das (numerische) Ergebnis einer Messung oder Berechnung (oft mit *Meßfehler* oder *Unsicherheit* versehen); die **Einheit** legt die Meßskala fest durch ein **verabredetes Meßverfahren** (*Grundgröße, Basiseinheit*) oder als **Kombination** von schon definierten Einheiten (*abgeleitete Größe oder Einheit*). Die abgeleiteten Einheiten haben oft Eigennamen.

Beispiele:

Länge oder Strecke s:	s = 1,55 (± 0,05) m	(m = Meter)
elektrische Stromstärke I:	I = 23.2 A	(A = Ampère)
Geschwindigkeit v:	v = 55 km/h	(= Kilometer/Stunde)
elektrische Spannung U:	U = 220 V	(V = Volt = J/As)

Das SI-Maßsystem

Das z.Zt. international gültiges **Maßsystem** ist das *Système International d'Unités* (kurz **SI**), welches *sieben* Grundgrößen mit entsprechenden Basiseinheiten definiert:

Grundgröße	Basiseinheit	Realisierung (Genauigkeit)	Bemerkungen
Länge *l* (*s*,*d*)	Meter (m) (auch mm,µm, nm, km...)	Wellenlänge eines Jod-stabilisierten He-Ne Lasers (2×10^{-9})	Lichtgeschwindigkeit c = 299 792 456,2 m/s; $c = \lambda\, \nu$
Zeit *t*	Sekunde (s) (auch ms, µs, ns, min., h, d...)	^{133}Cs Frequenz ν_{Cs} ; CH_4-stabilisierter He-Ne-Laser ($< 10^{-11}$)	Übertragung auf Quarzuhren
Masse *m*	Kilogramm (kg) (auch g, mg, µg, t...)	Massenprototyp (ca. 10^{-8})	
elektrische Stromstärke *I*	Ampère (A)	Magnetische Spulen-waage ($< 10^{-6}$) (neu: Quanten-Halleffekt)	(auch Spannungs-normale)
Lichtstärke *S*	Candela (cd)	Hohlraumstrahler (ca. 2×10^{-3}) (neu: Synchrotronstrahlung)	Übertragung auf Glüh-lampen
Temperatur *T*	Kelvin (K) (1°C = 1 K)	absoluter Nullpunkt: 0 K; Tripelpunkt von H_2O: 273,15 K (typ. 10^{-4})	Fixpunkte
Stoffmenge ν	Mol (mol) 1 mol = N_A Teilchen	Röntgenstreuung-- Si Einheitszelle (10^{-6})	

Aus diesen sieben Grundgrößen werden alle anderen (abge-leiteten) Größen zusammengesetzt.

Beispiele:

Geschwindigkeit: v = Strecke/Zeit, ds/dt ; Einheit $[v]$ = m/s

kinetische Energie: $E_{kin} = (m/2)\,v^2$; Einheit $[E_{kin}]$ = kg m²/s² ≡ **J**oule

Üblicherweise beginnt man das Studium der Mechanik mit der **Kinematik**, d.h. mit der Beschreibung von Bewegungen. Dies ist z.T. in der Einführung gemacht worden. Wir werden zunächst einen Überblick der verschiedenen Bewegungsformen geben, dann die Kinematik der ***geradlinigen Bewegung*** zusammenfassen:

Drei einfache Bewegungsformen

1. die **geradlinige** Bewegung (auch lineare oder Translationsbewegung genannt):

Das bewegte Objekt läuft eindimensional entlang einer Geraden. Die Bewegung kann gleichförmig (mit konstanter Geschwindigkeit) oder beschleunigt sein. Beinhaltet **kinetische** (Translations-) Energie.

2. die ebene **Kreisbewegung** (auch Dreh- oder Rotationsbewegung genannt):

Das bewegte Objekt läuft auf einer Kreisbahn (Radius = konstant). Der Betrag der Bahngeschwindigkeit kann konstant bleiben (bei der *gleichförmigen* Kreisbewegung), jedoch ändert sich ständig ihre **Richtung** (Radial- oder Zentripetalbeschleunigung). Beinhaltet **Rotations**energie.

3. die **Schwingung** (auch Oszillation, Vibration genannt):

Das bewegte Objekt läuft hin und her um einen festen Punkt, die Bewegung wiederholt sich zyklisch (nach der **Schwingungsdauer**). Einfachste Art: die Bewegung beschreibt eine Sinus- oder Kosinusfunktion (harmonische Schwingung). Beschleunigungen treten in jedem Zyklus auf, die Energie wechselt hin und her zwischen kinetischer und potentieller Energie.

Eine Bewegung kann oft vorteilhaft als **Überlagerung** dieser drei Bewegungsformen beschrieben werden.

Kinematik: Beschreibung der Bewegung selbst: Ort, Zeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung

Dynamik: Ursache der Bewegung: Kräfte, Wechselwirkungen

Wir beginnen mit der

Kinematik der geradlinigen Bewegung

Zur Beschreibung einer Bewegung, d.h. für die **Kinematik**, brauchen wir die *Zeitabhängigkeit* von drei Größen: vom *Ort* (*Strecke*) *s* (*s*-*t*-Diagramm), von der *Geschwindigkeit v* (*v*-*t*-Diagramm) sowie von der *Beschleunigung a* (*a*-*t*-Diagramm).

Um vom *s*-*t*-Diagramm zum *v*-*t*-Diagramm zum *a*-*t*-Diagramm zu gelangen, nehmen wir jeweils die **zeitliche Ableitung** (geometrisch: die **Steigung** der Kurve):

$$v(t) = \mathrm{d}s/\mathrm{d}t,$$
$$a(t) = \mathrm{d}v/\mathrm{d}t = \mathrm{d}^2 s/\mathrm{d}t^2$$

[der letzte Ausdruck heißt 'zweite zeitliche Ableitung von *s* nach *t* , die Ableitung wird zweimal verwendet. Dies ist die **Krümmung** der Kurve *s(t)*.]

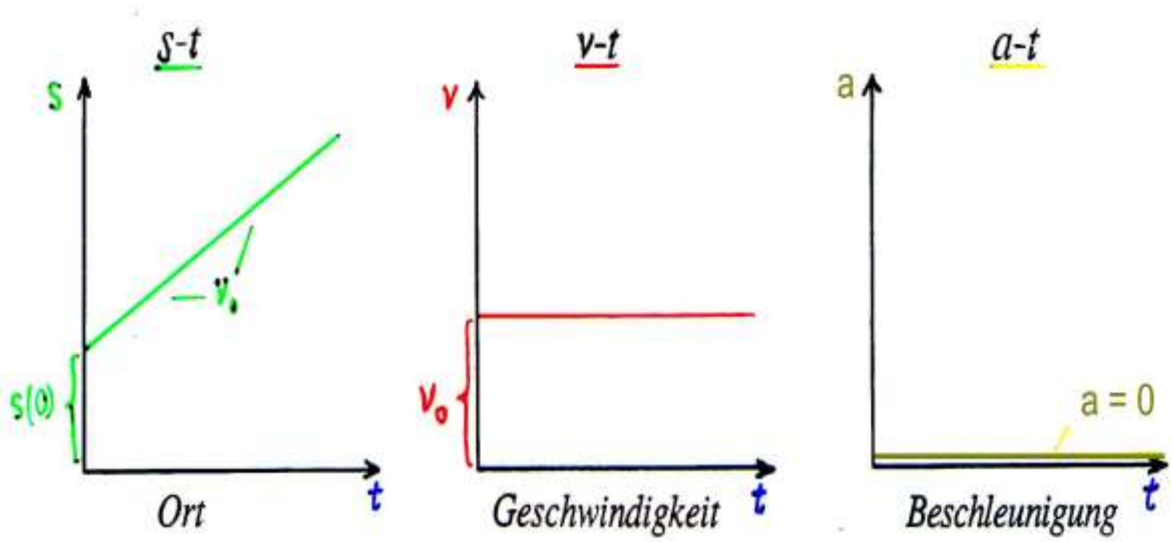
In umgekehrter Richtung, vom *a*-*t*-Bild zum *v*-*t*-Bild zum *s*-*t*-Bild, verwenden wir die *Umkehrung* der Ableitung, d.h. die **Integration** (geometrisch: die **Fläche** unter der jeweiligen Kurve):

$$v(t) = \int a\, dt,$$

$$s(t) = \int v\, dt.$$

1. Der einfachste Fall ist die **geradlinige, gleichförmige Bewegung**. Die *Geschwindigkeit* $v = v_o$ = **konstant**, sie ist die '*Konstante der Bewegung*'. Die Beschleunigung verschwindet:

$$a(t) = \mathrm{d}v_o/\mathrm{d}t = 0.$$

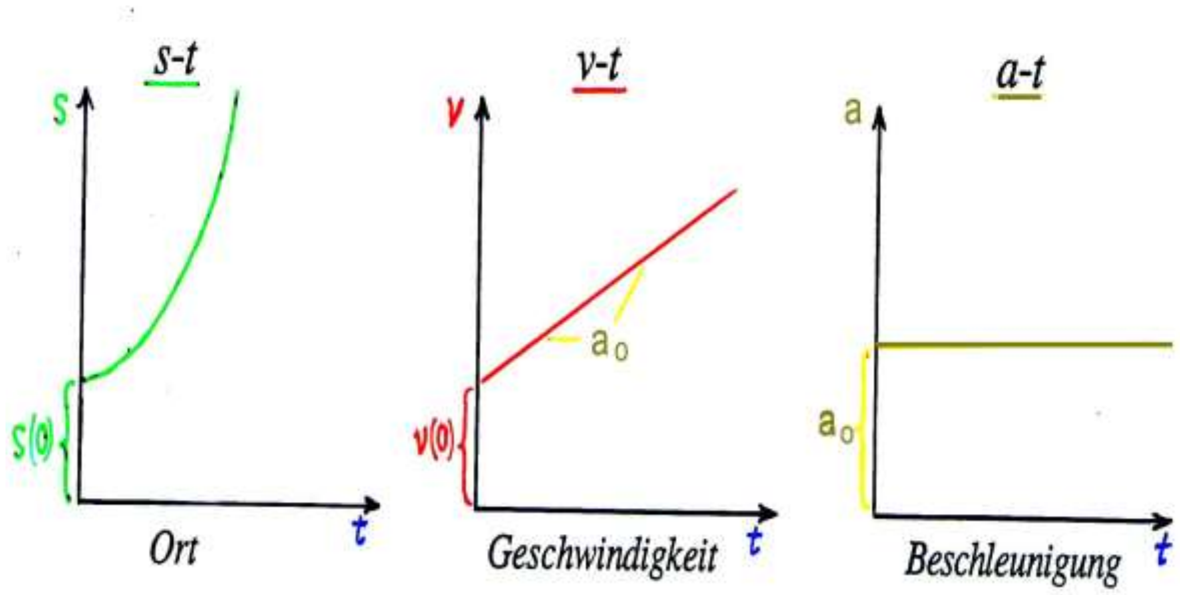


Das Integral $\int v\,dt$ (Rechteckfläche) ergibt

$$s(t) = v_o t + s(0).$$

Der Ort wächst linear mit der Zeit. Die Konstante *s(0)* (Anfangsort) ist eine Anfangsbedingung (Integrationskonstante). Mathematisch ist $s(t) = v_o t + s(0)$ die *Lösung der Bewegungsgleichung* $v(t) = \mathrm{d}s/\mathrm{d}t$, mit $v(t) = v_o$.

2. Der zweit-einfachste Fall ist die ***geradlinige, gleichmäßig beschleunigte Bewegung:*** Die **Beschleunigung** ***a*** = a_o = **konstant**, sie ist nun die 'Konstante der Bewegung':



Das Integral $\int a\, dt$ (Rechteckfläche) ergibt $v(t) = a_o t + v(0);$ die <u>Geschwindigkeit</u> wächst nun linear mit der Zeit. Die Konstante *v(0)* (Anfangsgeschwindigkeit) ist wieder eine <u>Anfangsbedingung</u>. Eine weitere Integration der *v-t*-Kurve (Dreiecksfläche) ergibt

$$s(t) = a_o t^2/2 + v(0)t + s(0).$$

Diese *Lösung der Bewegungsgleichung* $a(t) = a_o = d^2s/dt^2$ enthält nun <u>zwei</u> Integrationskonstanten, die Anfangsbedingungen *s(0)* und *v(0)*, wegen der *zweimaligen* Integration. Die Zeit-abhängigkeit des Orts *s(t)* ist **parabelförmig**.

Ein <u>Beispiel</u> der geradlinigen, gleichförmig beschleunigten Bewegung ist die **Fallbewegung** eines Körpers durch die Schwerkraft der Erde.

3. Der **allgemeine** Fall entspricht einer *zeitabhängigen Beschleunigung a(t)*. Die Lösung erfolgt im Prinzip wie oben beschreiben, entweder grafisch (Integral als Fläche unter der Kurve!) oder mathematisch durch Lösen der Bewegungsgleichung $a(t) = d^2s/dt^2$ (Differentialgleichung 2. Ordnung). Die *Form* der Lösung hängt von der speziellen Zeitabhängigkeit *a(t)* ab.

---

die geradlinige Bewegung --kinematische Größen

--alle Größen stehen parallel zueinander, wir können auf die *Vektorschreibweise* verzichten! (Ansonsten werden Vektorgrößen hier mit **Fettdruck** gekennzeichnet: ***s*** = Strecke als **Vektor**, *s* oder |***s***| = **Betrag** der Strecke.)

s*(t)* **=** Bewegungsstrecke [auch ***x****(t)* genannt; i.a. ein *Vektor*] **(m)**
v*(t)* **=** Geschwindigkeit = d***s***/d*t* (m/s): Steigung der s-t-Kurve
a*(t)* **=** Beschleunigung = d***v***/d*t* = d²***s***/d*t*² (m/s²): Krümmung der s-t-Kurve

---

Bewegungsgleichungen und deren Lösungen

gleichförmige Bewegung: $v(t) = v_o$; $ds/dt = v_o$;

Lösung: $s(t) = v_o t + s(0)$

v_o : Konstante der Bewegung
$s(0)$: Anfangsbedingung

---

gleichmäßig **beschleunigte** Bewegung: $a(t)=a_o$; $d^2s/dt^2 = a_o$;

Lösung: $s(t) = (a_o/2)t^2 + v(0)t + s(0)$

a_o : Konstante der Bewegung $s(0), v(0)$: Anfangsbedingungen

---

Dynamik der geradlinigen Bewegung

Newton'sche Axiome

Newton, bauend auf die Ergebnisse *Galileis*, stellte drei **Axiome** auf, welche die Dynamik von Bewegungen allgemein und insbesondere der geradlinigen Bewegung beschreiben:

1. **Trägheitsprinzip** – ein (massives) Objekt, worauf **keine Kräfte** wirken, beharrt in seinem jeweiligen Zustand der **geradlinigen, gleichförmigen** Bewegung.

2. **Aktionsprinzip** --wenn eine Kraft $\boldsymbol{F}$ auf eine Masse m wirkt, erzeugt sie eine Beschleunigung $\boldsymbol{a}$, nach

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}.$$

3. ***actio = reactio*** – eine wirkende Kraft $\boldsymbol{F}$ ruft immer eine gleich große, entgegengerichtete **Gegen**kraft (Reaktionskraft) $\boldsymbol{F}_R = -\boldsymbol{F}$ hervor.

Die *Newton*'sche **Bewegungsgleichung**

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$$

kann als **Definition** der **Kraft** angesehen werden ("wenn eine Masse m eine Beschleunigung a erfährt, wirkt auf sie eine Kraft F nach $F = ma$").

Sie kann aber auch als Spezialfall des 3. Axioms interpretiert werden, wobei die Reaktionskraft hier die **Trägheitskraft** der (Trägen-) Masse m darstellt.

Sie ist eine **Differentialgleichung** (a = zweifache zeitliche Ableitung vom Ort s), die eine Bewegung mathematisch beschreibt.

Beispiele für **Kräfte:**

fundamentale Kräfte

Kernbindungskraft --wirkt zwischen ***Nukleonen***	**sehr stark**, sehr **kurze Reichweite**
Coulombkraft --wirkt zwischen elektrischen ***Ladungen***	**mittelstark**, **mittlere Reichweite**
[magnetische Kraft] --wirkt zwischen ***bewegten*** Ladungen	[relativistische **Korrektur** zur Coulombkraft]
schwache Kraft --wirkt zwischen Nukleonen und Elektronen (β -Zerfall)	sehr schwach, sehr **kurze Reichweite**
Gravitationskraft --wirkt zwischen (Schwere-) ***Massen***	extrem **schwach**,sehr **lange Reichweite**

---

makroskopische Kräfte

Kohäsionskraft	Zusammenhalt der Materie
Adhäsionskraft	'Zusammenkleben' verschiedener Materialien
elastische Kräfte	Widerstand fester Materie gegen *Verformung*
Reibungskräfte	Widerstand der Materie gegen *Bewegung*
Trägheitskräfte	Gegenkraft der (trägen) Masse gegen *Beschleunigung*
Zwangskräfte	Kräfte, die eine Bewegung *einschränken*

Nun schauen wir einen wichtigen Begriff an, der Anwendung in vielen Gebieten der Naturwissenschaften findet, den wir auch schon (ohne genaue Definition) verwendet haben, nämlich den Begriff der

Energie.

Historisch ist der Energiebegriff relativ neu; er ist aus dem Begriff der **Arbeit** abgeleitet worden, der schon am Anfang der Mechanik zur Zeit *Newton*s stand. Wir schauen uns deshalb die Begriffe

Arbeit, Energie, Leistung

in dieser Reihenfolge an. Alle drei Worte hört man häufig in der Umgangssprache, wo sie jedoch keine genaue Definition haben oder vielmehr mit verschiedenen Bedeutungen eingesetzt werden. In der Physik haben sie präzise Definitionen im Sinne der Einführung ('physikalischer Begriff': genau und wiederholbar zu messen, durch Mathematik zu behandeln).

Definition der (mechanischen) Arbeit

Mechanische Arbeit beschreibt die Wirkung einer Kraft F, die eine Bewegung erzeugt. Diese Wirkung ist proportional der Stärke der Kraft und auch proportional der Länge der Bewegungsstrecke s. Wir definieren deshalb die Arbeit W mit

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Strecke}$$

oder

$$W = F \cdot s\ .$$

Einheit der Arbeit: nach der obigen Definition hat die Arbeit die gleiche Einheit wie [Kraft × Strecke]. Die Einheit der Kraft F folgt aus $F = ma$ als

$$[F] = [m][a] = \text{kg (m/s)/s} = \text{kg m/s}^2 = \underline{\textbf{N}}\text{ewton}\ .$$

Damit ist die Einheit der Arbeit gleich Newton × meter = Nm = kg m^2/s^2 .
Diese Einheit erhält auch einen eigenen Namen, **J**oule:

$$1\ \text{J} = 1\ \text{Nm} = 1\ \text{kg m}^2/\text{s}^2\ .$$

Wir haben sie schon in Zusammenhang mit der Energiedosis und der Äquivalentdosis benutzt.

Nun gibt es einige **Feinheiten**, die in manchen Fällen die Definition der Arbeit noch komplizierter machen, als sie oben erscheint:

1. Die Größen **Kraft** und **Strecke** sind beide gerichtete Größen (***Vektoren***); sie haben sowohl einen Betrag $|F|,|s|$ als auch eine Richtung. Falls die Richtungen nicht übereinstimmen, ist nur die Kraftkomponente $F_{//}$ **parallel** zur Strecke wirksam bei der Berechnung der Arbeit. Wir müssen das Produkt $F \times s$ so definieren, daß nur diese Komponente berücksichtigt wird, und aus einem Produkt zweier Vektorgrößen eine ***skalare*** Größe machen. Genau dies tut das **Skalarprodukt**:

$$W = \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{s} = |F||s| \cos \varphi \;= F_{//}\, |s|$$

(wo φ den Winkel zwischen den Vektoren $\boldsymbol{F}$ und $\boldsymbol{s}$ bezeichnet).

---

2. Die Kraft ist nicht immer **konstant** über die Strecke s. Wir müssen einen geeigneten *Mittelwert* finden, um das Produkt von Kraft und Strecke zu berechnen. Dies ist möglich, wenn wir die Strecke s in vielen, beliebig kurzen **differentiellen Teilstrecken** ds aufteilen; in jeder Teilstrecke ist F dann annähernd konstant, es gilt:

$$\mathrm{d}W = \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s}$$

für die entsprechende **differentielle** Arbeit dW. Um die gesamte Arbeit über die Strecke s_o zu erhalten, müssen wir integrieren (Integrieren entspricht Summieren über alle Teilstrecken d**s**):

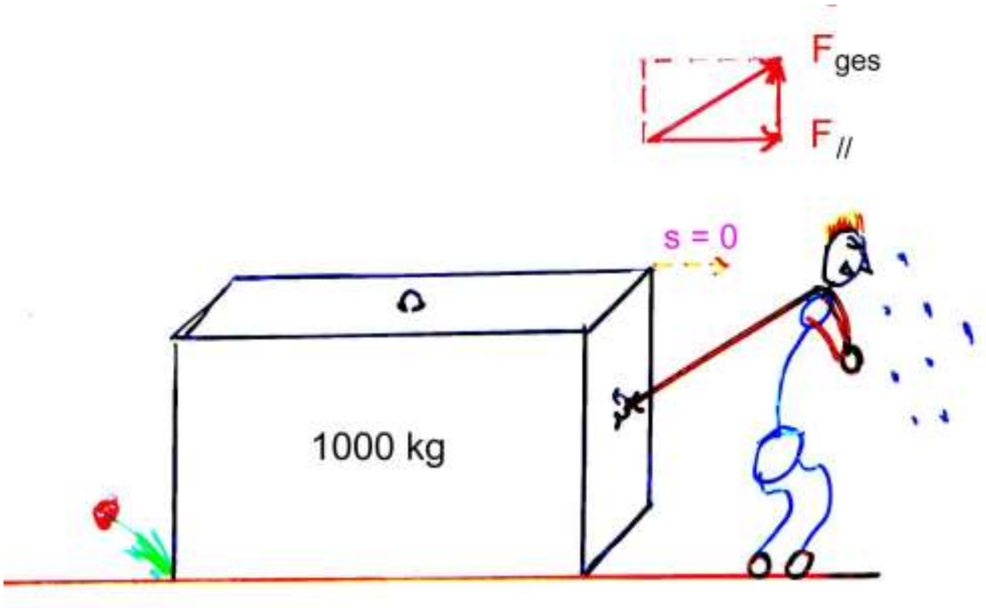
$$W\,(s_o) = \int \mathrm{d}W = \int \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s}.$$

Dies ist die **allgemeine** Definition der Arbeit. Wir schauen nun einige Beispiele an.

Beispiel: Die Bewegung des großen Steins

Ein Mensch wird damit beauftragt, einen großen Steinblock von einem Ort zu einem anderen zu bewegen. Er fängt optimistisch an...

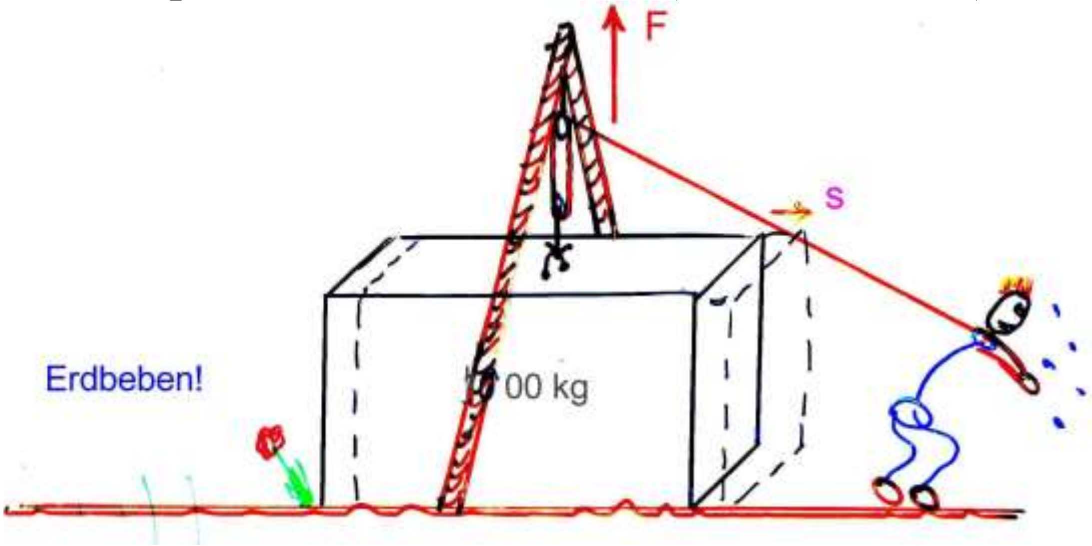
Tag 1: die Kraft reicht einfach nicht aus...



Eine parallele Kraft $F_{//}$ ist da, sie reicht aber nicht aus, die Strecke s bleibt Null. Damit ist die **physikalische** **Arbeit** gleich Null; die **physiologische** Arbeit ungleich Null; und die **Lohnarbeit** (vermutlich) gleich Null

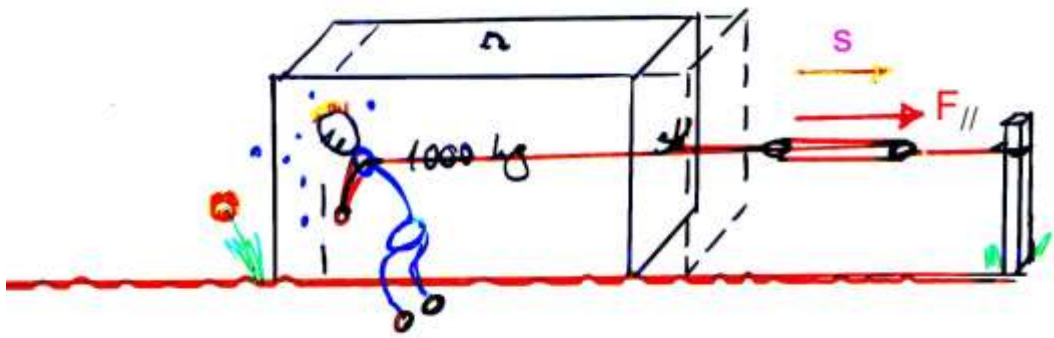
---

Tag 2: ein anderer Versuch (mit Erdbeben...)



Eine parallele Kraft $F_{//}$ ist **nicht** vorhanden. Durch Zufall ergibt sich eine Bewegungsstrecke in der erwünschten Richtung, die aber nicht durch die Arbeit des Menschen zustande kam. Daher ist die **physikalische Arbeit** gleich Null; die **physiologische** Arbeit ungleich Null; und die **Lohnarbeit** ungleich Null (vielleicht).

Tag 3: endlich der richtige Weg...



Eine parallele Kraft $F_{//}$ **und** eine Bewegungsstrecke sind vorhanden, die Kraft hat die Bewegung (gegen Reibungskräfte) verursacht. Daher ist die **physikalische Arbeit** ungleich Null; die **physiologische** Arbeit ungleich Null; und die **Lohnarbeit** ungleich Null.

Drei Arten der mechanischen Arbeit

Es ist hilfreich, die mechanische Arbeit zu klassifizieren nach den Bedingungen, unter denen sie geleistet wird:

---

1. **Beschleunigungsarbeit** --der einfachste Fall ist der, daß keine weiteren Kräfte (außer der 'äußeren' Kraft $\boldsymbol{F}$) wirken. Dann erzeugt die Kraft $\boldsymbol{F}$ eine Bewegung der Masse m, ausgedrückt durch die Newton'sche Gleichung $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ ($\boldsymbol{a}$ = Beschleunigung = $\mathrm{d}\boldsymbol{v}/\mathrm{d}t$). Die Beschleunigung $\boldsymbol{a}$ (und die Bewegungsstrecke $\boldsymbol{s}$) sind nun parallel zur Kraft $\boldsymbol{F}$. Wir können die (differentielle) Arbeit schreiben als:

$$\mathrm{d}W = \mathbf{F}\cdot\mathrm{d}\mathbf{s} = ma\,\mathrm{d}s = m(\mathrm{d}v/\mathrm{d}t)\mathrm{d}s = m\mathrm{d}v(\mathrm{d}s/\mathrm{d}t) = mv\mathrm{d}v\ .$$

Die gesamte Arbeit, für eine Beschleunigung vom Stand ($v = 0$) bis zu einer Endgeschwindigkeit $v = v_o$ ist gegeben durch **Integration** von $\mathrm{d}W$:

$$\mathrm{W}(0 \rightarrow v_o) = \int \mathrm{d}W = m \int v\mathrm{d}v = (m/2)v_o^2\ .$$

(Das Integral kann durch Anwendung der Potenzregel oder grafisch als Fläche unter der Kurve $y = v$ gelöst werden.)

Die Beschleunigungsarbeit ändert den **Bewegungszustand** des Objektes der Masse m, sie wird in dem Zustand (Bewegung mit Geschwindigkeit v_o) **gespeichert**.