WALTER BERNARD

FIZIKO

BAZA KURSO

UNUA PARTO

ESPERANTO-KLUBO
SUDTIROLO

WALTER BERNARD

FIZIKO

BAZA KURSO

UNUA PARTO

ESPERANTO-KLUBO
SUDTIROLO

Enhavo

1 Ĝeneralaj fundamentoj

1.1 Naturscienca labormetodo

Fiziko estas naturscienco. Ĝi okupiĝas pri feno--menoj en la naturo kaj serĉas leĝojn, kiuj priskribas la kaŭzojn de tiuj fenomenoj.

Ĝis la fino de mezepoko la leĝoj plej ofte estis formulataj nur baze de simpla observado kaj rezonado. La valideco de la leĝoj formulataj ne estis kontrolata pere de eksperimentoj.

Ekde la tempo de Galileo Galilei ([1]) oni uzas modernan natursciencan labormetodon, kiu kon--trolas la validecon de la leĝoj supozitaj pere de taŭgaj eksperimentoj.

La skemo de tiu metodo estas ilustrata flanke.

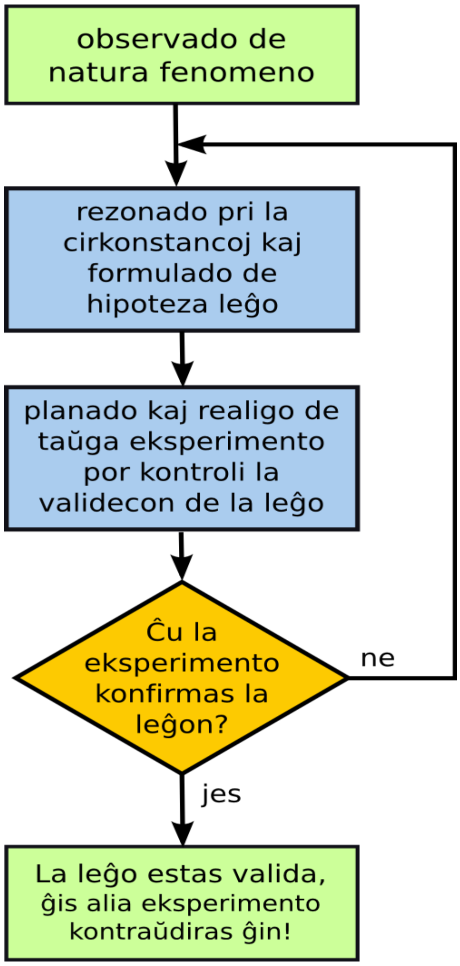


Fig. 1.1: Fluskemo de la naturscienca labormetodo

Ekzemplo:

Fenomeno observata: Ŝtono falas pli rapide ol plumo.
Rezonado: La ŝtono estas pli peza ol la plumo.
Do la leĝo povus esti:

> *Ju pli peza iu korpo estas, des pli rapide ĝi falas.*
>
> ***(erara leĝo!)***

Tio estas la leĝo, kiu estis formulata de la greka filozofo Aristotelo ([2]) en la kvara jarcento a.K. En la sekvantaj jarcentoj, neniu vere kontrolis la validecon de tiu simple formulata leĝo.

Nur je la fino de la 16-a jarcento, Galileo Galilei decidis kontroli validecon de la leĝo formulita de Aristotelo farante taŭgajn eksperimentojn.

Ankaŭ vi povas facile fari simplan eksperimenton por kontroli, ke la leĝo de Aristotelo ne validas.

Eksperimento 1.1

Prenu peceton de paperfolio kaj moneron. Lasu ilin fali samtempe kaj vi tuj vidas, ke la monero falas pli rapide.
Post tio faru globeton el la papero kaj refaru saman eksperimenton. Vi vidas, ke nun la globeto el papero kaj la monero falas al grundo en proksimume sama tempo. Tio montras, ke la faltempo ne dependas de la pezo de korpo.

1 Galileo **Galilei** (esperante Galilejo, 1564-1642) estis tre grava itala sciencisto. Li okupiĝis pri matema--tiko, fiziko kaj astronomio. Malsimile al la antikvuloj, li ne nur observis kaj pensis logike pri naturo, sed ankaŭ faris eksperimentojn kaj aplikis matematikon al sia observado.

2 **Aristotelo** (helene: Αριστοτέλης, *Aristoteles,* 384 – 322 a.K.) estis grava greka filozofo kaj unu el la fondintoj de okcidenta filozofio kaj scienco.

La paperfolieto falas pli malrapide nur, ĉar la rezisto de aero bremsas ĝin. Se vi faras globeton, ĝi falas kun preskaŭ sama rapido, kiel la pli peza monero.

Do la nova leĝo povus esti:

Sen rezisto de aero ĉiuj korpoj falas kun sama rapido.

Oni povas kontroli tiun ĉi leĝon farante eksperimenton kun vakuigita tubo, kiu enhavas moneron kaj plumon.

Kiam la tubo estas plena de aero, la monero falas pli rapide ol la plumo, sed kiam oni vakuigas la tubon eltirante la tutan aeron, oni vidas, ke plumo kaj monero falas kun sama rapido. Do la eksperimento konfirmas, ke la leĝo validas.

Eksperimento en vakuo estis farita ankaŭ sur la Luno dum la misio Apollo 15. La astro--naŭto David Scott faligis samtempe martelon kaj plumon. Ili falis kun sama rapido.

Galileo ne havis eblon kontroli la leĝon uzante vakuopumpilon, ĉar ĝi estis inventata nur en 1650.

Li komparis faltempon de korpoj en medioj kun malsama rezisto (akvo, aero) kaj konkludis, ke se la rezisto estus nulo, ĉiuj korpoj falus kun sama rapido.

Li spertis gravajn malfacilaĵojn, kiam li volis ekzameni faltempon de korpoj, ĉar li ne havis sufiĉe precizajn horloĝojn.

Li solvis la problemon analizante la movon de metalglobetoj sur klinita sulko. Tia-maniere li eltrovis la leĝojn de la akcela movo kaj de la libera falo.

Fig. 1.2: Galileo montras la eksperimenton kun klinita sulko al princo Giovanni de Medici

1.2 Mezuro

Mezuro estas grava parto de la naturscienca labormetodo, sed, kio estas mezuro?

Mezuro estas komparo de fizika grando kun mezurunuo.

Por mezuri, unue oni bezonas mezurunuon. Poste oni rigardas, kiom ofte la mezurenda grando enhavas mezurunuon, aŭ kiom da mezurunuoj estas bezonataj, por atingi la saman efikon, kiu estas atingata pere de la mezurenda grando.

La ideo estos klarigata en la sekvaj ekzemploj.

Ekzemplo 1

Domo longas 8 m. Tio signifas, ke la longo de la domo enhavas 8 foje la mezurunuon de la longo **1** $\boldsymbol{m}$.

$$l = 8\,m \quad \rightarrow \quad l = 8 \times 1\,m$$

$\boldsymbol{l}$ → fizika simbolo de la longo

8 → mezurnombro

1 $\boldsymbol{m}$ → mezurunuo

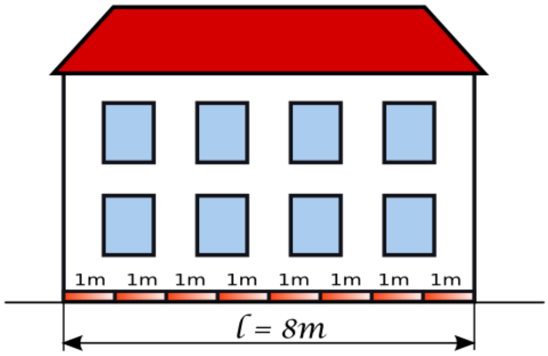


Fig. 1.3: Oni bezonas 8 foje la mezurunuon 1m por atingi la longon de la domo

Ekzemplo 2

Maso de iu metala bloko egalas al 9 g. Tio signifas, ke oni bezonas 9 foje la mezurunuon **1** $\boldsymbol{g}$ por atingi egalpezon sur la pesilo.

$$m = 9\,g \quad \rightarrow \quad m = 9 \times 1\,g$$

$\boldsymbol{m}$ → fizika simbolo de la maso

9 → mezurnombro

1 $\boldsymbol{g}$ → mezurunuo

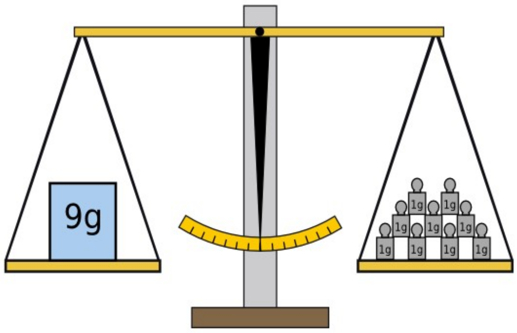


Fig. 1.4: Oni bezonas 9 foje la mezurunuon 1g por atingi egalpezon sur la pesilo

1.3 Sistemo internacia de unuoj – SI-sistemo

Ĝis la dekoka jarcento ekzistis multaj mezurunuoj por la sama grando kaj ofte ili estis malsamaj ne nur en la diversaj landoj sed eĉ en la diversaj urboj. (Fig. 1.5)

Pro tio je la fino de la dekoka jarcento, oni decidis serĉi mezurunuojn, kiuj estis bazataj sur naturaj grandoj egalaj en la tuta mondo. La rezulto de tiu ĉi laboro estis unue la ***metra sistemo***, kaj poste la ***sistemo internacia de unuoj***.

Ekde la jaro 1960, la ***SI-sistemo*** estas aprobita en la tuta mondo, kaj praktike uzata preskaŭ ĉie escepte de Usono.

La SI-sistemo havas sep bazajn mezurunuojn:

metro, kilogramo, sekundo, ampero, kelvino, molo, kandelo

En tiu ĉi ĉapitro ni priskribos nur ***metro***n, ***kilogramo***n kaj ***sekundo***n, ĉar ili estas bezonataj en mekaniko.

La ***kelvino***, unuo de la temperaturo estos priskribata en la ĉapitro pri termodinamiko.
La ***ampero***, unuo de la elektra kurento estos priskribata en la ĉapitro pri elektro.
La ***molo*** estas la unuo de la materikvanto. Ĝi estas grava en kemio.
La ***kandelo*** estas mezurunuo de la lumintenso kaj ne estas bezonata en tiu ĉi kurso.

Fig. 1.5: La mezurunuoj "pertica" kaj "braccio" estis malsamaj en la urboj Vieno kaj Roveredo

1.3.1 Metro

Metro (simbolo: ***m***) estas la baza mezurunuo de la longo (simbolo: ***l***).

$$[l]=1\,m$$

Kiam grando estas skribita en rektaj krampoj, tio signifas, ke post la egalsigno sekvas la mezurunuo de la grando en krampoj.

Metro estis unue enkondukata en la jaro 1791 pere de la franca registaro.

Por havi egalan referencon en ĉiu lando, la francaj sciencistoj provis uzi la mondon mem kiel referencgrando. Unu metro estis difinita kiel dekmilionono de kvarono de tera meridiano, tio estas dekmilionono de la distanco inter ekvatoro kaj poluso de la Tero.

Post precizaj mezuradoj de meridianaj arkoj en Eŭropo kaj Peruo, oni konstruis tiel nomatan "arĥivan metron" (metala bastono farita el plateno), kies longo estu plejeble egala al la origina difino.

Poste la arĥiva metro mem akiris statuson, kiel difinilo de la nova longo-unuo. Hodiaŭ ni scias, ke la termeridiano longas 20.003.930 metrojn. Do la eraro de la longo de la arĥiva metro estis nur 0,02 %.

Por doni bazon pli precizan al mezurado, ekde la jaro 1983 la metro estas difinita baze de la lumrapido en vakuo. Unu metro egalas la distancon, kiun lumo trapasas en vakuo en unu 299.792.458-ono da sekundo.

Tiu difino samtempe fiksas la lumrapidon, kiu ekde tiam egalas ekzakte 299.792.458 metrojn en sekundo.

1.3.2 Kilogramo

Kilogramo (simbolo: ***kg***) estas la baza mezurunuo de la maso (simbolo: ***m***).

$$[m]=1\,kg$$

Kilogramo estis komence difinita kiel maso de unu litro da akvo je la temperaturo de 4 °C.

Poste estis farita cilindro el Pt-Ir, kiu staras en Parizo. (vidu Par. 2.2.1)

Nuntempe (ankoraŭ) maso de tiu cilindro estas uzata kiel ekzakta referenco por 1*kg*.

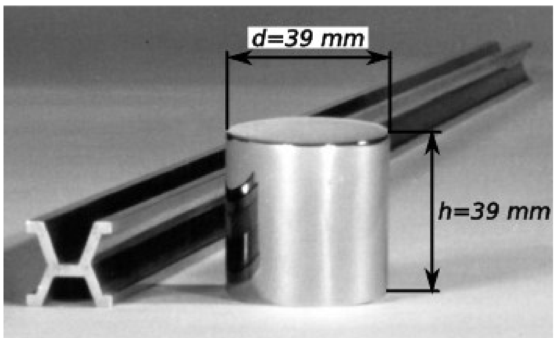


Fig. 1.6: Prametro kaj prakilogramo el alojo de 90% da plateno kaj 10% da iridio

1.3.3 Sekundo

Sekundo (simbolo: ***s***) estas la baza mezurunuo de tempo (simbolo: ***t***).

$$[t]=1\,s$$

Kiel referenco por la sekundo, komence oni prenis la turnadon de la Tero je propra akso. La baza referenco estis la meza sunotago.

Unu tago (simbolo: ***d***) havas dudek kvar horojn (simbolo: ***h***). Unu horo konsistas el sesdek minutoj (simbolo: ***min***), kaj unu minuto konsistas el sesdek sekundoj.

$$1\,d=24\,\frac{h}{d}\,x\,60\,\frac{min}{h}\,x\,60\,\frac{s}{min}=86400\,s$$

La unua difino estis, ke sekundo estas la 86.400-ona parto de meza sunotago. Kun la evo--luo de ĉiam pli precizaj mezuriloj kaj mezurmetodoj, oni eltrovis, ke la turnado de Tero ne estas sufiĉe unueca kaj stabila, por ebligi science ekzaktan difinon de baza mezurunuo.

Pro tio nuntempe la sekundo estas difinita baze de la absorba frekvenco de atomo de cezio. Unu sekundo egalas la tempodaŭron de 9.192.631.770 cikloj de la absorba frekvenco de cezio.

1.4 Prefiksoj

Por pligrandigi aŭ malgrandigi la mezurunuojn, oni uzas prefiksojn.

prefiksoj por dekoblaj unuoj		prefiksoj por dekonaj unuoj	
da = deka = $10\,x$	dekoble	d = deci = $\frac{1}{10}x$	dekono
h = hekto = $100\,x$	centoble	c = centi = $\frac{1}{100}x$	centono
k = kilo = $1000\,x$	miloble	m = milli = $\frac{1}{1000}x=10^{-3}x$	milono
M = Mega = $1000000\,x$	milionoble	µ = mikro = $10^{-6}x$	milionono
G = Giga = $10^{9}x$	miliardoble	n = nano = $10^{-9}x$	miliardono
T = Tera = $10^{12}x$	duilionoble	p = piko = $10^{-12}x$	duilionono

Ekzemploj:

$$1\,m=10\,dm=0{,}001\,km=10^{-3}\,km$$

$$1\,kg=1000\,g=0{,}001\,Mg$$

$$1\,Mg=1000\,kg=1\,t=1\,tuno$$

$$1\,MHz=106\,Hz=0{,}001\,GHz=10^{-3}\,GHz$$

1.5 Kelkaj simplaj derivitaj grandoj

1.5.1 Areo

La formula simbolo de areo estas $\boldsymbol{A}$.
La areo de geometriaj figuroj estas proporcia al produkto de du karakterizaj longoj.

$$\boldsymbol{A \propto l_1 \times l_2 \Leftrightarrow A = konst \times l_1 \times l_2}$$

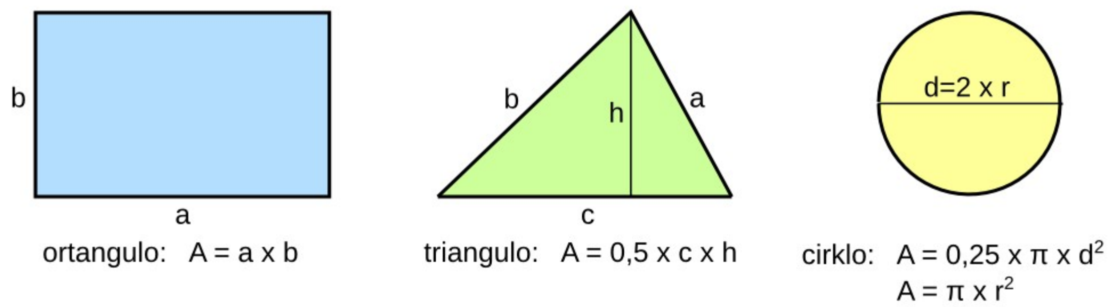


Fig. 1.7: Formuloj por la kalkulado de kelkaj areoj

Sekvas, ke la mezurunuo de la areo estas produkto de la mezurunuoj de du longoj.

$$\boldsymbol{[A] = [l]^2 = 1\, m^2 = kvadrata\ metro}$$

Atentu, kiam vi aliformas la mezurunuojn!

$$1\, m^2 = 1\, m \times 1\, m = 100\, cm \times 100\, cm = 10.000\, cm^2$$
$$1\, mm^2 = 1\, mm \times 1\, mm = 0{,}001\, m \times 0{,}001\, m = 10^{-6}\, m^2$$
$$1\, km^2 = 1000\, m \times 1000\, m = 1.000.000\, m^2$$

Por grandaj areoj estas uzata ankaŭ la mezurunuo hektaro (*ha*)

$$1\, ha = 100\, m \times 100\, m = 10.000\, m^2$$
$$1\, km^2 = (10 \times 100\, m) \times (10 \times 100\, m) = 10 \times 10 \times (100\, m \times 100\, m) = 100\, ha$$

Ekzemplo 1.1

Mezuru paperfolion formato A4 kaj kalkulu, kiom da folioj estas bezonataj por kovri areon de unu kvadrata metro!

Solvo:

La mezuroj estas: $a = 297\ mm$ $b = 210\ mm$ (vidu Fig. 1.7)

$$A = a \times b = 297\, mm \cdot 210\, mm = 62370\, mm^2 = 624\, cm^2 = 6{,}24\, dm^2 = 0{,}0624\, m^2$$

La nombro de la folioj bezonataj estas: $N = \dfrac{1\, m^2}{0{,}0624\, m^2} = 16$

Atentu! La rezulto de la kalkulado estas rondigita. Ĉar la mezuro havas nur tri ciferojn de precizeco, ankaŭ en la rezulto estas precizaj maksimume tri ciferoj. (vidu par.1.6)

1.5.2 Volumeno

La formula simbolo de volumeno estas $\boldsymbol{V}$.
La volumeno, de ĉiu geometria figuro, estas proporcia al produkto de tri karakterizaj longoj.

$$V \propto l_1 \times l_2 \times l_3 \Leftrightarrow V = konst \times l_1 \times l_2 \times l_3$$

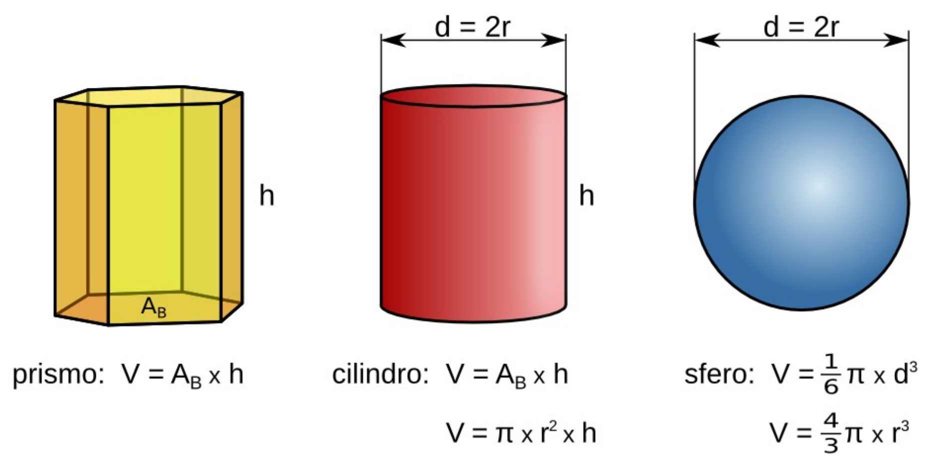


Fig. 1.8: Formuloj por la kalkulado de kelkaj volumenoj

Sekvas, ke la mezurunuo de la volumeno estas produkto de la mezurunuoj de tri longoj.

$$[V] = [l]^3 = 1\,m^3 = kuba\ metro$$

Atentu, kiam vi aliformas la mezurunuojn!

$$1\,m^3 = 1\,m \times 1\,m \times 1\,m = 100\,cm \times 100\,cm \times 100\,cm = 1.000.000\,cm^3 = 10^6\,cm^3$$
$$1\,mm^3 = 1\,mm \times 1\,mm \times 1\,mm = 0{,}001\,m \times 0{,}001\,m \times 0{,}001\,m = 10^{-9}\,m^3$$
$$1\,cm^3 = 10\,mm \times 10\,mm \times 10\,mm = 1000\,mm^3 = 10^3\,mm^3$$

Por volumenoj estas uzata ankaŭ la mezurunuo litro (l)

$$1\,l = 1\,dm^3 = 10\,cm \times 10\,cm \times 10\,cm = 1000\,cm^3$$
$$1\,ml = 0{,}001\,l = 0{,}001 \times 1000\,cm^3 = 1\,cm^3$$

$$\textbf{\textit{Notu!}} \qquad 1\,ml = 1\,cm^3$$

Ekzemplo 1.2

Mezuru moneron de 10 cendoj kaj kalkulu ĝian volumenon!

Solvo

La mezuroj estas: $d = 19{,}6\,mm$ $\quad h = 1{,}8\,mm$ (vidu Fig. 1.8)

$$V = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times h = \pi \times \left(\frac{19{,}6\,mm}{2}\right)^2 \times 1{,}8\,mm = 540\,mm^3 = 0{,}54\,cm^3$$

Atentu! La rezulto de la kalkulado estas rondigita. Ĉar la mezuro h havas nur du ciferojn de precizeco, ankaŭ en la rezulto estas precizaj maksimume du ciferoj. (vidu par. 1.6)

1.6 Precizo de mezuro kaj precizo de kalkulado

1.6.1 Signifaj ciferoj

Nuntempe, uzante elektronikajn poŝkalkulilojn, oni povas facile fari tre precizajn kalkulojn.

Ekzemple, se ni kalkulas la bazan areon de la cilindro, kiu formas la moneron je 10 cendoj, poŝkalkulilo donas la sekvan rezulton:

$$A_B=\pi\times\left(\frac{d}{2}\right)^2=\pi\times\left(\frac{19{,}6\,mm}{2}\right)^2=301{,}718558451\,mm^2$$

Sed en fiziko, same kiel en tekniko, tiom preciza rezulto en ĉi tiu kazo estas tute sensenca.

Fakte d = 19,6 mm signifas, ke la reala valoro de la diametro estas inter 19,55 mm kaj 19,64 mm. Do la valoro de la baza areo de la cilindro estas inter A_{B1} kaj A_{B2}.

$$A_{B1}=\pi\times\left(\frac{19{,}55\,mm}{2}\right)^2=300{,}181\,mm^2 \quad \text{kaj} \quad A_{B2}=\pi\times\left(\frac{19{,}64\,mm}{2}\right)^2=302{,}951\,mm^2$$

Pro tio, kiam la mezuro estas donata kun nur tri ciferoj da precizeco, la rezulto de la kalkulado estas certe preciza nur je la du unuaj ciferoj. La rezulto devas esti rondigata.

Notu! La rezulto de la kalkulado neniam povas esti pli preciza ol la rezulto de la plej malpreciza mezuro uzata por la kalkulado.

La nombrado de la signifaj ciferoj komenciĝas ĉe la unua cifero, kiu ne estas nulo.

Por la precizo ne gravas la nombro de ciferoj post la komo, sed nur kiom da signifaj ciferoj troviĝas post la enkondukantaj nuloj.

Do la rezulto A_B= 0,0003 m^2 estas malpreciza, dum A_B= 302 mm^2 estas preciza.

Eksperimento 1.2

Pere de ĉi tiu ekzemplo estos montrata, kiel oni devas agi, por korekte solvi fiziktaskojn kaj ĝuste utiligi rezultojn de mezurado.

Tasko

a) Mezuru la necesajn grandojn kaj kalkulu la volumenon de provtubeto!
b) Trovu metodon por rekte mezuri la volumenon de la tubeto kaj komparu la rezultojn!

Solvo

a) La mezurado donas la sekvajn rezultojn.

$d=16{,}2\,mm \qquad l=176\text{mm}$

$\rightarrow \quad l_1=l-\frac{d}{2}=176\text{mm}-8{,}1\,mm=167{,}9\,mm$

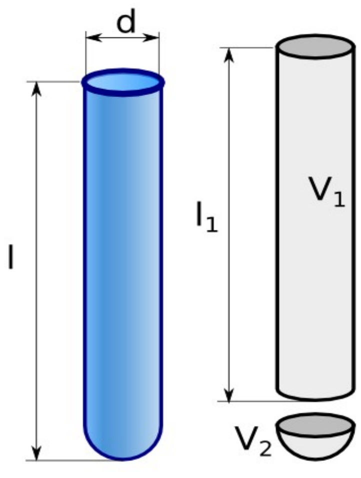


Fig. 1.9: La tuta volumeno konsistas el cilindro kaj duono de sfero.

cilindro

$$V_1=\pi\times\left(\frac{d}{2}\right)^2\times h=\pi\times\left(\frac{16{,}2\,mm}{2}\right)^2\times 168\,mm=34628\,mm^3=34{,}6\,cm^3$$

duono de sfero $V_2 = \frac{\pi}{12} \times d^3 = \frac{\pi}{12} \times (16{,}2\,mm)^3 = 1100\,mm^3 = 1{,}1\,cm^3$

tuta volumeno $V = V_1 + V_2 = 34{,}6\,cm^3 + 1{,}1\,cm^3 = 35{,}7\,cm^3$

b) Plenigante la provtubeton kun akvo, kaj verŝante ĝin en mezurcilindreton, oni tuj trovas la tutan volumenon $V = 36{,}1\,cm^3$

Ni vidas, ke la rezultoj kongruas nur, se rondigitaj al la unuaj du ciferoj. Honesta rezulto estas

$V = 36\ cm^3$ kio signifas ke $35{,}5\ cm^3 < V < 36{,}5\ cm^3$

1.6.2 Reguloj por la solvo de problemoj

1. Legu atente la tekston de la tasko!
2. Notu la donitajn grandojn kun ĝustaj simboloj kaj mezurunuoj. Aliformigu ilin, se necesas!
3. Notu la formulojn bezonatajn por la kalkulado kaj, se necesas, aliformigu ilin!
4. Enmetu la valorojn de la donitaj grandoj en la formuloj kunportante la mezurunuojn!
5. Kalkulu la rezultojn kaj rondigu ilin!
6. Respondu al la demandoj de la tasko!

La problemoj en la supraj ekzemploj estas ĝuste solvitaj, rigardu ilin, kiam vi plenumas la hejmtaskojn!

1.6.3 Solvendaj problemoj

1. Eltrovu la volumenon de unu folio de via fiziklibro, uzante nur liniilon kiel mezurilo!
2. Oni verŝas 150 ml da akvo en cilindran ladskatolon kun interna diametro de 56 mm. Kiom alta estos la nivelo de akvo en la skatolo?
3. Cilindra skatolo kun interna diametro de 12 cm enhavas lakon ĝis la nivelo de 8 cm. Ĉu la lako sufiĉas por kovri plankon, kiu havas longon de 5,0 m kaj larĝon de 4,2 m, kun laktavoleto dika je 0,1 mm?
4. El krano venas en ĉiu sekundo globforma guto kun diametro de 4 mm.
   Kalkulu, kiom da tempo (en tagoj, horoj, minutoj, sekundoj) estas bezonata, por plenigi cilindran skatolon kun diametro de 8,4 cm kaj alto de 11 cm!

1.7 Movo kaj rapido

En fiziko, **movo** signifas ŝanĝon de la pozicio de korpo rilate al referenca punkto. Ĝi estas mezurebla de observanto helpe de taŭga referencsistemo.

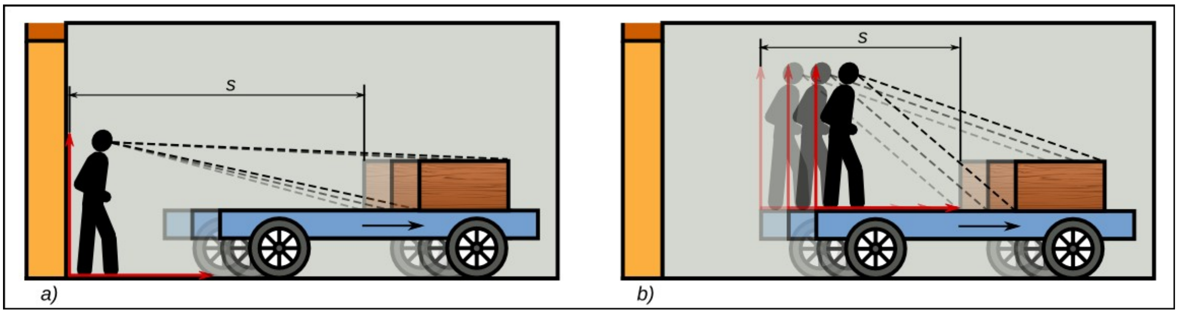


Fig. 1.10: a) La referencsistemo estas fiksata al la grundo, la observanto vidas, ke la kesto moviĝas. b) La referencsistemo estas fiksata al veturilo, la observanto vidas, ke la kesto ne moviĝas.

Por konstati, ĉu iu korpo moviĝas, oni bezonas referencsistemon aŭ koordinatsistemon, kiu estas ligata al iu alia korpo. Nur rilate al tiu koordinatsistemo oni povas mezuri la ŝanĝon de la pozicio.

En la supra Fig. 1.10, la kesto, rilate al la grundo, moviĝas kaj en la bildo a) kaj en la bildo b), ĉar la veturilo moviĝas rilate al la tero.

Tamen en la situacio de la bildo b) la observanto dirus, ke la kesto estas senmova, ĉar ĝi ne ŝanĝas la pozicion en sia referencsistemo, kiu estas ligata al la veturilo, kaj moviĝas kun ĝi.

Eĉ se la veturilo haltas, oni ne povas absolute diri, ke ĝi ne moviĝas. Fakte, observanto, kiu ekzemple staras sur la Luno, vidus, ke la veturilo moviĝas kune kun la Tero.

1.7.1 Prezento de movo

Por prezenti movojn oni uzas koordinatsistemojn. Sur la x-akso estas registrata la tempo kaj sur la y-akso estas registrata la pozicio rilate al la origino de la referencsistemo.

Por skizi movon en la koordinatsistemo oni devas unue mezuri la poziciojn, rilate al la origino de la sistemo, en diversaj momentoj.

Ekzemplo 1.3

En la sekve ilustrata ekzemplo oni konsideras la movon inter la du semaforoj.
Ili estas ambaŭ verdaj, do la biciklisto ne devas halti.

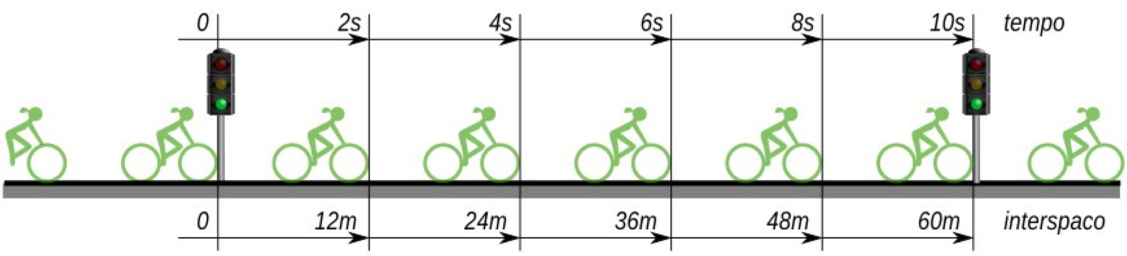


Fig. 1.11: La biciklisto A preterpasas la du semaforoj kun konstanta rapido

MP	t [s]	s[m]
1	2,0	12,0
2	4,0	24,0
3	6,0	36,0
4	8,0	48,0
5	10,0	60,0

En la tabelo estas registritaj la interspacoj inter la komenco de la distanco mezurata kaj la diversaj mezurpunktoj de tempo. El la valoroj rezultas la blua linio en diagramo t-s de Fig. 1.13. Ĝi estas rekta linio, ĉar la rapido konstantas.

Ju pli kruta estas la linio, kiu prezentas la movon, des pli granda estas la rapido.

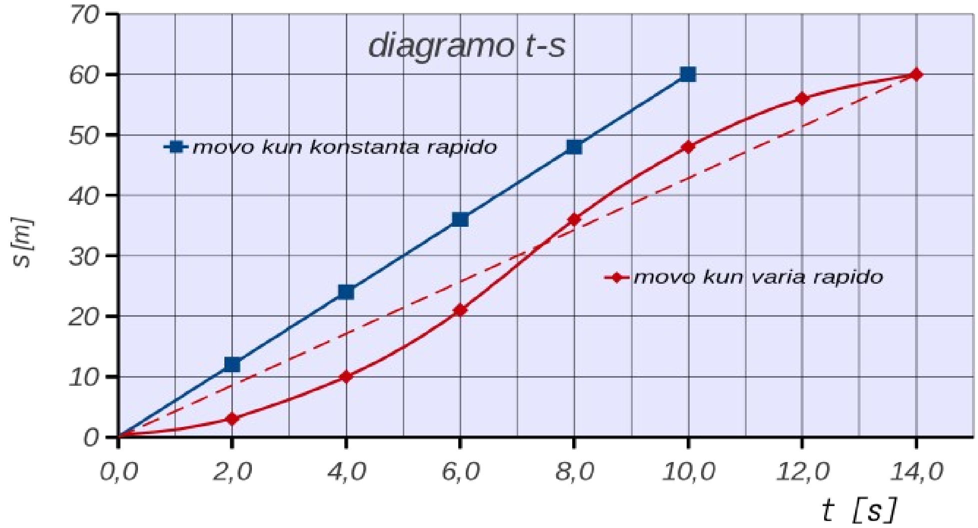


Fig. 1.13: La blua rekta linio prezentas movon kun konstanta rapido. La ruĝa kurba linio prezentas movon kiu unue estas akcelata kaj poste haltigata.

Ekzemplo 1.4

Ankaŭ ĉi tiu ekzemplo pritraktas movon inter du semaforoj. Ĉekomence la biciklisto staras antaŭ la unua semaforo kaj ekveturas, kiam ĝi ŝanĝiĝas al verdo. Post 14 sekundoj la movo devas esti haltigata, ĉar la dua semaforo estas ruĝa.

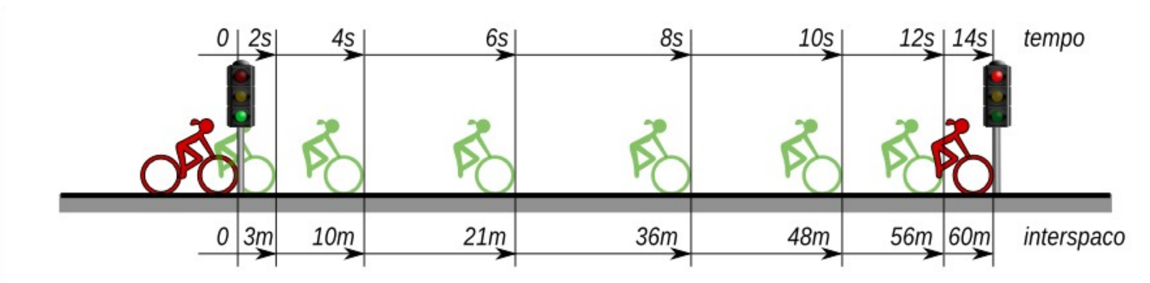


Fig. 1.12: La biciklisto B ekveturas de la unua semaforo kaj haltas antaŭ la dua semaforo.

MP	t [s]	s[m]
1	2,0	3
2	4,0	10
3	6,0	21
4	8,0	36
5	10,0	48
6	12,0	56
7	14,0	60

Kun la valoroj de la tabelo povas esti desegnata la ruĝa linio en la diagramo t-s de la Fig. 1.13. Ĝi estas kurba linio. La rapido ŝanĝiĝas, do ankaŭ la klineco de la linio ne povas esti konstanta. Ĝi estas des pli kruta, ju pli granda estas la rapido.

Oni vidas, ke la maksimuma rapido de biciklisto B estas pli granda, ol la rapido de biciklisto A, kiu veturas kun konstanta rapido. Fakte, inter la tempopunktoj 6s kaj 8s la ruĝa linio estas pli kruta ol la blua.

1.7.2 Meza rapido – momenta rapido

Por la rapido estas uzata la formula simbolo $\boldsymbol{v}$ (latine: velocitas).

Kiam iu korpo bezonas tempon ***t*** por trapasi la distancon ***s*** **,** ĝia ***meza rapido*** estas:

$$\bar{v} = \frac{s}{t} \quad \text{kun la baza mezurunuo} \quad [v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{1\,\mathrm{m}}{1\,s} = 1\,\frac{m}{s}$$

La streketo super la signo indikas mezan valoron.

La meza rapido de la biciklistoj el la supraj bildoj rezultas:

biciklisto A Fig. 1.11 $\bar{v}_1 = \frac{60\,m}{10\,s} = 6{,}0\,\frac{m}{s}$ biciklisto B Fig. 1.13 $\bar{v}_2 = \frac{60\,m}{14\,s} = 4{,}3\,\frac{m}{s}$

La meza rapido de biciklisto A estas pli granda ol tiu de biciklisto B.

Momenta rapido estas la rapido de korpo je difinita tempopunkto aŭ momento.

Ĉar la rapido de biciklisto A ne ŝanĝiĝas, lia momenta rapido estas konstanta kaj lia maksimuma rapido estas egala al la meza.

La momenta rapido de biciklisto B ŝanĝiĝas. Ekzistas tempospaco, en kiu ĝi estas pli granda ol tiu de biciklisto A.

Por kalkuli la momentan rapidon oni uzas la sekvan formulon: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Δt estas la mallonga tempospaco, en kiu la korpo moviĝas je la distanceto Δs ([3])

La rapido de la biciklisto B estas maksimuma inter la tempopunktoj 6 *s* kaj 8 *s*.

Ĉi tie ni havas:

$$\Delta t = 8\,s - 6\,s = 2\,s$$
$$\Delta s = 36\,m - 21\,m = 15\,m$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{15\,m}{2\,s} = 7{,}5\,\frac{m}{s}$$

Do la maksimuma momenta rapido de la biciklisto B estas pli granda ol la rapido de la biciklisto A.([4])

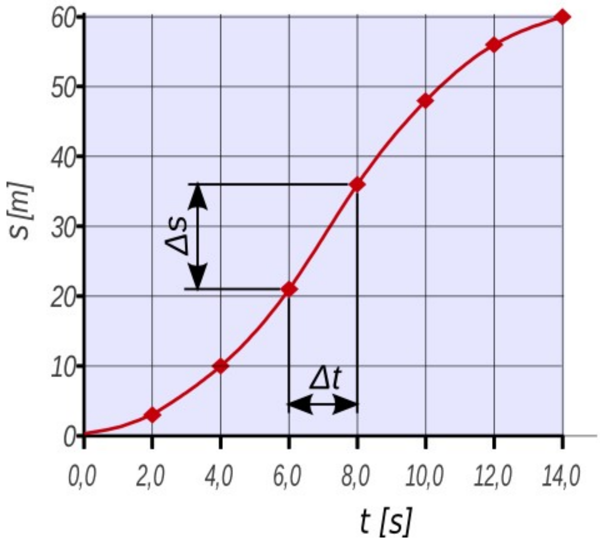


Fig. 1.13

3 La prefikso Δ (delta) signifas, ke la grando ŝanĝiĝas inter la komenca kaj la fina situacio. $\Delta s = s_{fina} - s_{komenca}$ $\Delta t = t_{fina} - t_{komenca}$

4 Matematike la formulo uzata supre ne estas preciza, ĉar la tempospaco, en kiu estas kalkulata la momenta rapido, devus esti preskaŭ nula. Fakte pere de tiu ĉi formulo ni kalkulas nur la mezan rapidon en la tempospaco Δt . La preciza formulo estas $v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}$. Tio signifas, ke la momenta rapido estas la unua derivaĵo de la pozicio laŭ la tempo.

1.7.3 Ekzemploj

Ekzemplo 1.5 La mezurunuo "kilometroj en horo"

Por indiki la rapidon de veturiloj, estas ordinare uzata la mezurunuo kilometroj en horo (km/h). En la supra ekzemplo la biciklisto faras la distancon de 60 m en la tempo de 14 s.
Kiom granda estas la meza rapido, indikata en kilometroj en horo?

Solvo

$t=14\,s$
$s=60\,m$

$$\bar{v}=\frac{s}{t}=\frac{60\text{m}}{14\text{s}}=\frac{\frac{60}{1000}km}{\frac{14}{3600}h}=\frac{3600}{1000}\cdot\frac{60}{14}\frac{km}{h}=3{,}6\cdot 4{,}3\frac{km}{h}=15\frac{km}{h}$$

Respondo

La mezuma rapido estas 15 km/h.

Notu el ĉi tiu ekzemplo! **1 *m/s* = 3,6 *km/h***

Ekzemplo 1.6 Kiam preterpasas kiu?

Vojo, kiu kondukas al montpasejo, longas 9,0 km. Biciklisto ekveturas precize je la dekdua horo. Post 50 minutoj li atingas la pasejon kaj haltas dum 5 minutoj. Poste li malsupreniras sur vojo longa 12 km kun meza rapido de 32 km/h.
Traktoro ekveturas 20 minutojn post la biciklisto kaj veturas laŭlonge de la tuta vojo kun konstanta rapido de 20 km/h.
a) Trovu, je kioma horo la traktoro preterpasas la bicikliston dum la supreniro!
b) Ĉu la biciklisto preterpasas la traktoron dum la malsupreniro? Se jes, je kioma horo?

Solvo

distanco de supreniro: $s_1=9{,}0\,km$

distanco de malsupreniro: $s_2=12\,km$ formulo bezonata: $v=\frac{s}{t} \rightarrow t=\frac{s}{v}$

tempo de malsupreniro de biciklisto

$$t_2=\frac{s_2}{v_2}=\frac{12\,km}{32\frac{km}{h}}=0{,}375\,h=22{,}5\,min$$

tempo por la tuta vojo de traktoro

$$t_t=\frac{s_t}{v_t}=\frac{21\,km}{20\frac{km}{h}}=1{,}05\,h=63\,min$$

Respondo

El diagramo t-s de Fig. 1.14 estas videbla, ke la traktoro preterpasas la bicikliston je la 12a horo kaj 43 minutoj, kaj la biciklisto preterpasas la traktoron je la 13a horo kaj 08 minutoj.

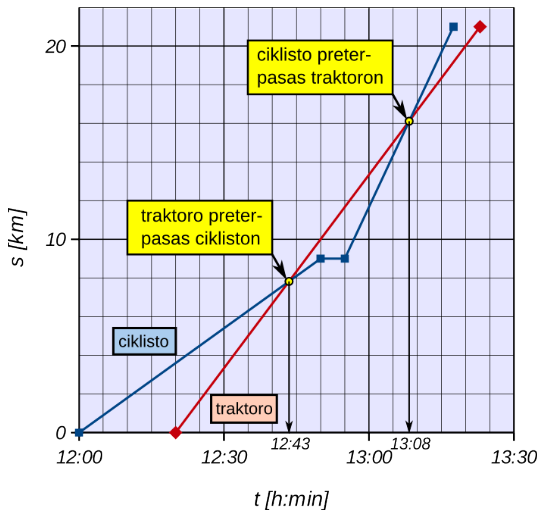


Fig. 1.14

1.7.4 Solvendaj problemoj

1. La sekundmontrilo de kuireja ĥorloĝo longas 8 centimetrojn.
   Kalkulu la rapidon, kun kiu moviĝas la pinto de la montrilo!

2. Biciklisto veturas kun konstanta rapido de 36 km/h.
   Kiom longas la distanco, kiun li trapasas en 2,5 minutoj?

3. Sur ĝia orbito la Luno moviĝas kun rapido de 1000 m/s. Por unu rivoluo ĝi bezonas 27,3 tagojn.
   a) Kiom grandas ĝia rapido en km/h?
   b) Kiom longas la orbito?
   c) Kiom longas la radiuso de la orbito (~ distanco inter Tero kaj Luno)?

4. Sur testvojo longa 36 km veturilo faras la unuajn 15 km kun rapido de 30 km, kaj la sekvajn 21 km kun 70 km/h.
   Kiom grandas ĝia meza rapido?

5. En duatlono la partoprenantoj devas kuri 42 km kaj bicikli 180 km.
   La partoprenanto A kuras konstante kun 10,5 km/h kaj biciklas konstante kun 30 km/h.
   La partoprenanto B kuras nur kun meza rapido de 8,4 km/h sed li biciklas tre rapide kaj atingas la celon post 9 horoj kaj 30 minutoj, antaŭ la alveno de la partoprenanto A.
   a) Kalkulu la mezan rapidon dum la tuta distanco por ambaŭ partoprenantoj!
   b) Kie kaj kiam, la partoprenanto B preterpasas la partoprenanton A?

1.7.5 Respondoj al la solvendaj problemoj de ĉapitro 1

Problemoj el paragrafo 1.6.3

1. Rigardu, kiom da folioj havas via fiziklibro (duono de la paĝonumero)! Mezuru longon, larĝon kaj alton de la libro sen kovriloj, kalkulu ĝian volumenon kaj dividu por la nombro de folioj !
2. La nivelo atingas alton de 6,1 cm.
3. La volumeno de lako egalas al V_L = 905 $cm^{3,}$, por la planko estas bezonataj 2100 cm^3. Do la lako ne sufiĉas.
4. La volumeno de guto egalas al V_G = 33,5 mm. La skatolo enhavas 607 cm^3 . La tempo bezonata egalas ĝuste 5 horojn.

Problemoj el paragrafo 1.7.4

1. La rapido de pinto egalas al 0,0084 m/s = 0,84 cm/s
2. La distanco longas 1500 metrojn.
3. a) La rapido egalas al 3600 km/h .
   b) La longo de la revoluo egalas al 2.360.000 km .
   c) La radiuso longas 375.000 km.
4. La meza rapido egalas al 45 km/h
5. a) La meza rapido rezultas 22,2 km/h por A kaj 23,2 km/h por B .
   b) B preterpasas A post 8 horoj ĉe la km 162 de la tuta distanco.

2 Kelkaj bazaj grandoj

2.1 Forto

Por la forto estas uzata la formula simbolo F .

Fortoj estas ekkoneblaj nur pro iliaj efikoj. Tiuj estas aŭ akcelo ([5]) aŭ deformo.

- ***Forto kaŭzas akcelon de libera korpo*** ***(dinamika efiko)***
- ***Forto kaŭzas deformiĝon de fiksata korpo*** ***(statika efiko)***

Ĉiam, kiam korpo ŝanĝas sian rapidon aŭ deformiĝas, tio okazas, ĉar iu forto efikas sur ĝin.

2.1.1 Mezuro de forto

Mezuro signifas komparon. Por mezuri fortojn bezonas kompari ĝian efikon kun la efiko de la mezurunuo. Tio estas pli facila por la statika efiko.

Du fortoj estas egalgrandaj, kiam ĝi deformas saman korpon egalgrade!

Kiel deformenda korpo kutime estas uzata ŝtala risorto.

La mezurunuo de la forto estas la neŭtono. ***[F] = 1 N***

Neŭtono estis nomita omaĝe al la brita fizikisto Isaac Newton ([6]).

Neŭtono ne estas baza unuo de la SI-sistemo. Pro tio kompleta difino de neŭtono estas

$$1\,N = 1\,kg \times 1\,\frac{m}{s^2}$$ Tiu rilato estos klarigata en volumo 2.

Por ĉi tiu volumo ni uzas la sekvan difinon:

1 N estas la forto, kiu plilongigas norman risorton je difinita distanco.

Fortomezuriloj enhavas tiujn normajn risortojn.

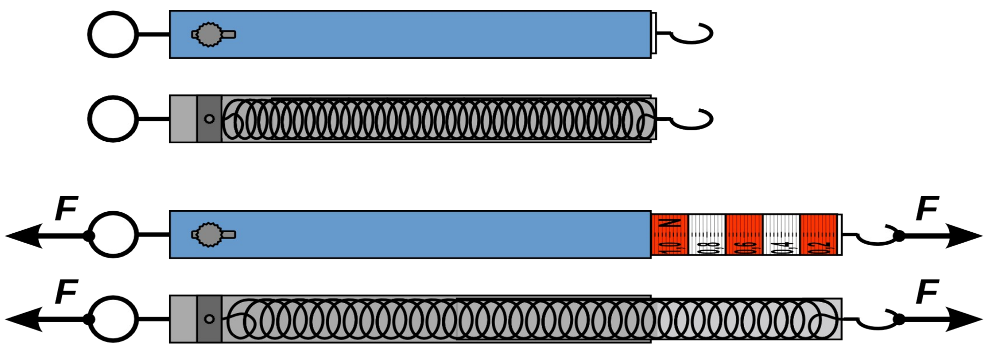


Fig. 2.1: Fortomezuriloj enhavas ŝtalajn risortojn, kiuj plilongiĝas proporcie al la forto.

5 Akcelo en fiziko estas ĉiu ŝanĝo de la vektora rapido. Kiam la grando aŭ la direkto de la rapido ŝanĝiĝas, tiam okazas akcelo, kaj por tio necesas forto.

6 Isaac **Newton** (esperante *Neŭtono,* 1643-1727) estis grava brita matematikisto, fizikisto kaj alĥemiisto. Li estis la plej elstara sciencisto de sia epoko. Inter alie li enkondukis al fiziko la ideon de forto, kiu povas agi trans distanco, kiel ekzemple gravito.

2.1.2 Forto kiel vektoro

La efiko de forto dependas ne nur de ĝia grando sed ankaŭ de ĝia direkto. Fig. 2.2

Pro tio fortoj estas reprezentataj per sagoj (***vektoroj***).

La longo de la sago estas mezuro de la grando, kaj la pinto montras la direkton.

Por ĝuste reprezenti fortojn, necesas difini fortoskalon.

Ekzemple $1\,N \equiv 0{,}5\,cm$ signifas, ke la sago, kiu reprezentas forton de 5 *N*, devas longi 2,5 *cm*.

Kiam necesas klare indiki, ke la forto estas vektora grando, oni skribas ĝin kun sago super la formula simbolo

$$\textbf{\textit{vektoro} -- \textit{forto}} \rightarrow \vec{F}$$

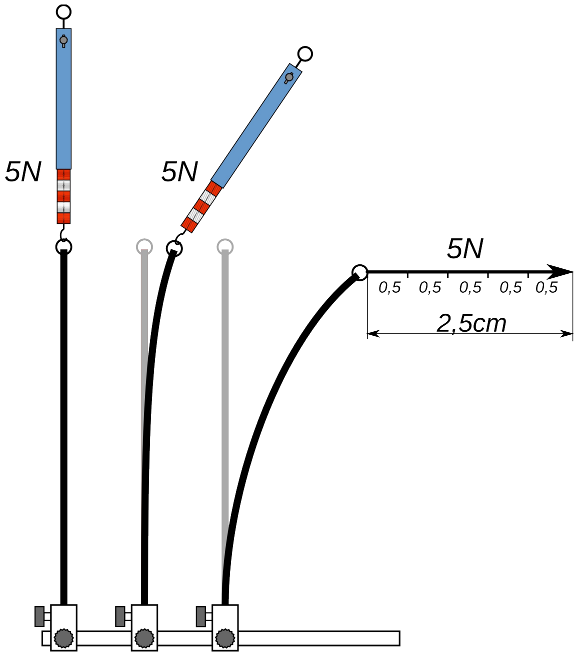


Fig. 2.2: Se la forto agas horizontale, ĝia efiko estas multe pli granda ol se ĝi agas vertikale.

2.1.3 Leĝoj de Newton pri movo

La tri ***leĝoj de Newton pri movo*** estas sciencaj leĝoj pri konduto de movantaj korpoj. Ili estas fundamentaj en klasika mekaniko.([7])

2.1.3.1 La unua leĝo - leĝo de inercio

Korpo restas senmova, aŭ en unuforma movostato, krom se agantaj fortoj devigas ĝin ŝanĝi sian staton.

Do korpo restas senmovo, aŭ en unuforma movostato, se ne agas forto sur ĝin, aŭ, se la vektora sumo ([8]) de ĉiuj fortoj agantaj estas nulo.

Ekzemple, la kesto en Fig. 2.3 moviĝas unu-forme, kiam la forto puŝanta F_P kaj la forto frotanta F_F, havas saman grandon.

En ĉi tiu kazo la fortoj havas saman grandon kaj kontraŭan direkton. La vektora sumo estas nulo kaj la korpo ne ŝanĝas sian movostaton.

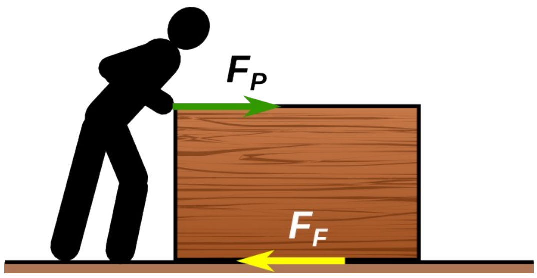


Fig. 2.3

7 Isaac Newton unue eldonis tiujn ĉi leĝojn en la verko *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) kaj uzis ilin por pruvi multajn rezultojn pri movado de fizikaj objektoj.

8 Por fari vektoran sumon ne sufiĉas fari la sumon de la grandoj de la fortoj, sed oni devas uzi taŭgajn metodojn, kiuj estos klarigataj en la dua volumo.

2.1.3.2 La dua leĝo – leĝo de agado

La ŝanĝo de movostato de korpo estas proporcia al la forto aganta kaj havas la saman rektlinean direkton kiel la forto.

Nuntempe, anstataŭ ***ŝanĝo de movostato***, estas kutime uzata la vorto ***akcelo*** (formula simbolo ***a***). Tiam la dua leĝo fariĝas:

Akcelo de korpo estas proporcia al la forto aganta kaj havas saman direkton kiel la forto.

La leĝo povas esti skribita kiel formulo $\vec{a} \propto \vec{F}$ ([9])

2.1.3.3 La tria leĝo - leĝo de reciproka agado

Kiam iu ajn korpo A efikas per forto sur alian korpon B, la dua korpo B efikas per egala kaj kontraŭa forto sur la unuan korpon A.

Alia formulado estas ke, kiam ekzistas forto, aganta sur korpon A, kaŭze de alia korpo B, ekzistas ankaŭ reciproka forto, aganta sur korpon B kaŭze de korpo A.

Tiuj ĉi formuladoj implicas ke, se iu agas sur korpon kun forto $F_{AB,}$ tiam ankaŭ la korpo agas sur tiun kun forto $F_{BA} = -F_{AB}$.

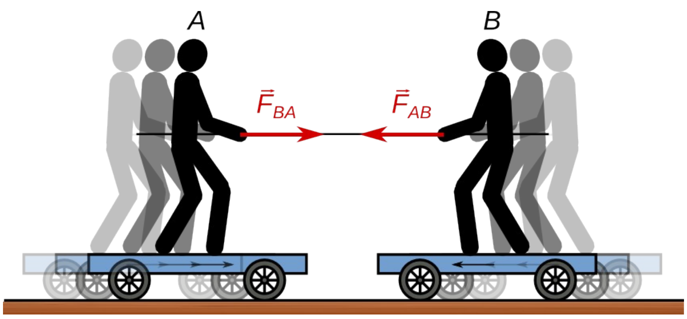


Fig. 2.4: A agas sur b kun sama forto kiel B sur A

La reago-forto havas la kontraŭan direkton de la ago-forto kaj saman grandon.

Do, ne nur la Suno altiras planedojn, sed ankaŭ la planedoj altiras Sunon. Ankaŭ, se la maso de la Suno estas multe pli granda ol la maso de la planedo, la forto, kun kiu la Suno agas sur la planedon, estas sama kiel la forto, kun kiu la planedo agas sur la Sunon.

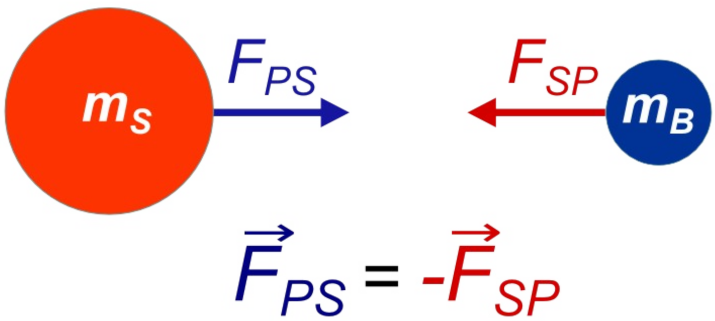


Fig. 2.5: La Suno altiras la planedon kun sama forto kiel la planedo altiras la Sunon

9 Surbaze de ĉi tiu leĝo Leonhard Euler en la jaro 1750 unue formulis la bazan leĝon de la dinamiko $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$. Tiu ĉi leĝo estos pritraktata en la dua volumo.

2.1.4 Forto kaj etendo - leĝo de Hooke

Eksperimento 2.1 - Rilato inter forto kaj etendo por ŝtala risorto

Etendante ŝtalan risorton estas mezurata kaj la forto ***F*** kaj la rezultanta etendo ***s***. (vidu Fig.2.6)

Oni trovas la valorojn de la sekva tabelo. Kun tiuj valoroj eblas desegni la diagramon de Fig. 2.7

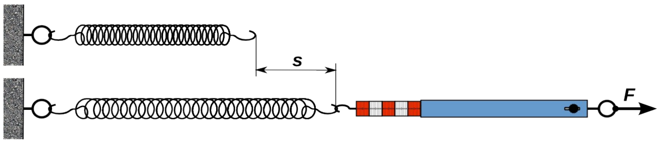


Fig. 2.6

MP	s[mm]	F[N]
1	16,0	0,5
2	33,0	1,0
3	50,0	1,5
4	67,0	2,0
5	86,0	2,5
6	103,0	3,0

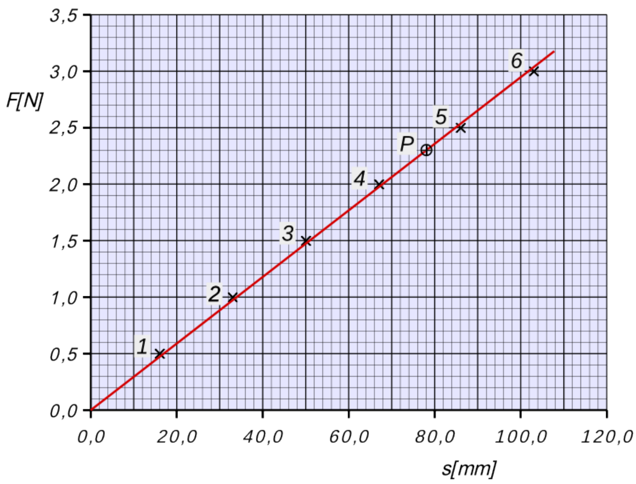


Fig. 2.7: Diagramo s-F de la risorto de Fig.2.6

El diagramo rezultas, ke rekto trairante originon de la koordinatsistemo bone proksimiĝas al la valoroj de la ses mezurpunktoj.

Tio signifas, ke fortoj etendantaj kaj etendoj por ŝtala risorto estas proporciaj.

$$s \propto F \quad \Leftrightarrow \quad F \propto s \quad \rightarrow \quad \frac{F}{s} = konst$$ por la ŝtala risorto

2.1.4.1 Risortkonstanto

La konstanto trovita en eksperimento 2.1, estas karakteriza valoro por ĉiu risorto. Ĝi nomiĝas ***risortkonstanto*** kaj oni uzas formulan simbolon ***D*** por ĝi. Ju pli malmola estas la risorto, des pli granda estas ***D*** kaj des pli kruta estas la rekto en la s-F diagramo. Fig. 2.8

$$D = \frac{F}{s} \quad \rightarrow \quad [D] = \frac{1\mathrm{N}}{1\mathrm{m}} = 1\frac{N}{m}$$

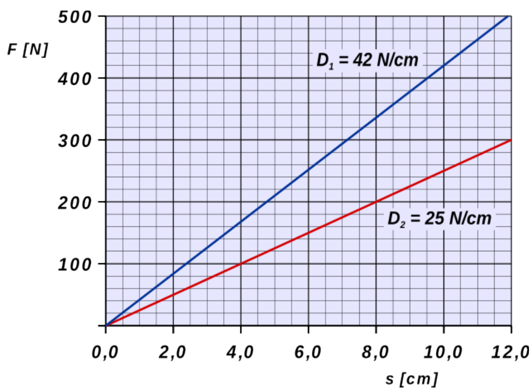


Fig. 2.8: Diagramo s-F por du diversaj risortoj

Ĝenerale, ĉiu sistemo, por kiu la etendo estas proporcia al la forto etendanta, obeas la ***leĝon de Hooke***. ([10])

Alivorte, kiam iu sistemo obeas la leĝon de Hooke, ĝia etendo estas proporcia al la forto etendanta.

10 Robert **Hooke** (1635-1702) estis angla sciencisto kaj eksperimentisto.

Ekzemplo 2.1

Risorteco de teknika aranĝaĵo Fig. 2.9 estas farita el du risortoj kun risortkonstantoj $D_1 = 42$ N/cm kaj $D_2 = 25$ N/cm.
Risorto 1 staras interne de risorto 2. Kiam ili estas neŝarĝitaj, ili havas saman longon.
a) Je kiom da centimetroj la risorteco estas kunpremita, kiam ĝi estas ŝarĝita kun tuta forto de 500 N?
b) Kiom granda estas la risortkonstanto de la tuta risorteco?

Solvo

$D_1 = 42\,N/cm \qquad D_2 = 25\,N/cm \qquad F = 500\,N$

F estas la sumo de la fortoj agantaj sur la du risortoj F_1 kaj F_2.
La deformiĝo *s* estas sama por la du risortoj.

a) $F = F_1 + F_2 = D_1 \cdot s + D_2 \cdot s = s \cdot (D_1 + D_2)$

$$s = \frac{F}{D_1 + D_2} = \frac{500\,N}{42\,\frac{N}{cm} + 25\,\frac{N}{cm}} = 7{,}46\,cm$$

b) $D = \frac{F}{s} = D_1 + D_2 = 67\,\frac{N}{cm}$

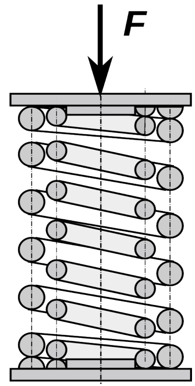


Fig. 2.9

Respondo

La risorteco estas kunpremita je 7,46 cm, kaj ĝia risortkonstanto egalas al 67 N/cm.

2.1.5 Kompensolinio - kompensorekto

Kompensolinio nomiĝas la geometria linio, kiu plej bone proksimiĝas al la mezurpunktoj en diagramo ([11]). En kazo de eksperimento 2.1, tiu linio estas rekto, nome la ***kompenso-rekto***.

Rigardante la poziciojn de la mezurpunktoj en la diagramo de Fig. 2.7, oni vidas, ke neniu de la punktoj 1- 6 troviĝas precize sur la rekto.

Fakte, kalkulante la risortkonstanton, la rezultoj estas malsamaj por la diversaj punktoj. Ekzemple:

MP2: $F_2 = 1{,}0\,N \quad s_2 = 33\,mm$ $\qquad D_2 = \frac{1{,}0\,N}{0{,}033\,m} = 3{,}0\,\frac{N}{m}$

MP6: $F_6 = 3{,}0\,N \quad s_6 = 103\,mm$ $\qquad D_6 = \frac{3{,}0\,N}{0{,}103\,m} = 2{,}9\,\frac{N}{m}$

Kiu estas la ĝusta valoro de D por la risorto el eksperimento 2.1 ?

La plej bona valoro estas tiu, kiu rezultas el iu punkto, kiu troviĝas sur la ***kompensorekto***.

Unu el tiaj punktoj estas la punkto P en Fig. 2.7.

Por la punkto P rezultas: $F = 2{,}3\,N \quad s = 78\,mm \;\rightarrow\; D = \frac{2{,}3\,N}{0{,}078\,m} = 2{,}9\,\frac{N}{m}$

Do la plej bona valoro rezultante el la mezursekvenco de eksperimento 2.1 estas D = 2,9 N/m.

11 En statistiko tiu linio nomiĝas regresa kurbo kaj ekzistas metodoj por precize kalkuli ĝin. Ĝi estas facile trovebla ankaŭ uzante tabelkalkulprogramon de komputilo.

2.2 Maso

Por la maso estas uzata la formula simbolo m .

La maso estas baza fizika grando, ĝi estas eco de korpoj.

La maso de iu korpo restas sama, kie ajn ĝi troviĝas en la universo.

2.2.1 Mezuro de maso

La mezurunuo de maso estas kilogramo $1\,kg$

Ekde 1889 unu kilogramo egalas, laŭdifine, al maso de "prakilogramo", metala cilindro el aparta alojo de plateno (90%) kaj iridio (10%), kies oficiala nomo estas Pt-10Ir. La specimeno estas konservata en la Oficejo Internacia pri Pezoj kaj Mezuroj, en Sèvres apud Parizo. Tiun prototipon oni uzas por kompare kontroli la masojn de ĝiaj kopioj, kiujn ricevis landoj uzantaj metran sistemon.(vidu 1.3.2)

Fig. 2.10: Prakilogramo

Por mezuri masojn estas uzata pesilo, ekzemple vektopesilo aŭ risortopesilo.

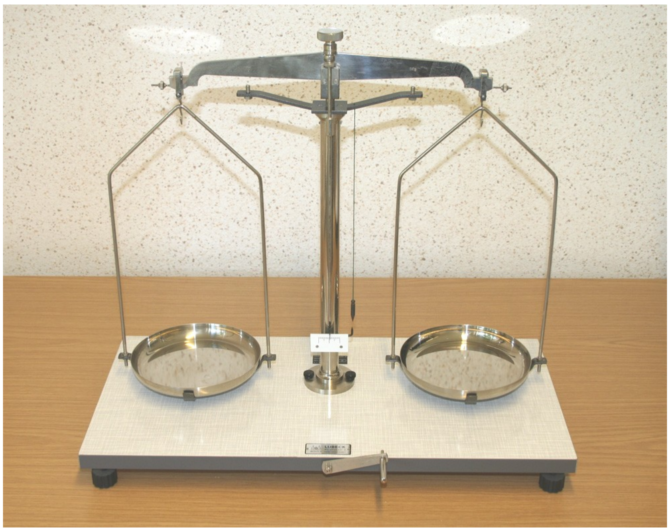


Fig. 2.11: Vektopesilo


Fig. 2.12: Risortopesilo

Efektive, pesiloj ne mezuras la mason, sed ĝi komparas nur la ***pezoforton*** (vidu 2.2.2), kiu agas sur la mezurenda maso kun tiu, kiu agas sur la mezurunuo. Sed la pezoforto dependas de loko, en kiu la korpo troviĝas. Pro tio tre gravas, ke mezurunuo kaj mezurenda maso estas komparataj en sama loko.

Kompreneble, kiam oni uzas vektopesilon, mezurenda maso kaj mezurunuo ĉiam troviĝas en sama loko.

Kiam oni uzas risortopesilon, la valoro indikata estas preciza nur en la loko, kie la pesilo estis laŭnormigita.

2.2.2 Pezoforto

Masoj altiras sin. ([12]) ***Pezoforto*** (formula simbolo $\boldsymbol{F_G}$) estas la forto, kun kiu la Tero altiras korpojn, kiuj staras sur ĝi. Tiu forto estas nomata ankaŭ ***gravito***.([13])

Pezoforto ne estas konstanta. Ĉar ĝi estas interago, inter la Tero kaj la korpo, ĝia grando ŝanĝiĝas kun la pozicio sur la Tero. La ŝanĝiĝo de pezoforto aganta sur saman korpon en diversaj lokoj de la Tero, estas malgranda, sed bone mezurebla.

Por maso ***m=1kg*** rezultas:

sur norda poluso	$\boldsymbol{F_G = 9{,}83N}$
sur la 45a latitudo	$\boldsymbol{F_G = 9{,}81N}$
sur ekvatoro (marnivelo)	$\boldsymbol{F_G = 9{,}78N}$
en Chimborazo Ekuadoro al la altitudo de 6000m	$\boldsymbol{F_G = 9{,}79N}$

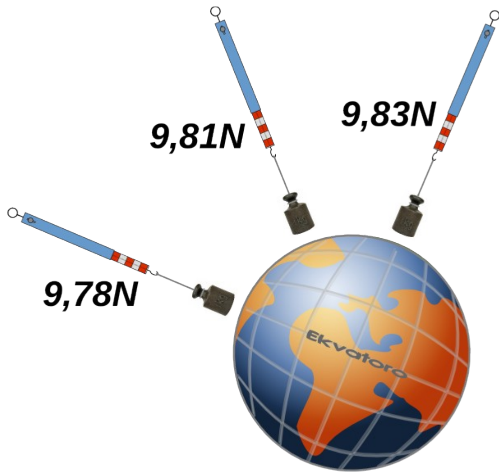


Fig. 2.13: Pezoforto aganta sur maso 1kg

Mezume, sur la Tero, maso ***1kg*** estas altirata kun pezoforto ***9,81N*** .

Oni diras, ke sur la Tero la ***lokofaktoro*** aŭ ***gravita akcelo***([14]) egalas al ***9,81N/kg***.

La formula simbolo de lokofaktoro estas ***g***.

Kelkaj valoroj de ***g*** :

Tero	9,81 *N/kg*	Luno	1,62 *N/kg*
Marso	3,70 *N/kg*	Jupitero	23,12 *N/kg*

Ĝenerale validas: ***pezoforto = maso x lokofaktoro*** $\qquad \boldsymbol{F_G = m \cdot g}$

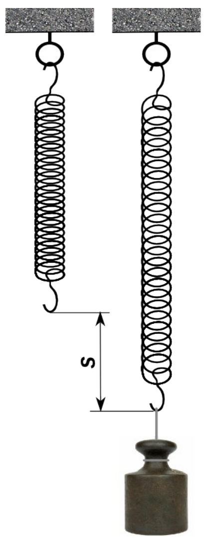


Fig. 2.14

Ekzemplo 2.2

Al risorto kun risortkonstanto D = 25 N/m estas pendigata maso de 200 g .
a) Je kiom da centimetroj la risorto estos plilongigata?
b) Kiom estus plilongigata la risorto sur la Luno?

Solvo

$$D = 25\frac{N}{m} \qquad m = 200\,g$$

$$sur\ la\ Tero: g_T = 9{,}81\frac{N}{kg} \qquad sur\ la\ Luno: g_L = 1{,}62\frac{N}{kg}$$

---

12 Pro gravito ĉiuj mashavaj objektoj altiras sin reciproke. La grando de la rezultanta forto dependas de la distanco inter la masoj kaj ilia grando. Newton unue priskribis la leĝon matematike. $F_G = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{r^2}$

13 En la ĉiutaga parolado la *maso* estas kutime nomata *pezo*. En fiziko tio estas nerekomenda, ĉar tiamaniere estus faciligata konfuzo inter maso kaj pezoforto

14 La gravita akcelo ***g*** estas la akcelo de libere falantaj korpoj. Tio estos klarigata en la dua volumo.

a) sur la Tero

$$F_T = m \cdot g_T = 0{,}20\,kg \cdot 9{,}81\,\frac{N}{kg} = 1{,}96\,N$$

$$s_T = \frac{F_T}{D} = \frac{1{,}96\,N}{0{,}25\,\frac{N}{cm}} = 7{,}84\,cm$$

b) sur la Luno

$$F_L = m \cdot g_L = 0{,}20\,kg \cdot 1{,}62\,\frac{N}{kg} = 0{,}32\,N$$

$$s_L = \frac{F_L}{D} = \frac{0{,}32\,N}{0{,}25\,\frac{N}{cm}} = 1{,}28\,cm$$

Respondo: Sur la Tero la plilongigo egalas al 7,8 cm kaj sur la Luno 1,3 cm.

2.2.3 Solvendaj problemoj

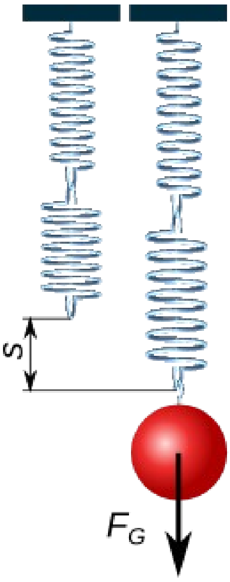


Fig. 2.16

1. La figuro 2.15 montras suspension de aŭtomobilo kun ĝia risorto. La risortkonstanto egalas al 16 N/mm. En la aŭto sidiĝas kvar personoj kun totala maso de 300 kg. La tuta pezo dispartiĝas egale sur la kvar radoj.
   Je kioma distanco ĉiu risorto estas kunpremata?

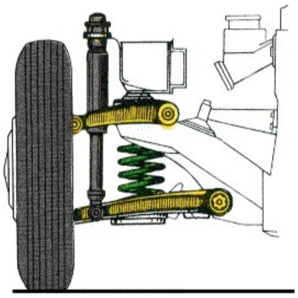


Fig. 2.15

2. Du risortoj, kun risortkonstantoj $D_1 = 4{,}2$ N/cm kaj $D_2 = 2{,}5$ N/cm, estas pendigitaj unu al la alia.
   Kiam al la du risortoj estas pendigata fera sfero, ili estas plilongigataj entute je 25 cm. (vidu Fig. 2.16)
   a) Kalkulu la mason de la sfero !
   b) Kiom grandas la tuta risortkonstanto de la grupo de du risortoj?

2.3 Denso

Por la denso estas uzata la formula simbolo ρ (greka rho).

La ***denso*** aŭ ***volumena maso*** estas karakteriza eco de ***materialoj***.

Eksperimento 2.2 - Rilato inter maso kaj volumeno de korpoj el sama materialo

La korpoj el Fig. 2.17, estas ĉiuj faritaj el sama materialo, aluminio. Determinante volumenon ([15]) kaj mason de la korpoj, oni trovas la valorojn de la sekva tabelo.

Fig. 2.17

15 Por trovi precizan valoron de la volumeno ni uzas la metodon de Arkimedo, enakvigante la korpojn. La metodo estos klarigata en paragrafo 3.3.5, eksperimento 3.3.

Kun tiuj valoroj povas esti desegnata la diagramo de Fig. 2.18

	V [cm³]	m [g]
1	7,6	20,3
2	11,5	32,2
3	16,5	44,5
4	28,7	80,2

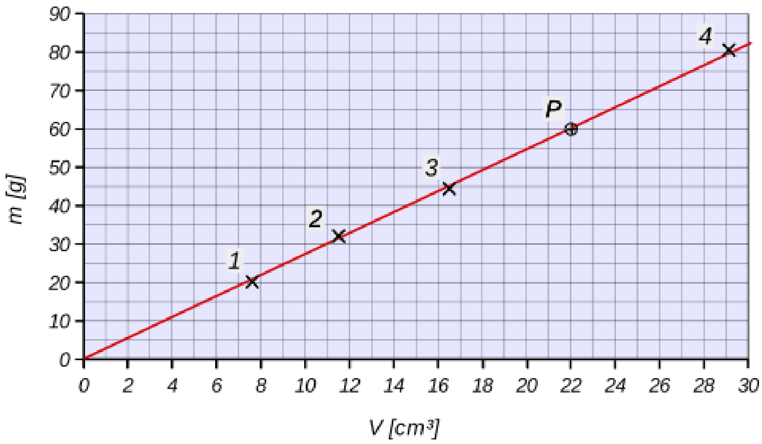


Fig. 2.18: Diagramo V-m por la korpoj de Fig. 2.17

El diagramo de Fig. 2.18 rezultas, ke rekto trairante la originon de la koordinatsistemo bone proksimiĝas al la valoroj de la mezurpunktoj.

Tio signifas, ke maso kaj volumeno por korpoj el sama materialo estas proporciaj.

$$\boldsymbol{m \propto V} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{\frac{m}{V} = konst}$$ por korpoj el sama materialo

2.3.1 Denso

La konstanto eltrovita en eksperimento 2.2, estas karakteriza valoro por ĉiu materialo. Ĝi nomiĝas ***denso*** aŭ ***volumena maso*** kaj oni uzas formulan simbolon $\boldsymbol{\rho}$ (greka rho) por ĝi.

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad [\rho] = \frac{1\,kg}{1\,m^3} = 1\frac{kg}{m^3}$$

Por aluminio el punkto ***P*** de la kompensorekto en Fig. 2.18 rezultas:

$$m = 60\,g \qquad V = 22\,cm^3$$

Do la denso estas $\rho = \frac{m}{V} = \frac{60\,g}{22\,cm^3} = 2{,}7\frac{g}{cm^3} = \frac{0{,}060\,kg}{0{,}000022\,m^3} = 2700\frac{kg}{m^3}$

Uzante la mezurunuon kg/m³, solidaj korpoj havas relative grandan denson. Pro tio kelkfoje oni preferas uzi aliajn unuojn kiel g/cm³ aŭ kg/dm³.

$$\boldsymbol{1000\frac{kg}{m^3} = 1\frac{g}{cm^3} = 1\frac{kg}{dm^3} = 1\frac{kg}{l}}$$

En la sekvanta paĝo troviĝas tabelo kun ekzemploj por la denso de kelkaj kemiaj elementoj kaj aliaj substancoj.

elementoj ĉe 20°C	denso [kg/m³]	substancoj solidaj	denso [kg/m³]	substancoj likvaj kaj *gasaj***	denso [kg/m³]
plateno	21450	diamanto	3520	mara akvo	1.030
oro	19320	granito	ĉ. 2800	pura akvo (4°C)	1.000
*hidrargo**	*13550*	marmoro	ĉ. 2800	etanolo	790
plumbo	11340	vitro	ĉ. 2600	benzino	700
arĝento	10490	sablo	ĉ. 1500	*butano*	*2,73*
kupro	8950	akrilvitro	1200	*aero*	*1,29*
nikelo	8900	glacio (0°C)	920	*metano*	*0,72*
fero	7860	ligno	400-800	*helio*	*0,18*
aluminio	2700	korko	200-400	*hidrogeno*	*0,09*
** likva*				** *ĉe 0°C kaj 1013 hPa*	

Tab. 2.1

Ekzemplo 2.3

Sfero estas farita el fero kaj havas diametron de 7,5 cm.
Kalkulu la mason de la sfero!

Solvo

$$d = 7{,}5\,cm \qquad \rho = 7{,}86 \frac{g}{cm^3} \qquad V = \frac{d^3 \cdot \pi}{6} = \frac{(7{,}5\,cm)^3 \cdot \pi}{6} = 221\,cm^3$$

$$\boldsymbol{\rho = \frac{m}{V}} \;\rightarrow\; \boldsymbol{m = V \cdot \rho} = 221\,cm^3 \cdot 7{,}86 \frac{g}{cm^3} = 1737\,g = 1{,}74\,kg$$

Respondo: La maso de la sfero sumiĝas je 1,74 kg.

Ekzemplo 2.4

La alojo, el kiu estas farita la prakilogramo, havas denson de 21550 kg/m³.
Ĉu la valoroj de la alto kaj diametro, indikataj en Fig. 2.19 estas tute precizaj?

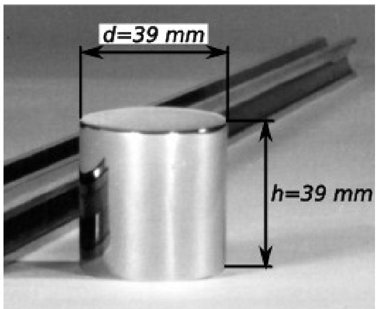


Fig. 2.19: Prakilogramo

Solvo

$$m = 1\,kg \qquad \rho = 21{,}55 \frac{g}{cm^3}$$

$$\boldsymbol{\rho = \frac{m}{V}} \;\rightarrow\; \boldsymbol{V = \frac{m}{\rho}} = \frac{1000\,g}{21{,}55 \frac{g}{cm^3}} = 46{,}4\,cm^3$$

Uzante la valorojn de Fig. 2.19 $d = 3{,}9\,cm$ $h = 3{,}9\,cm$ rezultas:

$$V = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h = \frac{(3{,}9\,cm)^2 \cdot \pi}{4} \cdot 3{,}9\,cm = 46{,}6\,cm^3$$ valoro iomete pli alta ol 46,4 cm³

Respondo: La valoroj en Fig. 2.19 ne estas tute precizaj. Reale ili estas iomete pli malgrandaj.

2.3.2 Solvendaj problemoj

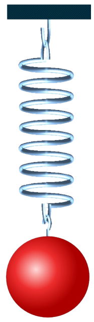


Fig. 2.20

1. Sfero farita el fero, kun diametro de 8,6 cm estas pendigita al risorto, kiu havas risortkonstanton egala je 12 N/cm. Fig. 2.20

   Je kiom la longo de risorto pliiĝas?

2. Sur la du pesiltasoj de vektopesilo Fig. 2.11 troviĝas du egalaj glasoj. La unua enhavas 80 cm³ da etanolo, la dua enhavas akvon.

   Kiom da akvo troviĝas en la dua glaso, kiam la pesilo estas en ekvilibro?

3. Klasĉambro longas 9,30 m, larĝas 8,2m kaj altas je 3,5 m.

   Kalkulu la mason de la aero enhavita en la ĉambro!

4. La bildo de Fig. 2.21 montras ingotojn el oro kun maso de 1 kg.

   Kalkulu ilian volumenon!

Fig. 2.21: Ingotoj el oro

2.3.3 Respondoj al solvendaj problemoj de ĉapitro 2

Problemoj el paragrafo 2.2.3

1. Ĉiu risorto estas kunpremata je 4,6cm.
2. a) La maso de la sfero egalas al 3,99 kg
   b) La risortkonstanto de la grupo de du risortoj egalas al 1,57 N/cm.

Problemoj el paragrafo 2.3.2

1. La risorto plilongiĝas je 2,14 cm.
2. En la dua glaso troviĝas 63,2 cm³ da akvo.
3. La maso de la aero en la ĉambro egalas al 344 kg.
4. La volumeno de ingoto egalas al 51,8 cm³.

3 Transmisio de forto en fluidoj

3.1 Strukturo de materio

Materio konsistas el tre malgrandaj pecetoj ***(partikloj)***, kiuj estas iumaniere aranĝitaj kaj kunligitaj. La partikloj, pri kiuj ni interesiĝas, estas la atomoj kaj la molekuloj.

Atomo estas la plej malgranda parto de kemia elemento. Atomoj estas nedisigeblaj per fizikaj aŭ kemiaj procedoj. Kelkaj materialoj, t.e. la metaloj (ekz. fero Fe, aluminio Al, kupro Cu, ...), la duonkonduktantoj (ekz. karbono C, silicio Si, germaniumo Ge ...) kaj la noblaj gasoj (ekz. heliumo He, neono Ne ...), konsistas el atomoj de la sama kemia elemento.

Fig. 3.1: Atomium en Bruselo. Pligrandigita modelo de kristala fero en kiu la sferoj prezentas la atomojn de fero.

Molekulo estas kunmetaĵo de almenaŭ du atomoj. Ĝi estas la plej malgranda ero de korpo, konservanta la ecojn de la tuto. Molekuloj estas disigeblaj per kemiaj procedoj, sed nedisigeblaj per fizikaj procedoj.

La plej multaj materialoj konsistas el molekuloj. La sekvantaj bildoj montras modelojn de molekuloj de oksigeno (O_2), akvo (H_2O) kaj sukaro ($C_{12}H_{22}O_{11}$).

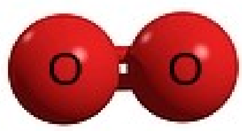


Fig. 3.2: oksigeno O_2

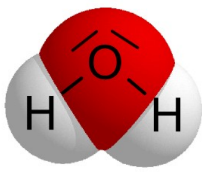


Fig. 3.3: akvo H_2O

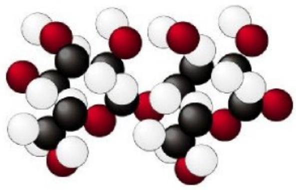


Fig.3.4: sukaro $C_{12}H_{22}O_{11}$

3.1.1 Grando de partikloj

Por fariĝi ideo pri la grando de la partikloj, el kiuj konsistas materio, utilas la sekva ekzemplo.

Ekzemplo 3.1

Dum sia geedziĝo persono surmetas tute oran edziĝoringon kun maso de 7,4 *g*.
a) Se la atomoj de oro estus kuboj, kiom longaj estus iliaj lateroj?
b) Pro eluziĝo post 40 jaroj la maso de la ringo malgrandiĝas je 5%. Kiom da atomoj de oro la ringo perdas mezume en ĉiu sekundo?
La molmaso ([16]) de oro sumiĝas je 197 *g/molo* kaj ĝia denso egalas al 19,32 *g/cm³*.

Fig. 3.5: Ora edziĝoringo

16 La molo estas la mezurunuo uzata por kvanto de substanco. Unu molo de iu substanco enhavas $6{,}022 \times 10^{23}$ partikloj. Molmaso estas la maso de unu molo de la substanco.

Solvo

$$m = 7{,}4\,g \qquad \rho = 19{,}32\,\frac{g}{cm^3} \qquad M = 197\,g/mol \quad \rightarrow \quad V = \frac{m}{\rho} = 0{,}383\,cm^3$$

la nombro de moloj de la ringo estas $n = \frac{m}{M} = \frac{7{,}4\,g}{197\,g/mol} = 0{,}0376\,mol$

Ĉar ĉiu molo havas $N_A = 6{,}022 \times 10^{23}$ atomoj, la nombro de atomoj de la ringo estas

$$z = n \cdot N_A = 0{,}0376\,mol \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}\,\frac{atomoj}{mol} = 2{,}26 \cdot 10^{22}\,atomoj$$

a)

La volumeno de ĉiu atomo estas $V_A = \frac{0{,}383\,cm^3}{2{,}26 \cdot 10^{22}} = 1{,}7 \cdot 10^{-23}\,cm^3 = 1{,}7 \cdot 10^{-29}\,m^3$

Se la atomoj estus kuboj, la longo de la lateroj estus $a = \sqrt[3]{V_A} = 2{,}6 \cdot 10^{-10}\,m$

b)

La atomoj perditaj en 40 jaroj sumiĝas je $0{,}05 \cdot 2{,}26 \cdot 10^{22} = 1{,}13 \cdot 10^{21}$ kaj la nombro da atomoj perditaj en ĉiu sekundo egalas al $\frac{1{,}13 \cdot 10^{21}}{40 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 896 \cdot 10^{9}$

Respondo: La longo de la lateroj egalas al $2{,}6 \cdot 10^{-10}\,m$ kaj la persono perdas 900 miliardojn da atomoj en ĉiu sekundo. Tiuj ciferoj bone klarigas la malgrandecon de la atomoj.

3.1.2 Statoj de materio

La tri plej kutimaj materistatoj estas:

- ***solida stato***
- ***likva stato***
- ***gasa stato***

Per varmigo, solida materio je la fandopunkto transiras al likva stato, kaj likva materio je la bolpunkto al gasa stato.

Aliaj, malpli oftaj fazoj, estas plasmo kaj superlikvo.

Solida stato

En solida stato la partikloj estas tre proksimaj, regule aranĝitaj kaj forte fiksitaj unu al la alia.

Solidaj korpoj havas fiksan formon kaj volumenon. Por ŝanĝi ilin, necesas alporti sufiĉe da energio.

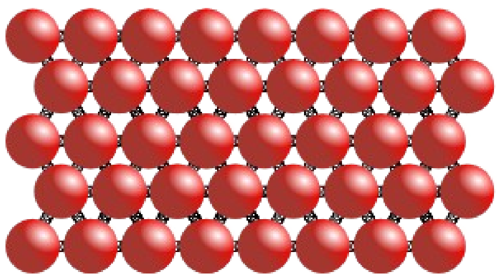


Fig. 3.6: Modelo de solida korpo

3.1.2.1 Likva stato

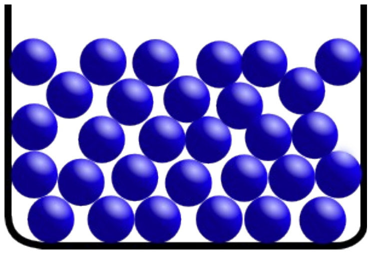


Fig. 3.7: Modelo de likvo

En likva stato la partikloj estas tre proksimaj, sed ne regule aranĝitaj. La ligo inter la partikloj estas tre malforta.

Likvaj korpoj havas fiksan volumenon, kiu ŝanĝiĝas malmulte pro ŝanĝo de temperaturo, kaj preskaŭ nenion pro ŝanĝo de premo.

Likvoj estas nekunpremeblaj!

Ilia formo tamen estas libera, sed norme konforma al la ujo, kiun ili plenigas.

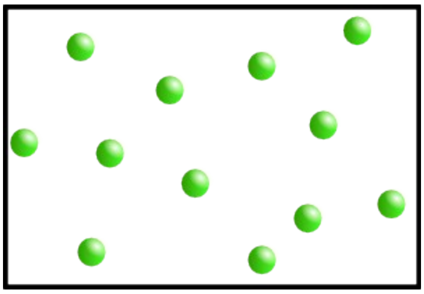


Fig. 3.8: Modelo de gaso

3.1.2.2 Gasa stato

En gasa stato, la partikloj estas tre malproksimaj kaj moviĝas senregule en la tuta spaco de la ujo, kiu entenas ilin.
En ideala gaso, la ligo inter la partikloj estas nula kaj la volumeno de la partikloj estas nula kompare kun la volumeno de la ujo.

Gasoj estas facile kunpremeblaj!

3.1.2.3 Fluido

Fluido estas la komuna nomo de la ne-solidaj substancoj (t.e. likvoj, gasoj kaj plasmoj), kiuj estas facile deformigeblaj, ĉar iliaj eroj estas nur malmulte ligitaj.

3.2 Transmisio de forto – premo

Kiam oni premas sur solidan korpon, la forto estas transmisiata al la bazo de la korpo mem.

Kiam oni premas sur likvon, la forto ne estas transmisiata, ĉar la partikloj flanken-movas. Fig.3.9 Fig. 3.10

Pro ilia rigideco solidaj korpoj bone taŭgas por transmisii fortojn. Tio ne simple eblas per fluidoj, ĉar ili estas facile aliformigeblaj.

Fig.3.9

Fig. 3.10

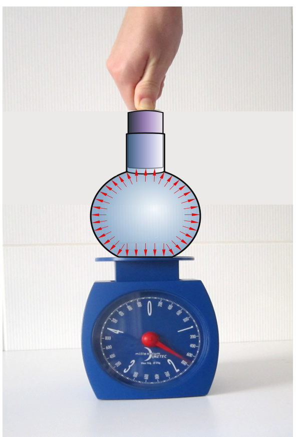


Fig. 3.11

Fluidoj transmisias forton nur, kiam ili estas fermitaj en solida ujo.

Se forto ***F*** agas sur moveblan areon ***A*** de ujo, kiu entenas fluidon, la premo en la ujo pligrandiĝas. Nedepende de la direkto de la forto, la premo agas ĉie orte sur la vando de la ujo. Fig. 3.11

Premo propagiĝas ĉiudirekten sammaniere.

Tion montras ankaŭ la sekva eksperimento.

Eksperimento 3.1

Fig. 3.12: Botelo kun aero de atmosfera premo

Fig. 3.13: Botelo kun kunpremita aero

PET-botelo enhavas malgrandan aerobalonon, kiu estas nur iomete plenigita de aero. Kiam aero estas pumpita kun premo en la botelo, oni registras, ke la premo agas ne nur eksteren sur la vando de la botelo, sed ankaŭ internen sur la aerobalono, kiu malgrandiĝas.

Eksperimento 3.2 - Rilato inter forto kaj areo en sistemoj kun difinita premo

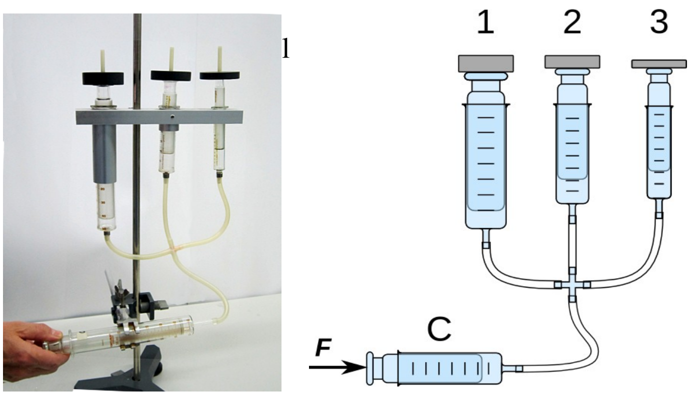


Fig. 3.14

Premante kun forto sur la piŝto de cilindro C (Fig. 3.14), la premo en la tuta tubsistemo, kaj kompreneble ankaŭ en la cilindroj 1, 2, 3 plialtiĝas.

Ĉisekve la piŝtoj 1, 2, 3 leviĝas, ĉar agas forto, kiu ekvilibrigas la tutan pezoforton de la piŝtoj kaj de la aldonitajn pezilojn. La areoj de la piŝtoj estas malsamaj, do ankaŭ la fortoj agantaj sur ilin aliiĝas.

La sekva tabelo enhavas la valorojn de la areoj kaj de la fortoj agantaj por ĉiu piŝto.

P	d [cm]	A [cm²]	m_t [g]	F [N]]
1	1,48	1,72	42	0,41
2	2,00	3,14	76	0,75
3	2,50	4,91	120	1,18

La signifo de la formulsignoj estas la sekva:

d diametro de piŝto $A = d^2 \cdot \pi / 4$ areo de piŝto

m_t maso de piŝto inkluzive maso de pezilo sur piŝto

$F = m_t \cdot g$ totala forto aganta sur la piŝto

Kun la valoroj de la tabelo, eblas desegni la diagramon de Fig. 3.15

El diagramo rezultas, ke rekto trairante la originon de la koordinatsistemo bone proksimiĝas al la valoroj de la mezurpunktoj.

Tio signifas, ke la forto sur parto de la vando de ujo, generata pere de premo, estas proporcia al areo de la parto de vando.

Por difinita premo validas:

$$F \propto A \quad \rightarrow \quad \frac{F}{A} = konst$$

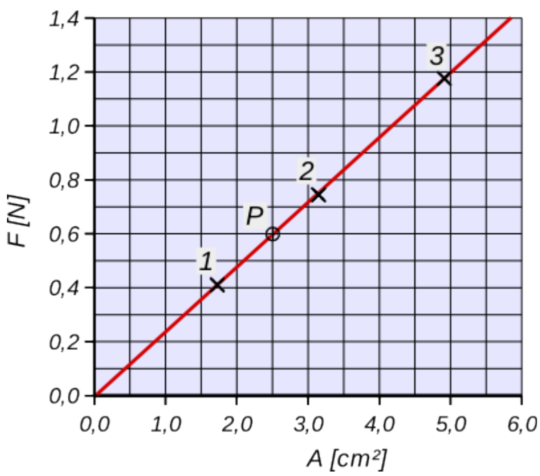


Fig. 3.15

3.2.1 Kalkulado de premo

La konstanto trovita en eksperimento 3.2, estas karakteriza valoro por la ***premo***, por kiu estas uzata la formula simbolo ***p*** .

$$p = \frac{F}{A} \qquad [p] = \frac{1\,N}{1\,m^2} = 1\frac{N}{m^2} = 1\,Pa = 1\,paskalo \quad (^{17})$$

Por la premo interne de la cilindroj en Fig. 3.14 rezultas el punkto P de Fig. 3.15:

$$F = 0{,}60\,N \qquad A = 2{,}5\,cm^2 = 0{,}00025\,m^2 \qquad p = \frac{F}{A} = \frac{0{,}60\,N}{0{,}00025\,m^2} = 2400\,Pa$$

Uzante la mezurunuon ***paskalo***, oni ofte trovas grandajn valorojn por la premo. Pro tio estas uzataj ankaŭ aliaj unuoj kiel ***baro*** aŭ ***N/cm²***.

$$1bar = 10\frac{N}{cm^2} = \frac{10\,N}{0{,}0001\,m^2} = 10^5\frac{N}{m^2} = 10^5\,Pa$$

3.2.2 Atmosfera premo - absoluta premo - relativa premo

Aerpremo aŭ ***atmosfera premo*** p_{atm} estas la premo estigita per la pezo de aerkolono gravanta sur ĉiu parto de la surfaco de la Tero (vidu 3.3.4). La aerpremo ŝanĝiĝas precipe depende de vetero, sed ankaŭ de tagparto kaj dum la tuta jaro. Ĝi malkreskas kun kreskanta altitudo super la marnivelo.

Laŭnorme la ***meza atmosfera premo al marnivelo*** egalas al

p_{atm} **=1,013 *bar*** = 1,013 x10^5 *Pa* =1013 *hPa* = 1013 *mbar*

notu! 1 hPa = 1mbar

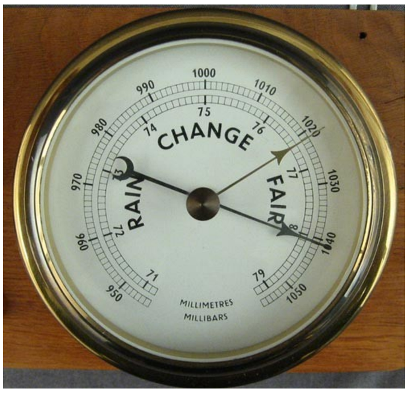


Fig. 3.16: aneroida barometro

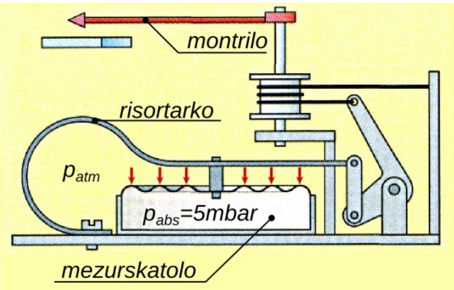


Fig. 3.17: Funkciadoskemo

La atmosfera premo estas mezurata per ***barometro***j. Klasikaj barometroj estas la akva kaj la hidrarga barometro (vidu 3.3.3). Pli nova formo estas la aneroida barometro Fig. 3.16. Ĝi enhavas preskaŭ tute vakuigitan ladskatolon, kiu estas kunligita al risortarko Fig. 3.17. Movo de la skatolo, pli aŭ malpli kunpremita per aerpremo, estas indikata per montrilo. Modernaj barometoj estas kutime ciferecaj.

Absoluta premo p_{abs} rilatas al perfekta vakuo, kie la absoluta premo estas nula. Valoroj de absoluta premo povas esti nur pozitivaj. Atmosfera premo estas ĉiam indikata kiel absoluta premo.

Relativa premo p_r rilatas al atmosfera premo. Ĝi estas ofte uzata por indiki premon de fluidoj entenataj en fermitaj ujoj. $\quad p_r = p_{abs} - p_{atm}$

17 Blaise **Pascal** 1623-1662 estis franca sciencisto. Li okupiĝis precipe pri filozofio, fiziko kaj matematiko. Uzante la barometron eltrovita de la itala sciencisto Torricelli, li mezuris aerpremon en diversaj altitudoj kaj pruvis, ke ĝi malkreskas kun kreskanta altitudo. Vidu Fig. 3.33

3.2.2.1 Manometroj

Valoroj de superpremo	
plenblovita halo	3 mbar
gasdukto en domo urbo	 20 mbar 800 mbar
pneŭmatiko de motorciklo biciklo aŭtomobilo kamiono	 1,5 – 2,0 bar ~ 2 bar 1,6 – 2,2 bar 3,5 – 5,0 bar
butankartoĉo	~ 7 bar
sprajujo	max. 10 bar
oksigenbotelo	150 bar
ranulbotelo	200 bar

Tab. 3.1

Generale, premmezuriloj estas nomataj ***manometroj***. Ofte ili mezuras relativan premon, kiu fariĝas negativa, se la premo ene de la ujo estas pli malgranda ol atmosfera premo. (vidu Fig. 3.18)

Fig. 3.18: Manometro por relativan premon de -200 ĝis +800 hPa

Relativa premo, precipe se pozitiva, estas nomata ankaŭ superpremo $\boldsymbol{p_{sup}}$. Ĝi kutime estas mezurata en baroj. En tabelo 3.1, troviĝas kelkaj praktikaj valoroj de superpremo.

Ekzemplo 3.2

Kiom grandas la necesa forto, por estigi superpremon de -0,5 bar en gasŝprucigilo, kiu havas piŝton kun diametro de 2,5 cm? (vidu Fig. 3.19)

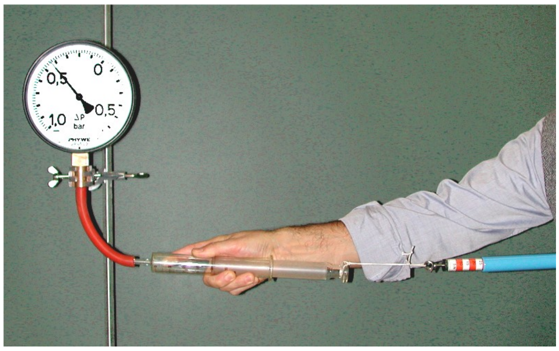


Fig. 3.19

Solvo

$$p = -0{,}5\,bar = -5\frac{N}{cm^2}$$

$$d = 2{,}5\,cm^2 \quad \rightarrow \quad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 4{,}91\,cm^2$$

$$p = \frac{F}{A} \rightarrow F = p \cdot A = -5\frac{N}{cm^2} \cdot 4{,}91\,cm^2 = 24{,}5\,N$$

Respondo: La piŝto devas esti eltirata kun forto de 24,5 N.

Ekzemplo 3.3

Kiam la truo de gasŝprucigilo de Fig. 3.19 estas tute malfermita kaj ne kunligita al la manometro, por movi la piŝton sufiĉas superi la frotoforton, kiu egalas al $F_F = 0{,}85$ N.
Kiam la gasŝprucigilo estas kunligita al manometro, la necesa forto por tute eltiri la piŝton, el ĉekomence tute malplena ŝprucigilo, sumiĝas je $F_T = 51$ N.
Kiom grandas la atmosfera premo en la loko?

Solvo

La totala forto egalas al la forto igita per la atmosfera premo plus la frotoforto.

$$F_t = F_P + F_F \rightarrow F_P = F_t - F_F = 51\,N - 0{,}85\,N = 50{,}15\,N \rightarrow$$

$$p = \frac{F_P}{A} = \frac{50{,}15\,N}{4{,}91\,cm^2} = 10{,}2\frac{N}{cm^2} = 1{,}02\,bar$$

Respondo: La atmosfera premo egalas ĉirkaŭ al 1 *bar*, kiel oni atendis.

3.2.3 Hidraŭlikaj sistemoj

Hidraŭlikaj sistemoj estas iloj, en kiuj la forto estas transmisiata kaj pligrandigata per likvoj. Ekzemplo estas la hidraŭlika premilo en Fig. 3.20.

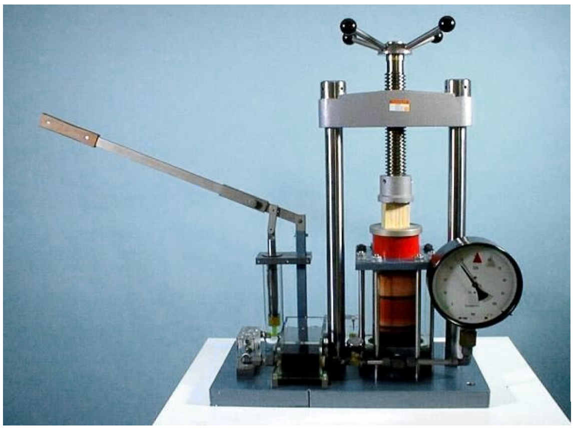


Fig. 3.20: Hidraŭlika premilo

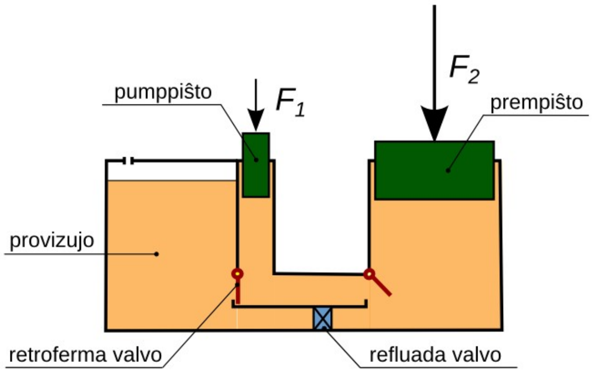


Fig. 3.21: Skemo de hidraŭlika premilo

Ekzemplo 3.4

La pumppiŝto de premilo en Fig. 3.20 havas diametron de 12 mm, la diametro de la prempiŝto egalas al 90 mm. La prempiŝto devas generi forton $F_2 = 280$ N.
a) Kiom granda estas la premo bezonata interne de la premilo?
b) Kiom granda estas la forto, kiu devas agi sur la pumppiŝto?
c) Kiom moviĝas supren la prempiŝto, kiam la pumppiŝto moviĝas 40 mm malsupren?

Solvo

$$d_1 = 1{,}2\,cm^2 \rightarrow A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 1{,}13\,cm^2 \qquad d_2 = 8{,}0\,cm^2 \rightarrow A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 50{,}3\,cm^2$$

a) $$p = \frac{F_2}{A_2} = \frac{280\,N}{50{,}3\,cm^2} = 5{,}57\frac{N}{cm^2} = 557\,hPa = 0{,}56\,bar$$

b) $$F_1 = p \cdot A_1 = 5{,}57\frac{N}{cm^2} \cdot 1{,}13\,cm^2 = 6{,}3\,N$$

c) Ĉar la hidraŭlika oleo, kiel ĉiuj likvoj, estas nekunpremebla, la volumeno da oleo movita per la pumppiŝto, estas egala al la volumeno, je kiu moviĝas la prempiŝto.

$$V_1 = V_2 \rightarrow A_1 \cdot s_1 = A_2 \cdot s_2 \rightarrow s_2 = \frac{A_1 \cdot s_1}{A_2} = \frac{1{,}13\,cm^2 \cdot 40\,mm}{50{,}3\,cm^2} = 0{,}90\,mm$$

Respondo: a) La premo bezonata egalas al 0,56 bar.
b) La forto kiu devas agi sul la pumppiŝto egalas al 6,3 N.
c) La prempiŝto moviĝas je 0,9 mm.

Oni povas registri, ke uzante hidraŭlikan premilon, la forto bezonata malpliiĝas, sed la distanco, per kiu la forto devas agi, pligrandiĝas. Kiel estos klarigata pli poste, tio signifas, ke la laboro restas la sama.([18])

18 Fakte rezultas por la laboro al pumppiŝto $W_1 = F_1 \cdot s_1 = 6{,}3\,N \cdot 4\,cm = 25\,Ncm$ kaj por la *laboro* al prempiŝto $W_2 = F_2 \cdot s_2 = 280\,N \cdot 0{,}09\,cm = 25\,Ncm$

3.3 Hidrostatika premo

Cifereca barometro de Fig. 3.22/ 3.23 mezuras absolutan premon.

En Fig. 3.22 la mezursondilo estas ekster la akvo, kaj la barometro montras, ke la atmosfera premo en mezurloko estas egala al 982 *mbar*. Kiam la mezursondilo estas mergita en akvo, la premo indikata de la barometro plialtiĝas.

En Fig. 3.23 la mezursondilo estas mergita je 15 *cm* en akvo. En tiu ĉi profundeco la absoluta premo rezultas 997 *mbar*.

Sekvas, ke en akvo la superpremo en profundeco de 15 *cm* rezultas:

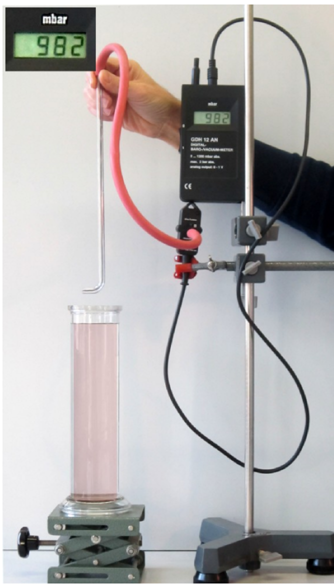


Fig. 3.22

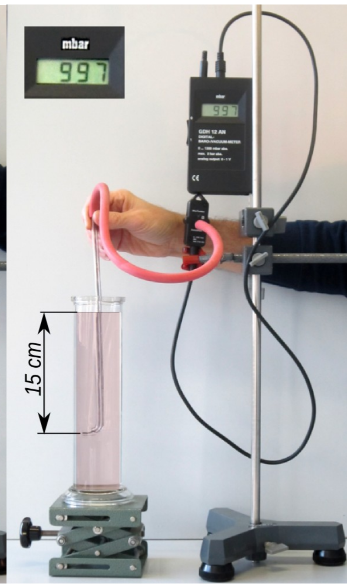


Fig. 3.23

$$p_{\text{sup}} = p_{\text{abs}} - p_{atm} = 997\,mbar - 982\,mbar = 15\,mbar$$

La superpremo aganta interne de likvoj estas nomata ***hidrostatika premo*** aŭ ***pezopremo***.

3.3.1 Kalkulado de hidrostatika premo

Hidrostatika premo estas kaŭzata de la pezoforto de likvo, kiu staras super ĉiu surfaco interne al la likvo mem.

Ekzemple en Fig. 3.24, sur la areo A, en profundeco h, premas la pezoforto *F* de likvocilindro starante super la areo.

$$F = m \cdot g = V \cdot \rho \cdot g = A \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

Sekve por la hidrostatika premo rezultas: $\boldsymbol{p = \frac{F}{A} = h \cdot \rho \cdot g}$

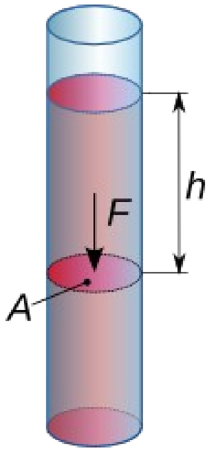


Fig. 3.24

En akvo, la hidrostatika premo en profundeco de 15 *cm* rezultas:

$$p = h \cdot \rho \cdot g = 0{,}15\,m \cdot 1000\,\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\,\frac{N}{kg} = 1470\,Pa = 14{,}7\,hPa = 14{,}7\,mbar$$

Tiu estis ankaŭ la rezulto de la mezuro en Fig. 3.23

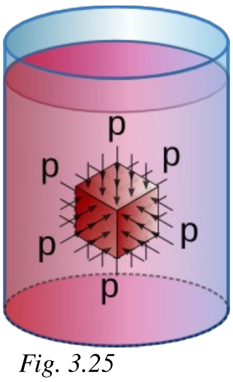


Fig. 3.25

En akvo, en profundeco de 10 *m* rezultas:

$$p = h \cdot \rho \cdot g = 10\,m \cdot 1000\,\frac{kg}{m^3} \cdot 9{,}81\,\frac{N}{kg} = 98100\,Pa = 0{,}98\,bar$$

Do en ***akvo*** la hidrostatika premo plialtiĝas je ĉirkaŭ ***unu baro por ĉiuj 10 metroj*** de profundeco.

Memkompreneble ankaŭ la hidrostatika premo agas sammaniere en ĉiu direkto: supren, malsupren kaj flanken Fig. 3.25

3.3.2 Hidrostatika paradokso

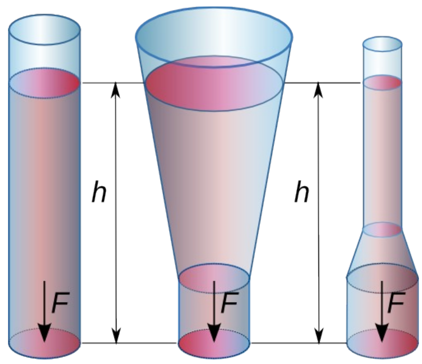


Fig. 3.26

La formulo $\boldsymbol{p = h \cdot \rho \cdot g}$ montras, ke la hidrostatika premo estas nedependa de la formo de ujo. Pro tio la forto aganta sur la fundojn de la tri ujoj en Fig. 3.26 estas la sama, se la fundoj havas saman areon kaj la nivelo de likvo estas sama.

Tiu fakto nomiĝas ***hidrostatika paradokso***.

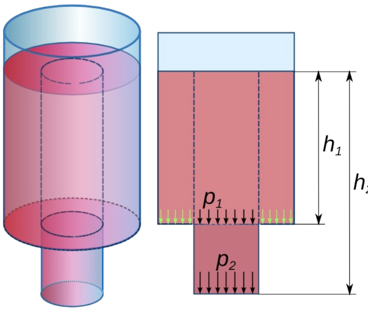


Fig. 3.27

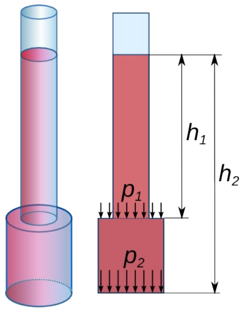


Fig. 3.28

Ĝi estas facile komprenebla rigardante la ujojn en Fig. 3.27 kaj Fig. 3.28.

En Fig. 3.27 la pezoforto de la likvo ekster la kolono supre de la baza areo, agas direkte sur la vandon de la ujo kaj ne kontribuas al la forto gravante sur la fundon.

En Fig. 3.28, la premo p_1 en profundeco h_1 agas sur la tutan areon de la baza areo. Do en ĉi tiu kazo la totala premo sur la fundo de ujo (en profundeco h_2) rezultas:

$$p_2 = \rho \cdot g \cdot h_1 + \rho \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = \rho \cdot g \cdot h_2$$

Por praktike pruvi la hidrostatikan paradokson oni povas uzi la aparaton de Fig. 3.30, kiu estis inventita de Blaise Pascal. La bildo de Fig. 3.29 montras la funkciadon de la aparato.


Fig. 3.30

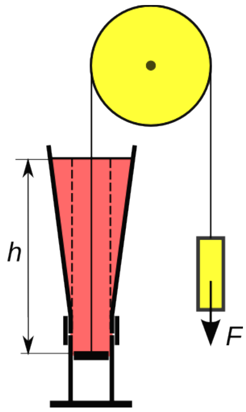


Fig. 3.29

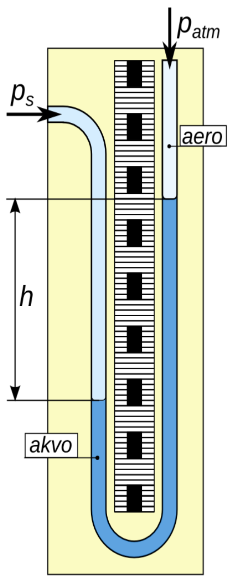


Fig. 3.31: Malfermita U-tuba manometro

3.3.3 U-tubaj manometroj

U-tubaj manometroj konsistas el U-forma glastubeto plenigita de likvo, ordinare akvo aŭ hidrargo.

La tubeto povas esti ***malfermita*** aŭ ***fermita***. Se ĝi estas malfermita, la manometro mezuras superpremon, alikaze ĝi mezuras absolutan premon. La formulo de hidrostatika premo taŭgas por konstrui ĝustan skalon por la manometroj.

Akvoplenigitaj manometroj estas ĝenerale malfermitaj. La alto de la kolono respondanta al ***superpremo*** de 1 mbar egalas al

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{100\,N/m^2}{1000\,kg/m^3 \cdot 9{,}81\,N/kg} = 0{,}0102\,m = 10{,}2\,mm$$

Hidrargoplenigitaj manometroj (aŭ barometroj) kutime estas fermitaj. Do ili mezuras ***absolutan premon***. La alto de la kolono respondanta al premo de 1 mbar egalas al

$$h = \frac{p}{\rho \cdot g} = \frac{100\,N/m^2}{13550\,kg/m^3 \cdot 9{,}81\,N/kg} = 0{,}000752\,m = 0{,}752\,mm$$

La alto de la kolono respondanta al la meza atmosfera premo en marnivelo estas:

$$h_0 = 1013\,mbar \cdot 0{,}752\,\frac{mm}{mbar} = 762\,mm$$

En pasinteco la atmosfera premo, estis kutime mezurita per milimetroj da hidrargo (mmHg). Tiu mezurunuo estas ankoraŭ uzata laŭnorme por la arteria tensio.

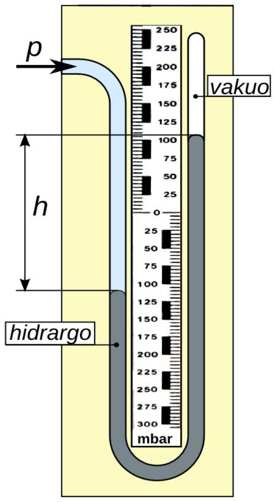


Fig. 3.32: Fermita manometro

3.3.4 Atmosfera premo

La ***atmosfera premo*** en iu loko de la tera atmosfero estas la hidrostatika premo kaŭzata per la pezo de la aero super la loko mem.

La surfaco de la Tero estas la fundo de "maro de aero". Pro tio la atmosfera premo malpliiĝas ju pli, des pli pliiĝas la altitudo. Tio estis unuafoje pruvata per la franca sciencisto Blaise Pascal.([19])

Al marnivelo la meza atmosfera premo sumiĝas je $\boldsymbol{p_{atm} = 1{,}013\,bar = 1013\,hPa}$

La malpliiĝo de atmosfera premo ne estas lineare dependa de altitudo, sed la dependeco estas ĉirkaŭ eksponenciala.

Por ĉiuj 5,5 km de pliiĝo de altitudo la premo duoniĝas.

Ekzemple en la altitudo de $33\,km = 6 \cdot 5{,}5\,km$ la premo egalas al

$$p_{33} = \frac{1013\,hPa}{2^6} = \frac{1013\,hPa}{64} = 16\,hPa$$

La diagramo de Fig. 3.33 montras la mezan atmosferan premon depende de altitudo. Ene de la troposfero, la efektivaj valoroj iom ŝanĝiĝas depende de la atmosfera kondiĉo.

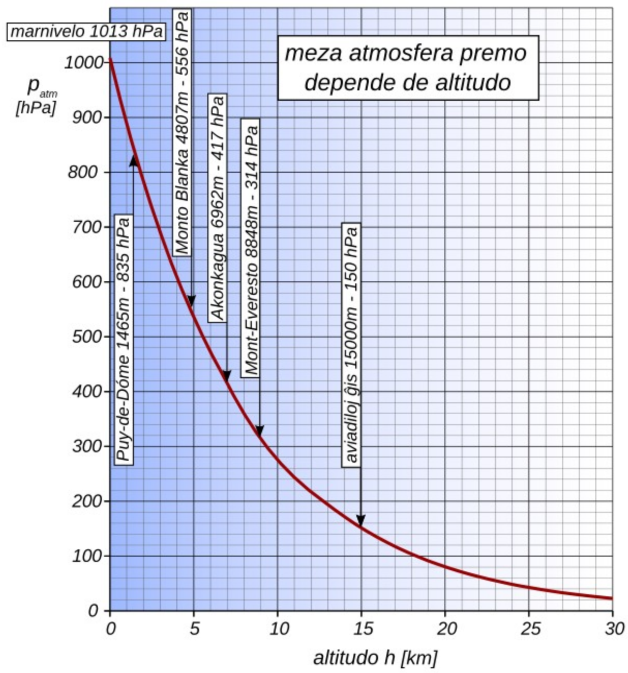


Fig. 3.33: Meza atmosfera premo depende de altitudo

19 Pascal kunportis hidrargoplenigitan barometron kaj suriris monton Puy-de-Dŏme, kiu estas je 1000 m pli alta ol sia hejmurbo. Li observis, ke la alto de la kolono de hidrargo malpliiĝis je Δh = 82 mm konforma al malpliiĝo de premo je $\Delta p = \frac{\Delta h}{0{,}752\,mm/hPa} = \frac{82\,mm}{0{,}752\,mm/hPa} = 109\,hPa$

3.3.5 Suprenforto

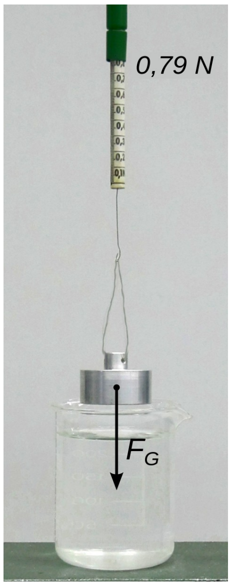


Fig. 3.34

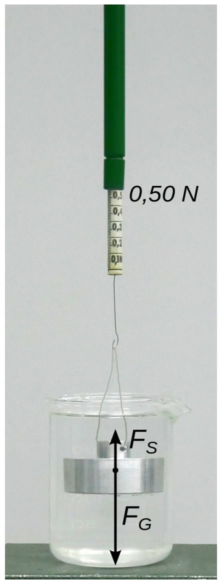


Fig. 3.35

En eksperimento de Fig. 3.34/3.35, la fortmezurilo mezuras la forton, kiu necesas por subteni la aluminan cilindron. Ĝi egalas al 0,79 N kiam la cilindro troviĝas ekster akvo (3.34), sed ĝi malgrandiĝas al valoro de 0,50 N kiam la cilindro estas enakvigita (Fig. 3.35).

Sekvas, ke en akvo agas forto, kiu puŝas la korpon supren. Tiu forto agas ankaŭ en ĉiu alia fluido kaj estas nomata ***suprenforto*** $\boldsymbol{F_S}$.

La kialo de suprenforto estas facile komprenebla, se oni rezonas pri la hidrostatika premo aganta sur la korpon.

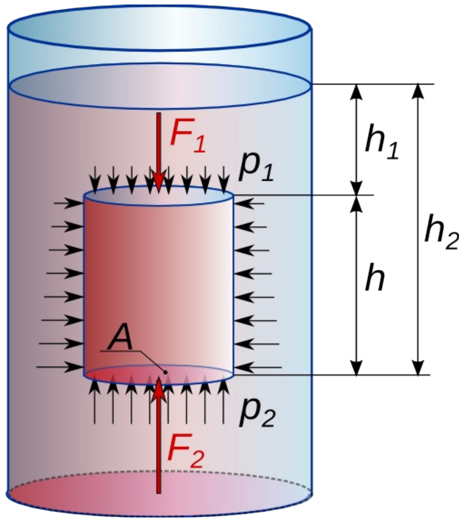


Fig. 3.36

Rilate al la skizo de Fig. 3.36, la premo aganta sur la supran facon de enakvigita korpo rezultas

$$p_1 = \rho \cdot g \cdot h_1$$

kie ρ estas la denso de fluido.

La forto, kiu puŝas la korpon malsupren, estas

$$F_1 = p_1 \cdot A = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot A$$

La premo aganta sur la suba faco rezultas

$$p_2 = \rho \cdot g \cdot h_2$$

La forto, kiu puŝas la korpon supren, estas

$$F_2 = p_2 \cdot A = \rho \cdot g \cdot h_2 \cdot A$$

La rezultanta suprenforto rezultas

$$F_S = F_2 - F_1 = \rho \cdot g \cdot A \cdot (h_2 - h_1) = \rho \cdot g \cdot A \cdot h = \rho \cdot g \cdot V$$

V estas la volumeno de mergita korpo, kiu estas egala al volumeno de forŝovita fluido. Fine rezultas la tiel nomata ***principo de Arkimedo***[20]

$$F_S = \rho \cdot g \cdot V = m \cdot g = F_G$$

La suprenforto aganta sur korpo, kiu troviĝas ene de fluido, ***estas egala al pezoforto de fluido, forŝovita*** per la korpo mem.


Fig. 3.37: Arkimedo farante eksperimentojn

20 **Arkimedo** (helene Αρχιμήδης *Arĥimedes,* 287-212 a.K.) estis elstara, greka matematikisto kaj inĝeniero. Legendo rakontas, ke li malkovris la principon dum banado kaj tuj elkuris, preskaŭ tute nuda, en la stratoj de Sirakuzo, kriante "Eŭreka!" (mi trovis ĝin).

Eksperimento 3.3

La principo de Arkimedo bone taŭgas por determini la volumenon de korpo, enakvigante ĝin en akvoplenigita glaso, kiu staras sur pesilo.
Unue oni metas akvoplenigitan glason sur la pesilon, kiu ĉisekve estas tarata, pro kio ĝi montras la ciferojn 0,00 (vidu Fig. 3.38). Poste, la mezurenda korpo estas enakvigata. Nun la pesilo montras nombron, kiu estas egala al la maso de la forŝovita akvo en gramoj (vidu Fig. 3.39).

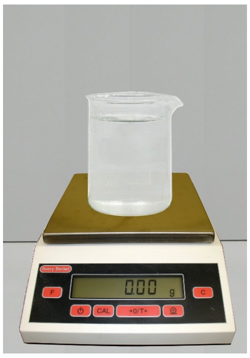


Fig. 3.38

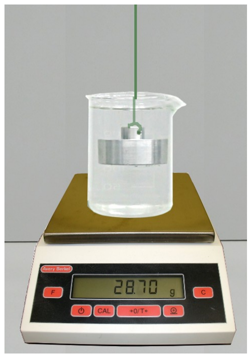


Fig. 3.39

Ĉar akvo havas denson de 1,00 g/cm³, sia maso en gramoj estas egala al sia volumeno en cm³. Do, pro la principo de Arkimedo, la pesilo montras la volumenon de la forŝovita akvo kaj samtempe la volumenon de la enakvigita korpo.

Ekzemplo 3.5

Kiom grandas la denso de materialo de la korpo, enakvigita en eksperimento de Fig. 3.34 kaj Fig. 3.35 pag. 36?

Solvo

$F_G = 0{,}79\,N$ → maso de korpo $m = \frac{F_G}{g} = \frac{0{,}79\,N}{9{,}81\,N/kg} = 0{,}081\,kg = 81\,g$

$F_G - F_S = 0{,}50\,N$ → suprenforto aganta sur korpon $F_S = F_G - 0{,}50\,N = 0{,}29\,N$

La korpo estas mergita en akvo, do la denso de fluido rezultas $\rho_F = 1{,}0\ g/cm^3$

Pro la principo de Arkimedo $F_S = \rho_F \cdot V \cdot g$ →

$$V = \frac{F_S}{\rho_F \cdot g} = \frac{0{,}29\,N}{1{,}0\,kg/dm^3 \cdot 9{,}81\,N/kg} = 0{,}030\,dm^3 = 30\,cm^3$$

La denso de la materialo de korpo rezultas

$$\rho_K = \frac{m}{V} = \frac{81\,g}{30\,cm^3} = 2{,}7\,g/cm^3$$

Kiel oni atendis por aluminio.

3.3.5.1 *Solvenda problemo*

En la mezurujo de Fig. 3.40 troviĝas akva sukera solvaĵo .
Kiam la ŝtoneto estas ekster la likvo, la fortmezurilo indikas $F_1 = 0{,}33\ N$, kaj kiam ĝi estas mergita en la likvo $F_2 = 0{,}19\ N$.
Helpe de la mezurujo oni vidas, ke la volumeno de la ŝtoneto egalas al 13 cm³.
Kalkulu la denson de la ŝtona materialo kaj de la likvo!

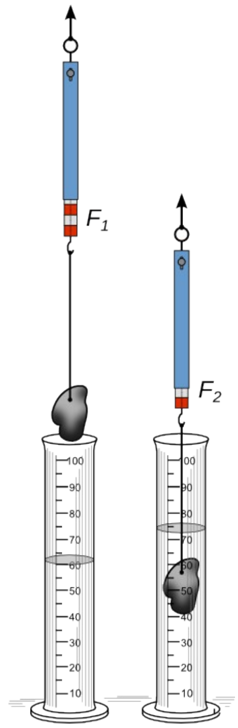


Fig. 3.40

3.3.6 Naĝado

Se la denso de fluido estas pli granda ol la meza denso de mergita korpo, suprenforto supe- -ras pezoforton de la korpo.

Sekve la korpo moviĝas supren, ĝis parto de ĝi malmergiĝas, kaj la korpo naĝas.

Naĝa pozicio estas ekvilibra pozicio, en kiu suprenforto egalas pezoforton de la korpo.

$F_S = F_{GK}$ → por la principo de Arkimedo

$m_F \cdot g = m_K \cdot g$ → $\boldsymbol{m_F = m_K}$

La maso de la forŝovita fluido estas egala al la maso de naĝanta korpo.

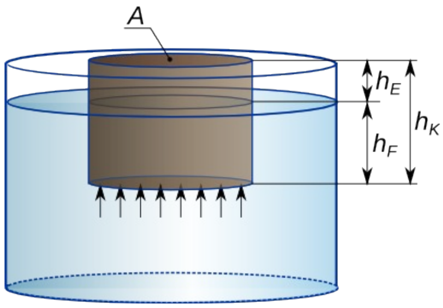


Fig. 3.41

Pro ĉi-lasta ekvilibra kondiĉo rezultas:

$m_F = m_K$ → $V_F \cdot \rho_F = V_K \cdot \rho_K$

Se la naĝanta korpo estas prismoforma (Fig. 3.41), sekvas:

$A \cdot h_F \cdot \rho_F = A \cdot h_K \cdot \rho_K$ → $h_F = h_K \cdot \frac{\rho_K}{\rho_F}$

La parto de korpo malmergiĝanta el fluido estas $h_E = h_K - h_F = h_K \cdot (1 - \frac{\rho_K}{\rho_F})$

3.3.7 Ekzemploj

Ekzemplo 3.6 Floso

Ligna floso konsistas el 8 trunkoj kun volumeno de po 0,15 m³ . La denso de la ligno sumiĝas je 600 kg/m³. Kiom granda povas fariĝi la maso de la ŝarĝo sur la floso, ĝis la trunkoj estas tute subakvigitaj?

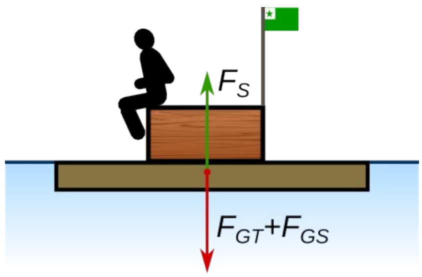


Fig. 3.42

Solvo

volumeno de subakvigita korpo $V = 8 \cdot 0{,}15\,m^3 = 1{,}2\,m^3$

denso de ligno $\rho_T = 600\ kg/m^3$ →

maso de trunkoj $m_T = V \cdot \rho_T = 1{,}2\ m^3 \cdot 600\ kg/m^3 = 720\ kg$

denso de fluido (akvo) $\rho_F = 1000\ kg/m^3$ →

maso de forŝovita likvo $m_F = V \cdot \rho_F = 1{,}2\ m^3 \cdot 1000\ kg/m^3 = 1200\ kg$

En ekvilibra situacio la suprenforto egalas la tutan pezoforton aganta sur la trunkojn kaj la ŝar- ĝon.

$F_S = F_{GT} + F_{GS}$ → $m_F \cdot g = m_T \cdot g + m_S \cdot g$ →

$m_S = m_F + m_T = 1200\ kg - 720\ kg = 480\ kg$

Respondo: La maksimuma ŝarĝo sumiĝas je 480 kg.

Ekzemplo 3.7 Veterbalono ([21])

La haŭto de veterbalono (Fig. 3.43) havas mason de 0,45 kg. Ĝi estas plenigita surtere kun helio (denso 0,18 kg/m³). La maso de la transportendaj mezuriloj sumiĝas je 2,9 kg.
Kiom granda devas fariĝi la diametro de balono, ĝis la suprenforto suficas por minimuma ascendo?

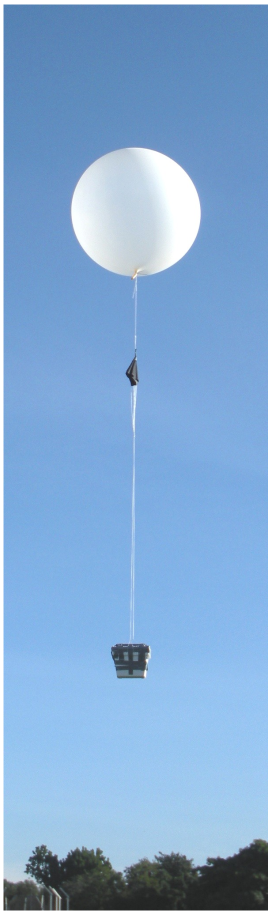


Fig. 3.43

Solvo

maso de balonhaŭto	$m_H = 0{,}45\ kg$
maso de mezuriloj	$m_M = 2{,}90\ kg$
denso de aero	$\rho_A\ = 1{,}29\ kg/m^3$
denso de helio	$\rho_{He} = 0{,}18\ kg/m^3$

ekvilibra situacio $\quad F_S = F_{GH} + F_{GM} + F_{GHe} \quad \rightarrow$

$$m_A = m_H + m_M + m_{He} \qquad m_A = V \cdot \rho_A \qquad m_{He} = V \cdot \rho_{He} \qquad \rightarrow$$

$$V \cdot \rho_A - V \cdot \rho_{He} = m_H + m_M$$

$$V = \frac{m_H + m_M}{\rho_A + \rho_{He}} = \frac{0{,}45\,kg + 2{,}9\,kg}{1{,}29\,kg/m^3 - 0{,}18\,kg/m^3} = 3{,}02\,m^3$$

$$V = \frac{d^3 \cdot \pi}{6} \quad \rightarrow \quad \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 3{,}02\,m^3}{\pi}} = 1{,}8\,m$$

Respondo: La balono devas esti blovigata ĝis la diametro egalas al 1,8 m

3.3.8 Solvendaj problemoj

1. Glacia kubo, kies lateroj estas longaj 1,8 cm, naĝas en akvo.
   Kiom la kubo malmergiĝas? (denso de glacio 916 kg/m³)

2. Veterbalono, kies haŭto havas mason de 0,32 kg, estas plenblovita kun hidrogeno kaj havas diametron de 1,5 m.
   Kiom granda povas fariĝi la maso de la mezuriloj, por ke la balono ankoraŭ supreniru? (denso de hidrogeno 0,09 kg/m³, denso de aero 1,29 kg/m³)

3.3.9 Respondoj al la solvendaj problemoj de ĉapitro 3

Problemoj el paragrafo 3.3.5

La denso de la ŝtona materialo estas 2,6 g/cm³ kaj la denso de la likvo 1,1 g/cm³

Problemoj el paragrafo 3.3.8

1. La kubo malmergiĝas je 1,4 mm
2. La maso de la mezuriloj povas sumiĝi maksimume je 1,8 kg.

---

21 Veterbalonoj transportas mezurilojn ĝis altitudo de ĉirkaŭ 30 km. Dum ascendo la atmosfera premo malgrandiĝas (vidu Fig. 3.33) kaj pro tio la balono pligrandiĝas. Sed, ĉar la denso de aero malgrandiĝas, la suprenforto restas preskaŭ la sama. La balono daŭrigas sian ascendon, ĝis ĝi krevas. La mezuriloj descendas per paraŝuto.

4 Premo - Volumeno – Temperaturo

4.1 Premo kaj volumeno de gasoj

Gasoj estas ***kunpremeblaj***. La volumeno de la gasa maso entenata en cilindro de Fig. 4.1 malgrandiĝas, kiam la forto aganta sur la piŝto, kaj sekve la premo en la cilindro, pligrandiĝas.

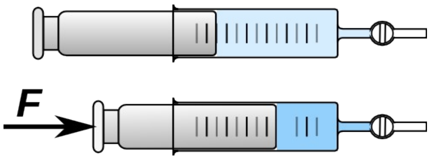


Fig. 4.1

Eksperimento 4.1 - Rilato inter premo kaj volumeno de enŝlosita gasa maso

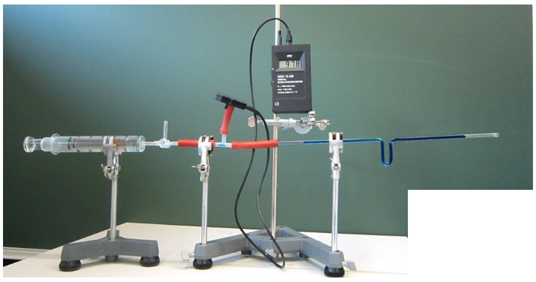


Fig. 4.2

Premante sur la piŝton de cilindro C de Fig. 4.3, aŭ tirante je ĝi, la premo ene de la gaso en la cilindro kaj la tubeto ŝanĝiĝas. Sekve ŝanĝiĝas ankaŭ la volumeno *V* de aero enŝlosita en la lasta fermita parto de tubeto.

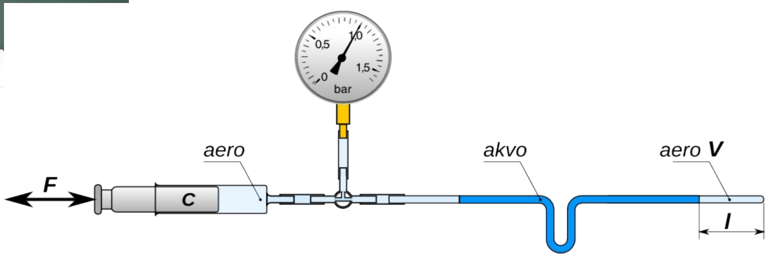


Fig. 4.3

Tiu volumeno estas mezu--rebla pere de la longo *l* , ĉar la areo de la sekco de tubeto estas konata.

La sekva tabelo Tab. 4.1 enhavas la valorojn de volumeno por kelkaj valoroj de premo.

p [hPa]	V [cm³]	p·V [Ncm]
400	3,80	15,2
500	3,05	15,3
600	2,52	15,1
800	1,92	15,4
980	1,54	15,1
1200	1,26	15,1
1400	1,10	15,4
1600	0,96	15,4
1800	0,85	15,3

Tab. 4.1

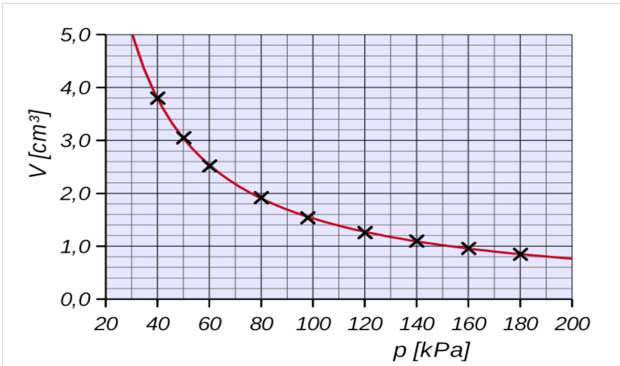


Fig. 4.4

El Tab. 4.1 rezultas, ke en ĉiu okazo la produkto de premo kaj volumeno egalas al sama valoro. Fine por iu difinita gasa maso, kies ***temperaturo estas konstanta***, validas:

$$p \cdot V = \mathit{konstanta}$$

Tiu ĉi lasta leĝo nomiĝas leĝo de ***Boyle*** kaj ***Mariotte*** *([22]) ([23])*

La diagramo de Fig. 4.4 montras, ke la rilato inter premo kaj volumemo de difinita gasa maso, kies temperaturo estas konstanta, estas prezentebla per hiperbola funkcio.

22 Robert **Boyle** (1627-1691) estis irlanda kemiisto kaj fizikisto. Li estis unu el la fondintoj de moderna natura scienco bazita sur eksperimentado. Li formulis la supran leĝon en 1662.

23 Edme **Mariotte** (1620-1684) estis unu el la fondintoj de la franca eksperimenta fiziko. Li laboris precipe pri problemoj de likvoj kaj gasoj. Li formulis la supran leĝon en 1676.

4.1.1 Premo kaj denso de gasoj

Kiam iu enŝlosita gasa maso estas kunpremata aŭ dilatata (vidu Fig. 4.5), pro la leĝo de Boyle kaj Mariotte validas:

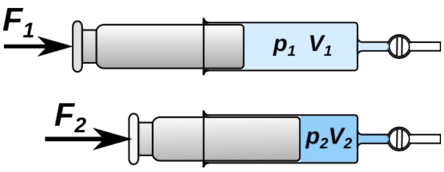


Fig. 4.5

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \rightarrow \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Ĉar la maso restas sama, $m = \rho_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot V_2$

sekvas ke: $\boldsymbol{\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_2}{V_1}}$ kaj fine: $\boldsymbol{\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2}}$

Sekvas, ke ***la densoj rilatas kiel la premoj***.

4.1.2 Ekzemploj

Ekzemplo 4.1

En ŝtala botelo, kies volumeno sumiĝas je 2,0 litroj, troviĝas hidrogeno. La superpremo en la botelo egalas al 40 bar.
Kiom da sferoformaj balonoj kun diametro de 28 cm, povas esti plenigataj per hidrogeno kun superpremo de 32 hPa.

Solvo

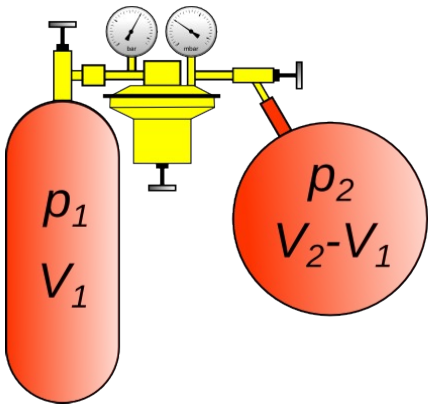


Fig. 4.6

Gravas rimarki, ke en la leĝo de Boyle kaj Mariotte, kiel en ĉiu leĝo pri gasoj, la valoro de premo uzata en la kal--kuloj, estas ĉiam la ***absoluta*** valoro. Kiam la atmosfera premo ne estas eksprese indikita, oni supozas, ke ĝia valoro sumiĝas je 1013 hPa.

$$p_1 = 40\,bar + 1\,bar = 41\,bar = 41000\,hPa$$

$$p_2 = 32\,hPa + 1013\,hPa = 1045\,hPa$$

$$V_1 = 2{,}0\,dm^3 \qquad V_2 = V_{bal} + V_1$$

Ankaŭ kiam la premo malgrandiĝas, en la botelo restas gaso. Pro tio ne la tuta gaso enhavita en la botelo povas esti blovigata en la balonoj.

Pro la leĝo de Boyle kaj Mariotte:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \rightarrow \quad V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2} = \frac{41000\,hPa \cdot 2{,}0\,dm^3}{1045\,hPa} = 78{,}5\,dm^3$$

Volumeno de gaso enblovita en balonoj: $V_{bal} = V_2 - V_1 = 78{,}5\,dm^3 - 2{,}0\,dm^3 = 76{,}5\,dm^3$

La volumeno enhavita en unu balono estas: $V_0 = d^3 \cdot \pi\ /6 = (2{,}8\,dm)^3 \cdot \pi\ /6 = 11{,}5\,dm^3$

Rezultas: $z = \frac{V_{bal}}{V_0} = \frac{76{,}5\,dm^3}{11{,}5\,dm^3} = 6{,}7$

Respondo: Oni povas plenigi 6 balonojn.

Ekzemplo 4.2

Sur la grundo de lago profunda 50 *m* emanas blazo da aero kun diametro de 12 *mm*.
Kiom grandos la diametro de la blazo, tuj antaŭ ĝi forlasos akvon?

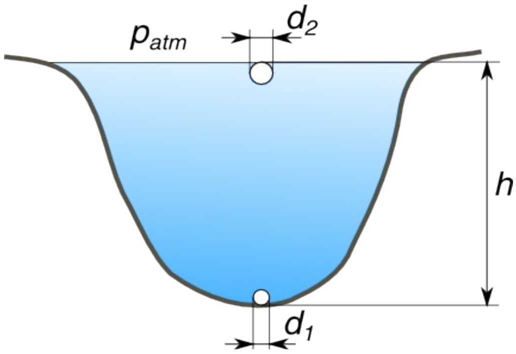


Fig. 4.7

Solvo

hidrostatika premo sur grundo

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h = 1000\,kg/m^3 \cdot 9{,}81\,N/kg \cdot 50\,m$$

$$p_h = 490500\,Pa = 4905\,hPa$$

absoluta premo sur la grundo $p_1 = p_{atm} + p_h = 1013\,hPa + 4905\,hPa = 5918\,hPa$

absoluta premo ĉe la surfaco $p_2 = p_{atm} = 1013\,hPa$

volumeno de la blazo sur grundo $V_1 = d_1{}^3 \cdot \pi / 6 = (12\,mm)^3 \cdot \pi / 6 = 905\,mm^3$

Pro la leĝo de Boyle kaj Mariotte $V_2 = \dfrac{p_1 \cdot V_1}{p_2} = \dfrac{5918\,hPa \cdot 905\,mm^3}{1013\,mm^3} = 5287\,mm^3$

diametro de la blazo ĉe la surfaco $d_2 = \sqrt[3]{\dfrac{6 \cdot V_2}{\pi}} = \sqrt[3]{\dfrac{6 \cdot 5287\,mm^3}{\pi}} = 21{,}6\,mm$

Respondo: La diametro de la blazo ĉe la surfaco sumiĝas je 21,6 mm

Ekzemplo 4.3

PET-botelo, kun volumeno de 1,5 litroj, enhavanta nur aeron, estas fermita sur Monto Blanka (altitudo 4807 m).
a) Kiom grandas la maso de aero en la botelo?
b) Kiom grandos la volumeno de aero en la botelo, kiam ĝi estos portita al vilaĝo de Chamonix (altitudo 1270 m)? La temperaturo restas sama kaj egalas al 0°C.

Fig. 4.8

Solvo

El diagramo de Fig. rezultas por la atmosfera premo
sur Monto Blanka $p_1 = 556\ hPa$
en Chamonix $p_2 = 860\ hPa$

El la tabelo 2.1 en paĝo 24 rezultas, ke ĉe la premo $p_0 = 1013\ hPa$ la denso de la aero sumiĝas je $\rho_0 = 1{,}29\ kg/m^3$.

Pro la leĝo de Boyle kaj Mariotte $\dfrac{\rho_1}{\rho_0} = \dfrac{p_1}{p_0}$

rezultas por la denso de aero sur Monto Blanka

$$\rho_1 = \frac{\rho_0 \cdot p_1}{p_0} = \frac{1{,}29\,kg/m^3 \cdot 556\,hPa}{1013\,hPa} = 0{,}708\,\frac{kg}{m^3} = 0{,}708\,\frac{g}{l}$$

maso de aero enhavita en la botelo $m = \rho_1 \cdot V_1 = 0{,}708\,\frac{g}{l} \cdot 1{,}5\,l = 1{,}1\,g$

volumeno de aero en Chamonix $V_2 = \dfrac{p_1 \cdot V_1}{p_2} = \dfrac{556\,hPa \cdot 1{,}5\,l}{860\,hPa} = 0{,}97\,l$

4.2 Temperaturo

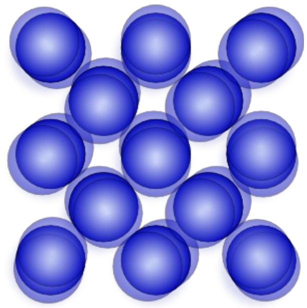


Fig. 4.9: Ju pli alta estas la temperaturo, des pli la partikloj vibras.

Temperaturo estas fizika grando, kiu indikas kiom varma aŭ malvarma iu korpo estas.

El mikroskopa vidpunkto, temperaturo rilatas al rapido de la hazarda, vibranta movado de molekuloj aŭ atomoj. Ĉar ĉi-lasta ne estas videbla kaj mezurebla, por mezuri temperaturon oni uzas ecojn de korpo, kiuj ŝanĝiĝas depende de la temperaturo ekzemple: longo, volumeno, elektra rezistanco, koloro ktp.

4.2.1 Termometroj

Ilo por mezuri temperaturon nomiĝas ***termometro.*** Generale ĝi mezuras iun econ de materialo aŭ korpo, kiu ŝanĝiĝas depende de la temperaturo.

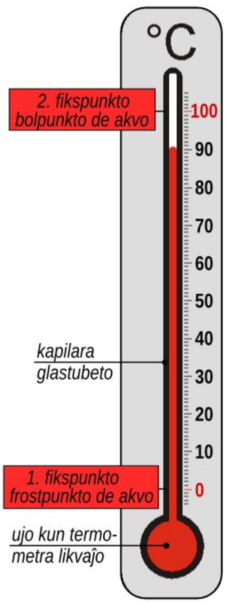


Fig. 4.10: Likvo-termometro

Ofte uzataj, klasikaj termometroj estas ***likvo-termometroj***.

Malgranda glasa ujo estas kunligita kun glasa kapilara tubeto (vidu Fig. 4.10). La ujo enhavas termometran likvon, generale hidrargo aŭ alkoholo, kies volumeno ŝanĝiĝas depende de la temperaturo. Ju pli alta estas la temperaturo, des pli alta estas la nivelo de la likvo en la kapilara tubeto. Konvena skalo indikas valoron de la temperaturo.

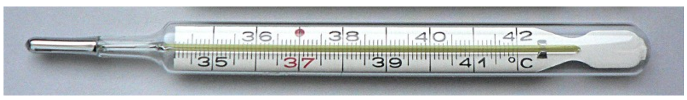


Fig. 4.11: Klasika febro-termometro; la termometra likvo estas hidrargo.

Bimetalaj termometroj baziĝas sur la malsama temperaturdependa dilato de metaloj. (vidu 4.3.1.1)

En ***elektraj termometroj*** estas mezurata iu elektra grando (generale rezistanco aŭ potenciala diferenco) kiu ŝanĝiĝas depende de temperaturo.

Por fariĝi mezurilo, termometroj bezonas ***temperaturskalon.***

Temperaturskalo povas esti difinita pere de du temperaturaj fikspunktoj kies distanco estas egale subdividita.

4.2.1.1 Celsia skalo

La ***celsia skalo*** de Fig. 4.10, kies mezurunuo estas la ***grado celsia (°C)***, havas kiel unua fikspunkto la frostpunkton de akvo ĉe 0°C kaj kiel dua fikspunkto, la bolpunkton de akvo, al premo de 1013 hPa, ĉe 100°C.

La celsia skalo estas nomita laŭ la sveda sciencisto Anders Celsius ([24]) kiu proponis ĝin en la jaro 1742.

La formulsimbolo de la temperaturo mezurata en gradoj celsiaj estas ϑ (theta).

24 Anders **Celsius** (esperante "Celsio") (1701 - 1744) estis sveda astronomo, matematikisto kaj fizikisto. Li estis profesoro en Upsala kaj fondis la unuan svedan observatorion.

4.2.1.2 Kelvina skalo – absoluta temperaturo

Baza skalo en la internacia sistemo de mezurunuoj estas la ***absoluta temperaturskalo*** aŭ ***kelvina skalo***, kies mezurunuo estas la ***kelvino (K)***.

Du faktoj difinas tiun skalon: ***0 K*** estas ***absoluta nulo*** (je kiu molekula movo ĉesas), kaj la temperaturo de frostpunkto de akvo egalas al ***273,15 K.*** La kialo de ĉi lasta valoro estos klarigata en par.4.3.5. La kelvina skalo estas nomata laŭ la irlanda fizikisto William Thomson (Lord Kelvin).([25])

La formulsimbolo de absoluta temperaturo estas ***T***.

Por konverti la celsian temperaturon en absolutan temperaturon aŭ inverse, validas la sekvaj formuloj:

$$T = \vartheta + 273{,}15\ \mathrm{K} \qquad \vartheta = T - 273{,}15\ °\mathrm{C}$$

Sekvas, ke la absoluta nulo en la celsia skalo troviĝas je -273,15 °C. Tio estas la plej malalta temperaturo kiu ekzistas.

En la absoluta temperaturskalo ne ekzistas negativaj temperaturoj.

La grando de la unuoj *grado celsia* kaj *kelvino* estas egala. Tio signifas ke ***temperaturdiferencoj*** estas egalaj en kelvina kaj celsia skalo $\Delta T = \Delta\vartheta$.

Generale estas rekomendita uzi la *kelvinon* por temperaturdiferencoj.

4.3 Dilato termika

Dilato termika estas la pligrandiĝo de volumeno de korpoj, kaŭzita per la plialtiĝo de tem--peraturo.

Kiam iu substanco estas varmigata, la movo de ĝiaj partikloj fariĝas pli rapida. Pro tio ĝenerale ([26]) la distanco inter la partikloj pligrandiĝas kaj sekve ankaŭ la mezuroj de la korpo kaj ĝia volumeno pligrandiĝas.

4.3.1 Linia dilato de solidaj korpoj

Ĉe solidaj korpoj gravas precipe la ŝanĝiĝo de ilia longo depende de la temperaturo, la tiel nomata linia dilato. Ĝi estas grava aspekto por la elekto de materialoj en la konstruaĵoj kaj por la plenumado de la konstruaĵoj mem.

Ofte estas bezonataj apartaj iloj, por eviti ke la dilato termika kaŭzu damaĝojn al la konstruaĵo.Fig. 4.12

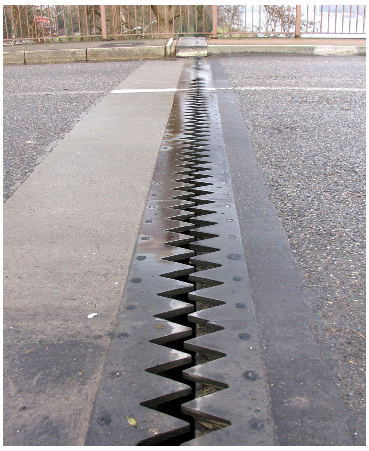


Fig. 4.12: Junto de dilato sur ponto

La sekva eksperimento esploras, de kio dependas la linia dilato de solidaj korpoj.

25 William **Thomson** (1824 - 1907) estis irlanda fizikisto, kiu faris gravajn laborojn precipe en elektrotek--niko kaj termodinamiko. Pro liaj bonfaroj, li iĝis la unua Barono Kelvino de Largs, pli konata kiel Lord **Kelvin**.

26 Escepto estas akvo inter la temperaturo de 0°C kaj 4°C . En tiu temperaturintervalo la volumeno de akvo malaltiĝas kvankam la temperaturo plialtiĝas (vidu 4.3.3.1).

*Eksperimento 4.2 - **Koeficiento de linia dilato***

Estas mezurata la plilongiĝo de tuboj depende de la plialtiĝo de temperaturo. La longo kies pli--longiĝo estas mezurata sumiĝas je $l_0 = 0{,}86$ m.
Unue oni registras la komencan valoron de la temperaturo kaj taras la komparilon.
Poste vaporo trafluas la tubon kaj varmigas ĝin, ĝis temperaturo de pli ol 80 °C. Tiam la komparilo indikas la maksimuman plilongiĝon de la tubo.
Kiam vaporo ne plu fluas tra la tubo, ĝia temperaturo malpliiĝas kaj ĝi mallongiĝas. Por diversaj temperaturoj oni trovas la konformajn plilongiĝojn kiuj estas registrataj en Tab. 4.2 kaj Tab. 4.3 respektive por tubo en aluminio kaj rustrezista ŝtalo.

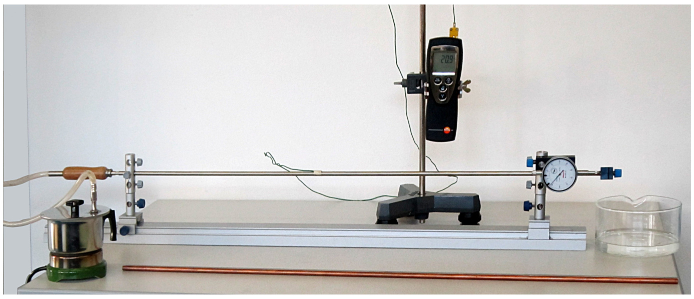


Fig. 4.13: Eksperimentilo por mezuri linian dilaton

aluminio $\vartheta_0 = 25$ °C			
MP	ϑ [°C]	ΔT [K]	Δl [mm]
1	80	55	1,10
2	70	45	0,88
3	60	35	0,67
4	50	25	0,48
5	40	15	0,28
6	30	5	0,10

Tab. 4.2

rustrezista ŝtalo $\vartheta_0 = 25$ °C			
MP	ϑ[°C]	ΔT [K]	Δl [mm]
1	80	55	0,83
2	75	50	0,74
3	65	40	0,60
4	55	30	0,43
5	45	20	0,29
6	35	10	0,14

Tab. 4.3

El la valoroj de la tabeloj rezultas la diagramo de Fig.4.14
Oni vidas, ke por ĉiu materialo, la plilongiĝo Δl estas proporcia al plialtiĝo de la temperaturo
→ $\Delta l \propto \Delta T$

Rigardante la figuron Fig. 4.15 estas evidenta, ke por difinita plialtiĝo de temperaturo, la plilongiĝo estas proporcia al la komenca longo de la korpo → $\Delta l \propto l_0$

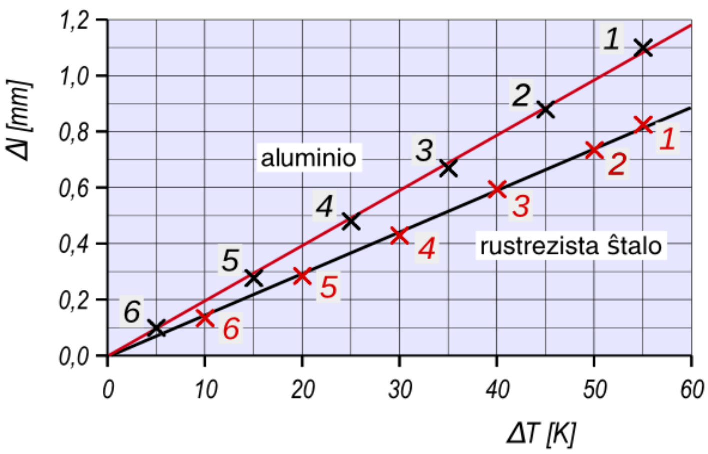


Fig. 4.14 Diagramo ΔT–Δl por aluminio kaj rustrezista ŝtalo

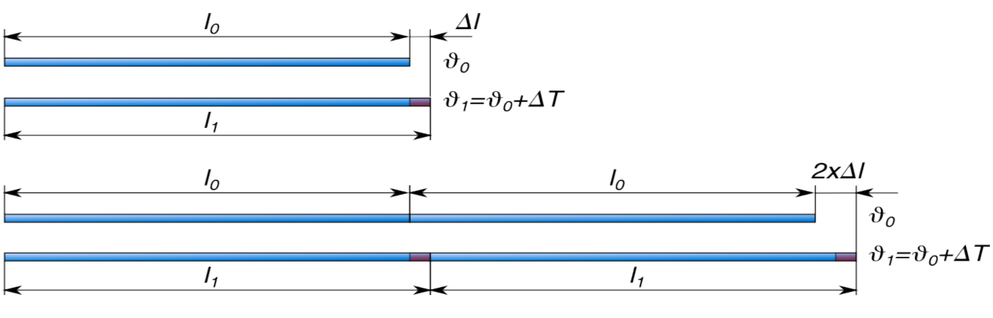


Fig. 4.15

Fine el eksperimento 4.2 kaj el Fig. 4.15 rezultas por la longoŝanĝiĝo de korpoj el sama materialo:

$$\Delta l \propto l_0 \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} = konstanta$$

La konstanto estas nomata ***koeficiento de linia dilato*** kaj havas formulsimbolon $\boldsymbol{\alpha}$.

$$\boldsymbol{\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}} \quad \rightarrow \quad \text{kiel mezurunuo estas uzata} \quad [\alpha] = \frac{mm}{m \cdot K} = 10^{-3} \frac{1}{K}$$

Por kalkuli la longoŝanĝiĝon rezultas $\boldsymbol{\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T}$

El Fig. 4.14 rezultas, ke la mezurpunktoj MP 2 staras relative precize sur la kompensorekto. Do oni akiras la sekvajn valorojn por la koeficiento de linia dilato.

Por aluminio:

$$l_0 = 0{,}86\,m \qquad \Delta l = 0{,}88\,mm \qquad \Delta T = 45\,K \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{0{,}88\,mm}{0{,}86\,m \cdot 45\,K} = 0{,}023\,\frac{mm}{mK}$$

Por rustrezista ŝtalo:

$$l_0 = 0{,}86\,m \qquad \Delta l = 0{,}74\,mm \qquad \Delta T = 50\,K \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{0{,}74\,mm}{0{,}86\,m \cdot 50\,K} = 0{,}017\,\frac{mm}{mK}$$

En Tab. 4.4 troviĝas valoroj de la koeficiento de linia dilato por kelkaj materialoj.

Oni atentu, ke struktura ŝtalo kaj betono havas saman koeficienton. Tio tre gravas, ĉar la du materialoj estas uzataj kune en ŝtalbetono. Se ili ne longo-ŝanĝiĝus samgrade, naskiĝus streĉoj kiuj damaĝus la konstruaĵon.

Koeficiento de linia dilato	
materialo	α [mm/(mK)]
plumbo	0,029
aluminio	0,023
flava kupro	0,018
rustrezista ŝtalo	0,017
kupro	0,016
aŭro	0,014
fero	0,012
struktura ŝtalo	0,012
betono	0,012
glaso	0,008

Tab. 4.4

4.3.1.1 Bimetalo

Bimetalo estas metala strio, kiu konsistas el du ladfolioj de malsamaj metaloj forte kunligitaj. (vidu Fig. 4.17)

Ĉar la koeficientoj de dilato de la metaloj estas malsamaj, kiam la temperaturo ŝanĝiĝas, la strioj kurbiĝas. Tiu kvalito estas uzata en diversaj iloj kiel termometroj, termostatoj aŭ termaj protektoŝaltiloj. (vidu Fig.4.16)

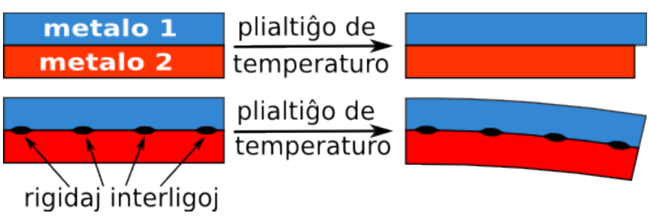


Fig. 4.17 Bimetalstrio

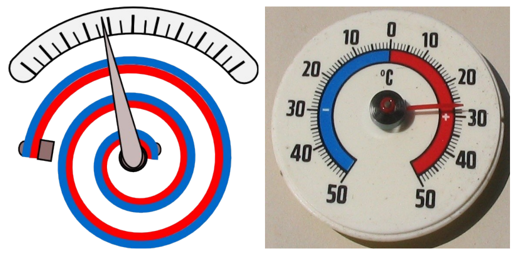


Fig.4.16: Bimetaltermometro

Ekzemplo 4.4

La longo de seĝotelfero sumiĝas je 2500 m. En vintro la minimuma temperaturo atingas -25 °C kaj en somero la maksimuma temperaturo atingas +35 °C.
Je kiom ŝanĝiĝas la longo de la ŝtalkablo, se ĝia koeficiento de linia dilato egalas al $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ 1/K ?

Solvo

$l_0 = 2500\,m$

$\Delta T = \vartheta_s - \vartheta_v = 35\,°C - (-25\,°C) = 60\,K$

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$$

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \cdot 2500\,m \cdot 60\,K = 1{,}8\,m$$

Respondo: La longo de ŝtalkablo ŝanĝiĝas je 1,8 *m*. Do tio estas la minimuma movlibereco de la tiel nomata streĉveturilo, sur kiu estas muntita la kablodisko en unu de la du stacioj.

Fig. 4.18: Streĉstacio de seĝotelfero

4.3.2 Volumena dilato de solidaj korpoj

Kompreneble, kiam ŝanĝiĝas temperaturo, ne nur la longo, sed ankaŭ la alto kaj la larĝo de solidaj korpoj ŝanĝiĝas. Do okazas ŝanĝo de la volumeno ΔV.

Ĉe la temperaturo iniciala ϑ_0 la volumeno sumiĝas je : $V_0 = a \cdot b \cdot c$

Kiam la temperaturo plialtiĝas je ΔT , rezultas :

$\Delta a = \alpha \cdot a \cdot \Delta T$

$\Delta b = \alpha \cdot b \cdot \Delta T$

$\Delta c = \alpha \cdot c \cdot \Delta T$

La pligrandiĝo de volumeno la varmigita korpo egalas al (27):

$$\Delta V = a \cdot b \cdot \Delta c + b \cdot c \cdot \Delta c + c \cdot a \cdot \Delta b$$
$$= a \cdot b \cdot \alpha \cdot c \cdot \Delta T + b \cdot c \cdot \alpha \cdot a \cdot \Delta T + c \cdot a \cdot \alpha \cdot b \cdot \Delta T$$
$$= 3 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot \alpha \cdot \Delta T = 3 \cdot \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

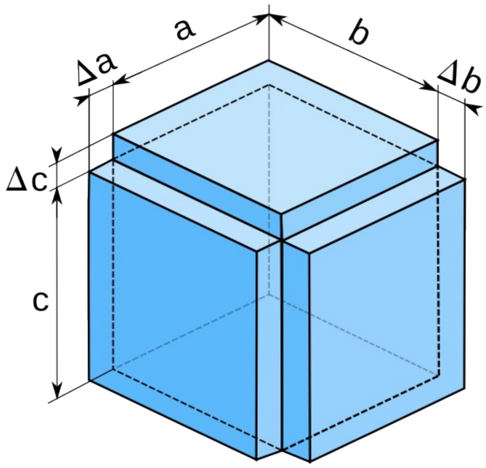


Fig. 4.19

Uzante $\mathbf{3 \cdot \alpha = \gamma}$ kiel ***koeficiento de volumena (aŭ kuba) dilato***, la formulo por kalkuli la volumenan ŝanĝiĝon rezultas :

$$\mathbf{\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T}$$

Por la koeficiento de volumena dilato rezultas:

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T} \quad \rightarrow \quad \text{kiel mezurunuo estas uzata} \quad [\gamma] = \frac{cm^3}{dm^3 \cdot K} = 10^{-3} \frac{1}{K}$$

27 Estas matematike pruvebla, ke oni povas neglekti senerare la volumetojn mankantajn en la anguloj.

4.3.3 Volumena dilato de likvoj

Ankaŭ por likvoj validas la formulo eltrovita por soldidaj korpoj.

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T$$

Eksperimento 4.3 - ***Koeficiento de volumena dilato***

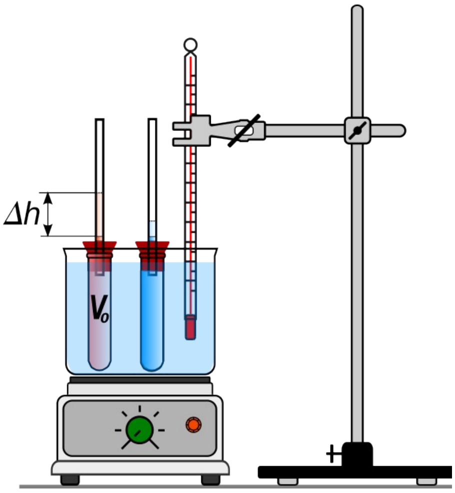


Fig. 4.20

Provtuboj enhavantaj volumenon $V_0 = 36{,}5\ cm^3$ respektive da akvo kaj butanolo estas mergitaj en ujo plenigita per akvo (vidu Fig. 4.20). La provtuboj estas fermitaj per ŝtopilo kun mezurtubeto, kiu ebligas dilaton de la likvoj enhavitaj. Ĉe la komenca temperaturo ϑ_0, oni devas precize marki la nivelon de la likvoj en la mezurtubetoj.

Poste la temperaturo de akvo en ujo estas plialtigata je ΔT. Post iom da tempo, la likvoj en la provtuboj atingas la temperaturon de la ĉirkaŭstaranta akvo kaj ilia nivelo en la mezurtubetoj plialtiĝas je Δh.

La areo de la sekco interna de mezurtubetoj sumiĝas je A = 25 mm². Oni povas kalkuli la ŝanĝon de volumeno $\Delta V = A \cdot \Delta h$ kaj per tio la koeficienton de volumena dilato. La valoroj mezuritaj estas la sekvaj:

$\vartheta_0 = 22\ °C$ $\quad \vartheta_1 = 34\ °C$ $\quad \rightarrow \quad \Delta T = 12\,K$

akvo $\quad \Delta h = 5{,}5\,mm \quad \Delta V = \Delta h \cdot A = 5{,}5\,mm \cdot 25\,mm^2 = 138\,mm^3$

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T} = \frac{0{,}14\,cm^3}{36{,}5\,cm^3 \cdot 12\,K} = 3{,}2 \cdot 10^{-4}\,\frac{1}{K}$$

butanolo $\quad \Delta h = 16\,mm \quad \Delta V = \Delta h \cdot A = 16\,mm \cdot 25\,mm^2 = 400\,mm^3$

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta T} = \frac{0{,}40\,cm^3}{36{,}5\,cm^3 \cdot 12\,K} = 9{,}1 \cdot 10^{-4}\,\frac{1}{K}$$

Gravas observi, ke ĝenerale la koeficiento de dilato ŝanĝiĝas depende de temperaturo. Tiu ŝanĝiĝo estas pli evidenta por likvoj ol por solidoj. Pro tio la valoroj eltrovitaj en eksperimento 4.3 validas nur en la konsi--derata temperaturkampo. ([28])

En Tab. 4.5 troviĝas valoroj de koeficiento de volumena dilato en la ĉirkaŭo de 20 °C, por kelkaj likvoj. Estas videbla, ke likvoj dilatiĝas 20-100 foje pli ol solidoj.

La ŝanĝiĝo de la koeficiento de volumena dilato depende de temperaturo estas precipe grava por akvo. Pro ĝia strangeco ĝi nomiĝas ***densanomalio de akvo.***

Koeficiento de volumena dilato	
Likvo ĉe 20 °C	γ [10^{-3} 1/ K]
acetono	1,43
etanolo	1,10
benzino	1,00
butanolo	0,97
glicerino	0,50
akvo	0,21
hidrargo	0,18

Tab. 4.5

28 La rezultoj eltrovitaj en eksperimento 4.3 estas iom malprecizaj ankaŭ, ĉar ne estas konsiderata la fakto, ke ne nur la likvo, sed ankaŭ la solido enhavante ĝin, t.e. la provtubo, dilatiĝas.

4.3.3.1 Densanomalio de akvo

Kiam la temperaturo malaltiĝas, ĉe preskaŭ ĉiuj likvoj la volumeno malgrandiĝas kaj ilia denso pliiĝas. Malvarmigante akvon, oni observas strangan konduton. Ĝis temperaturo de 4°C la volumeno malgrandiĝas sed inter 4°C kaj 0°C ĝi denove pligrandiĝas. Pro tio, ĉe temperaturo de 4°C (precize 3,8 °C) akvo havas ĝian maksimuman denson, kaj inter 0°C kaj 4 °C la koeficiento de volumena dilato estas negativa.

Diagramoj de Fig. 4.21 respektive Fig. 4.22 montras je kiom sumiĝas la volumeno de 1000 gramoj da akvo inter 0°C kaj 25°C respektive 0°C kaj 100 °C.

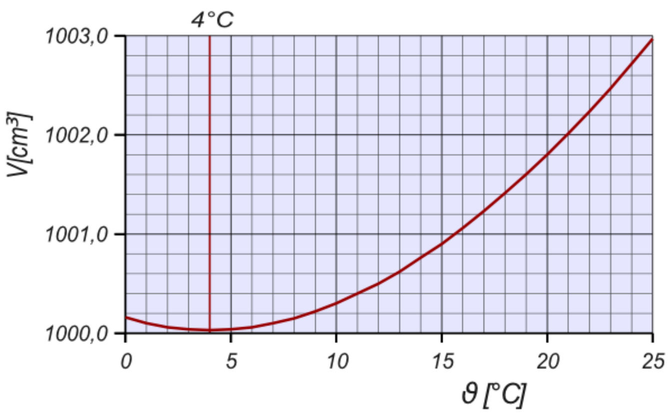


Fig. 4.21

El la diagramoj eblas kalkuli la koeficientojn de volumena dilato por akvo en ĉiu temperaturintervalo. Kelkaj valoroj troviĝas en la sekva tabelo.

Koeficiento de volumena dilato por akvo	
temperaturintervalo	γ [10^{-3} 1/ K]
10 °C - 20 °C	0,15
20 °C - 30 °C	0,26
10 °C - 30 °C	0,20
10 °C - 50 °C	0,30
10 °C - 90 °C	0,45

Tab. 4.6

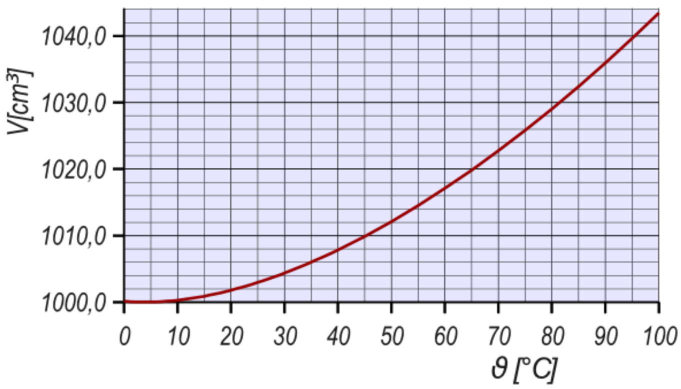


Fig. 4.22

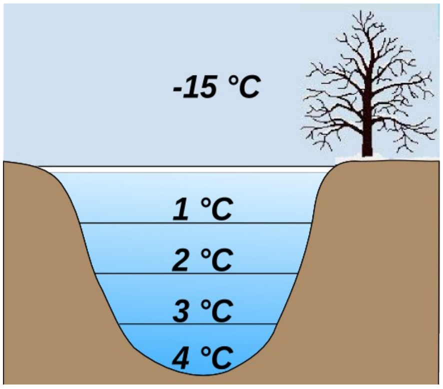


Fig. 4.23: Akvo kun 4 °C staras pli malsupre kaj ne glaciiĝas

Konsekvenco de la densanomalio estas, ke la grandaj akvoamasoj de la Tero glaciiĝas de sia surfaco, kaj ke ili glaciiĝas nur malrapide, ĉar la estiĝanta tavolo de glacio ([29]) estas barilo kontraŭ la varminterŝanĝo inter akvo kaj aero.

Tiel oni eĉ en tre malvarmaj vintroj akvo en granda profundo ne glaciiĝas, sed havas temperaturon de 4 °C. Se akvo ne havus tiun anomalion, la akvomasoj tute glaciiĝus, kun seriozaj konsekvencoj por ĉiuj vivaĵoj.

Ankaŭ ĉe la substancoj Antimono, Bismuto, Gallio, Germaniumo, Plutonio kaj Silicio montriĝas densanomalioj.

29 Estas ne kutima ankaŭ la fakto, ke en solida stato, t.e. glacio, akvo estas pli malpeza ol en likva stato. Pro tio la formiĝanta glacio restas super la akvo.

4.3.4 Ekzemploj

Ekzemplo 4.5

Iu aĉetas 9000 litrojn da hejtoleo el fuelkamiono ĉe temperaturo de 35°C. Kiom da litroj troviĝas en la cisterno, kiam la temperaturo egalas al 5 °C? La koeficiento de volumena dilato por hejtoleo egalas al 1,0 x 10^{-3} 1/K.

Solvo

$V_0 = 9000\ l$ $\quad \gamma = 1{,}0 \cdot 10^{-3}\ 1/K$ $\quad \Delta T = \vartheta_1 - \vartheta_0 = 5\ °C - 35\ °C = -30\ K$

$$\Delta V = \gamma \cdot V_0 \cdot \Delta T = 1{,}0 \cdot 10^{-3} \cdot 9000\, l \cdot (-30\, K) = -270\, l$$

$$V_1 = V_0 + \Delta V = 9000\, l - 270\, l = 8730\, l$$

Respondo: Ĉe temperaturo de 5°C la cisterno enhavas 8730 litrojn da hejtoleo.

Ekzemplo 4.6

Hejtinstalaĵo enhavas entute 520 litrojn da akvo, kies temperaturo ŝanĝiĝas de 10 °C al 90 °C.
Kiom grandas la volumeno de akvo, fluanta en la dilatujon?([30])
La tubsistemo de cirkvito estas farita el komuna ŝtalo ($\alpha = 0{,}12 \cdot 10^{-4}\, 1/K$).

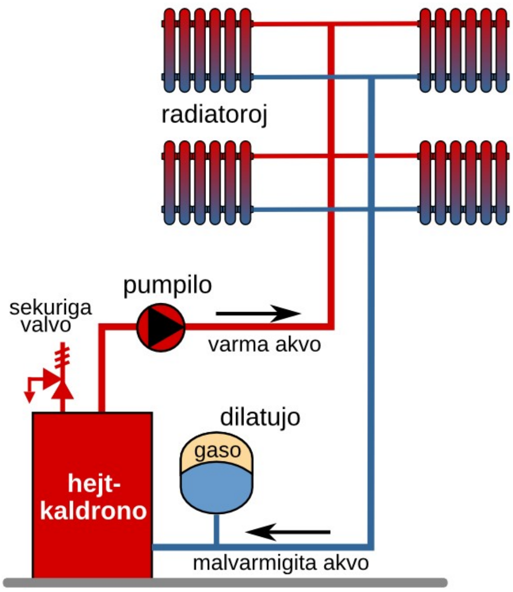


Fig. 4.24: Principskemo de fermita hejtinstalaĵo

Solvo

$V_0 = 520\ l$ $\quad \Delta T = \vartheta_1 - \vartheta_0 = 80\ K$

por la akvo:
$\gamma_A = 0{,}45 \cdot 10^{-3}\ 1/K$ (vidu tab. 4.6)

$$\Delta V_A = 0{,}45 \cdot 10^{-3} \frac{1}{K} \cdot 520\, l \cdot 80\, K = 18{,}7\, l$$

por la tubsistemo:
$\gamma_T = 3 \cdot \alpha = 0{,}36 \cdot 10^{-4}\ 1/K$

$$\Delta V_T = 0{,}36 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K} \cdot 520\, l \cdot 80\, K = 1{,}5\, l$$

Ĉar la tubsistemo dilatiĝas je 1,5 l, en la dilatujon fluas nur la diferenco inter ΔV_A kaj ΔV_T .

$$V_D = \Delta V_A - \Delta V_T = 18{,}7\, l - 1{,}5\, l = 17{,}2\, l$$

Respondo: La volumeno de akvo fluanta en dilatujo sumiĝas je 17,2 litroj. Pro pli granda sekureco oni devas munti dilatujon, kiu permesas la enfluon de almenaŭ 20 litroj. Kompreneble la tuta volumeno de dilatujo dependas de la iniciala premo de gaso kaj de la maksimuma premo tolerebla en la tubsistemo. Ĉilasta estas kontrolata per sekuriga valvo.

30 En modernaj hejtinstalaĵoj akvo cirkulas en fermita cirkvito. Ĉar la temperaturo de akvo ene de cirkvito ŝanĝiĝas, ŝanĝiĝas ankaŭ ĝia volumeno. Por permesi tiun ŝanĝon, en cirkvito ĉeestas dilatujo. Ĝi estas plenigita per gaso, kiu, kiel ni iam vidis, estas facile kunpremebla kaj pro tio permesas la dilaton de akvo.

4.3.5 Volumena dilato de gasoj

Kiam oni varmigas la botelon de Fig. 4.25 per ma--noj, la kolono de likvo en la tubeto tuj komencas plialtiĝi.

Kompreneble la kialo ne estas la dilato de la likvo mem, sed la ege pli granda dilato de aero en la balono.

Ĉar la ligo inter la partikloj de gasoj estas preskaŭ nula, ilia distanco ege pligrandiĝas, kiam pliiĝas la rapido de ilia hazarda movado.

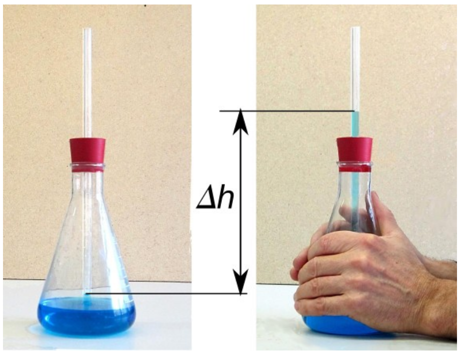


Fig. 4.25: Varmigante la botelon la likvo--kolono plialtiĝas.

Eksperimento 4.4

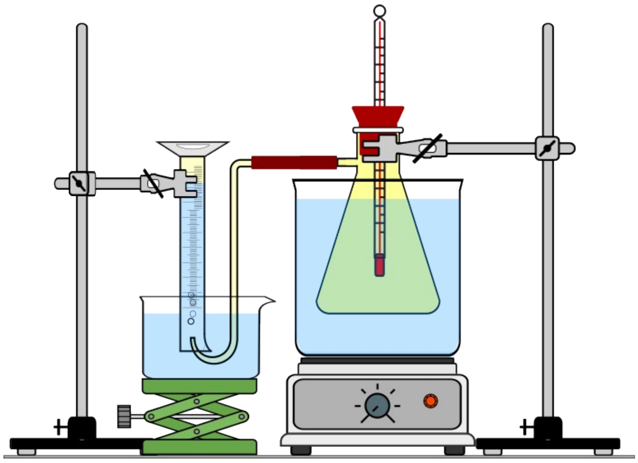


Fig. 4.26

Fig. 4.27

Komence la akvo en la ujo, en kiu troviĝas la flakono plena de aero, estas malvarmigata per glackubetoj. Kiam la aero estos atinganta la minimuman temperaturon, oni eningas la elflutubeton en la mezurcilindron.

Nun la hejtplato estas enŝaltata kaj la temperaturo de akvo plialtiĝas. Sekve ankaŭ la tempera--turo de aero en flakono plialtiĝas, ĝi dilatas kaj la elfluanta aero fluas en la mezurcilindro. Tia--maniere oni mezuras la volumenon ΔV de elfluinta aero.

La rezultoj estas kolektitaj en Tab. 4.7. El tiuj rezultoj eblas desegni la diagramon de Fig. 4.28 . Oni vidas, ke kompensorekto bone proksimiĝas al la mezurpunktoj.

komenca temperaturo ϑ_1 = 4 °C					
komenca volumeno V_1 = 553 cm³					
MP	ϑ [°C]	ΔT [K]	ΔV [cm³]	T [K]	V [cm³]
1	4	4	0	277	553
2	18	18	32	291	585
3	28	28	51	301	604
4	37	37	68	310	621
5	43	43	78	316	631

Tab. 4.7

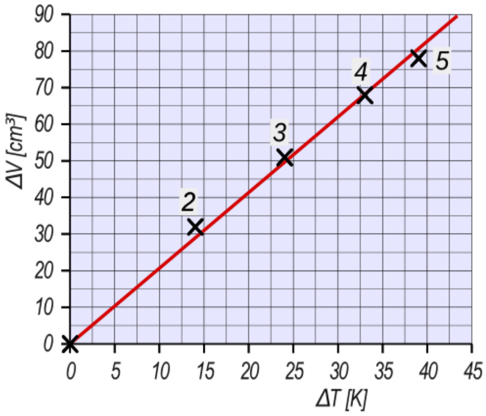


Fig. 4.28

La diagramo de Fig. 4.28 montras, ke por difinita maso da gaso, ĉe ***konstanta premo*** la ŝanĝiĝo de volumeno estas proporcia al ŝanĝigo de temperaturo.

$$\Delta V \propto \Delta T$$

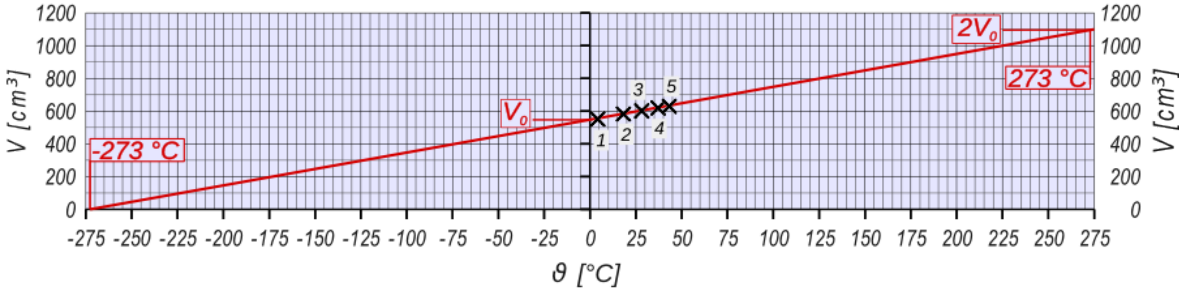


Fig. 4.29

El la valoroj de Tab. 4.7 eblas desegni diagramon de Fig. 4.29, kiu montras la valorojn de volumeno depende de celsia temperaturo.

Rezultas, ke la regresa rekto akirebla per la mezurpunktoj sekcas la temperaturakson ĉe la valoro de -273 °C. Sekvas, ke ĉe la temperaturo de -273 °C la volumeno de la gaso estus nula. Kompreneble negativaj volumenoj ne estas imageblaj kaj la valoro de -273 °C reprezentas absolutan minimumon. Pro tio ĝi estis elektita kiel nulpunkto de la absoluta temperaturskalo aŭ kelvina skalo.

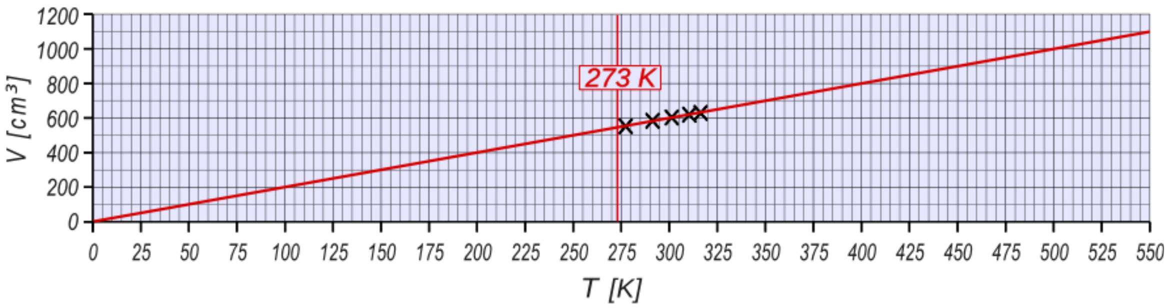


Fig. 4.30

Uzante la kelvinan skalon, el valoroj de Tab. 4.7 rezultas la diagramo de Fig. 4.30. Sekvas ke, ĉe ***konstanta premo***, por difinita gasa maso rezultas:

$$V \propto T \quad \rightarrow \quad \frac{V}{T} = konstanta$$

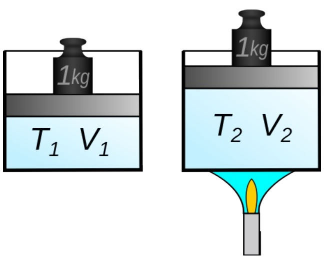


Fig. 4.31

Tiu ĉi lasta leĝo nomiĝas ***leĝo de Gay-Lussac*** ([31]) aŭ leĝo de ***Charles***.([32])

Se oni havas difinitan gasmason en ujo kun konstanta premo (vidu Fig. 4.31), ŝanĝante la temperaturon de gaso rezultas:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

31 Louis Joseph **Gay-Lussac** (1778 -1850) estis franca kemiisto kaj fizikisto. En 1802, li malkovris dilatleĝon de gasoj. En 1804 li faris du suprenirojn per balono por studi la variaĵojn de tera magnetismo kaj la komponon de aero.

32 Jacques **Charles** (1746-1823) estis franca fizikisto. Li malkovris la leĝon pri dilato de gasoj en 1787, sed li ne publikigis ĝin. Pro sia scio pri gasoj, li unue kapablis konstrui hidrogenbalonon kaj flugi kun ĝi.

4.3.6 Ekvacio de stato de gasoj

Kiam difinita gasmaso trapasas de stato 1 al stato 2, oni povas supozi, ke tio okazas unue, ĉe konstanta temperaturo, ŝanĝante nur premon de p_1 al p_2, kaj due, ĉe konstanta premo, ŝanĝante nur temperaturon de T_1 al T_2. (vidu Fig. 4.32)

Kompreneble dum la unua statŝanĝiĝo estas bezonata malvarmigo kaj dum la dua varmigo de gaso.

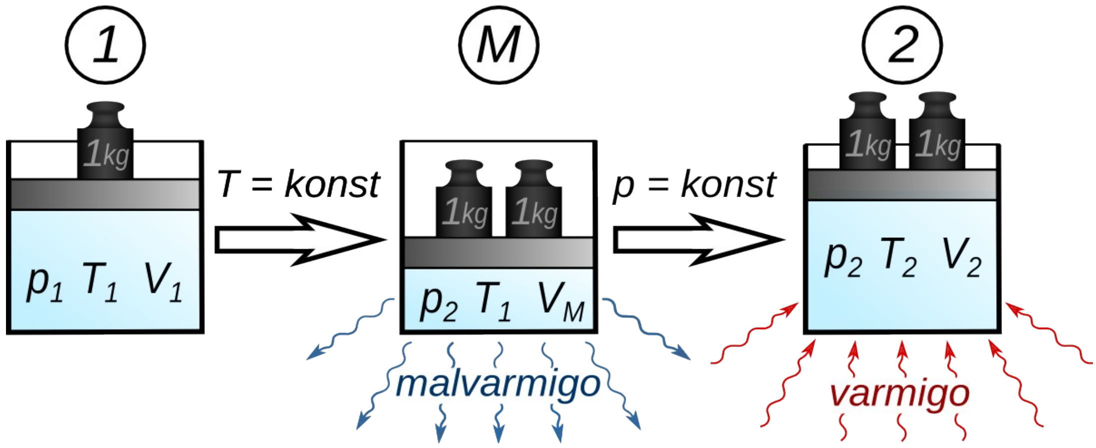


Fig. 4.32

Por la unua statŝanĝiĝo 1 - M validas la leĝo de Boyle kaj Mariotte.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_M \quad \rightarrow \quad V_M = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2}$$

Por la dua statŝanĝiĝo 2 - M validas la leĝo de Charles.

$$\frac{V_M}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \rightarrow \quad V_M = \frac{T_1 \cdot V_2}{T_2} \quad \rightarrow \quad \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2} = \frac{T_1 \cdot V_2}{T_2} \quad \rightarrow \quad \boldsymbol{\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}}$$

Ĝenerale sekvas, ke por iu difinita gasmaso

$$\boldsymbol{\frac{p \cdot V}{T} = konstanto} \quad ([33])$$

Ĉi lasta leĝo nomiĝas ***ekvacio de stato de gasoj***. Ĝi estas precize valida nur por idealaj gasoj ([34]).

Realaj gasoj sekvas la leĝon ju pli, des pli malalta estas ilia premo kaj des pli ilia temperaturo staras super la bolpunkto de likvo.

Multaj gasoj (aero, hidrogeno, helio ktp) jam ĉe normalaj kondiĉoj kondutas kiel idealaj kaj sekvas la supran leĝon.

33 En kemio kaj termodinamiko la leĝo estas ĝenerale skribita kiel $pV = n\,R\,T$, kie n estas difinita nombro da moloj de la gaso, kaj R estas la universala gaskonstanto. Kompreneble, ĉar nR estas konstanto por difi--nita gasmaso, la formulo estas ekvivalenta al la supra formulo.

34 Ideala gaso estas gaso, en kiu la ligo inter la partikloj estas nula kaj ilia dimensio estas preskaŭ nula kompare kun ilia mezuma distanco.

4.3.7 Ekzemploj

Ekzemplo 4.7 Varmaerbalono ([35])

Varmaerbalono havas volumenon de 5000 m^3. La temperaturo de la ĉirkaŭanta aero egalas al 0 °C.

a) Kiom granda estas la maso de aero en la balono, kiam ĝi estas varmigita al temperaturo de 100 °C?

b) Kiom granda estas la maksimuma maso transportebla, se la totala maso de haŭto, korbo, brulilo kaj gasboteloj sumiĝas je 600 kg?

Fig. 4.33 Varmaerbalono

Solvo

volumeno de balono $V_B = 5000\ m^3$

denso de aero ĉe 0 °C $\rho_0 = 1{,}29\ kg/m^3$

temperaturo de aero en balono
$T_1 = (100+273)K = 373\ K$

a) Ĉar la balono estas malfermita, ĝia interna premo restas ĉiam egala al la aerpremo. Do la varmigo de aero okazas ĉe konstanta premo kaj validas la leĝo de Charles.

$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}$ Por la volumenoj validas $V_0 = \frac{m}{\rho_0}$ $V_1 = \frac{m}{\rho_1}$ → $\frac{m}{\rho_0 \cdot T_0} = \frac{m}{\rho_1 \cdot T_1}$

Por difinita maso sekvas $\rho_0 \cdot T_0 = \rho_1 \cdot T_1$

Rezultas $$\rho_1 = \frac{\rho_0 \cdot T_0}{T_1} = \frac{1{,}29\,kg/m^3 \cdot 273\,K}{383\,K} = 0{,}92\frac{kg}{m^3}$$

maso de aero en balono $m_B = V_B \cdot \rho_1 = 5000\,m^3 \cdot 0{,}92\frac{kg}{m^3} = 4600\,kg$

b) La maso de aero ĉirkaŭanta forŝovita per la balono estas

$$m_0 = V_B \cdot \rho_0 = 5000\,m^3 \cdot 1{,}29\frac{kg}{m^3} = 6450\,kg$$

pro la leĝo de Arkimedo $m_T = m_0 - m_B - 600\,kg = 1250\,kg$

Respondo: a) La maso de varma aero en balono sumiĝas je 4600 kg.
b) La maksimuma maso transportebla sumiĝas je 1250 kg.

35 Varmaerbalono estas grandega balono plenigita per varmigita aero, tiel ke ĝi ekricevas sufiĉe da portokapablo por flugi. Por starti, la balono estas unue ekblovata per ventumilo kaj poste la aero en balono estas varmigata per gasbruligilo.

Ekzemplo 4.8 Pneŭpremo

Antaŭ longa vojaĝo la superpremo en la pneŭoj de aŭtomobilo egalas al 2120 hPa kaj la temperaturo al 12 °C. Post kelkaj horoj da vojaĵo oni mezuras premon de 2400 hPa.
Je kiom sumiĝas tiam la temperaturo en la pneŭoj? (atmosfera premo 1000 hPa!)

Solvo

$p_1 = 1000\ hPa + 2120\ hPa = 3120\ hPa$

$p_2 = 1000\ hPa + 2400\ hPa = 3400\ hPa$

$T_1 = (12 + 273)\ K = 285\ K$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Ĉar la volumeno de la pneŭoj restas preskaŭ konstanta, rezultas $V_1 = V_2$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \rightarrow \quad T_2 = \frac{p_2 \cdot T_1}{p_1} = \frac{3400\,hPa \cdot 285\,K}{3120\,hPa} = 311\,K = 38\,°C$$

Respondo: La temperaturo sumiĝas je 38 °C.

4.3.8 Solvendaj problemoj

1. Kiom da aero emanas el klasĉambro (8m x 8m x 3m), kiam la temperaturo plialtiĝas de 5 °C al 25 °C kaj la premo ne ŝanĝiĝas?
2. PET-botelo kun volumeno de 1,5 litroj enhavanta aeron, estas fermita sur monto alta 3200 metroj (p_1 = 680 hPa) ĉe temperaturo de 5 °C.
   Kiom granda estos la volumeno de la aero en la botelo, kiam ĝi estos portita malsupren al nivelo de 200 m (p_2 = 980 hPa), kie la temperaturo egalas al 30 °C?

Respondoj

1. La volumeno emaninta sumiĝas je 14 m³.
2. La volumeno de la aero en botelo sumiĝas je 1,1 litroj.

5 Laboro – Energio – Povumo

5.1 Laboro

La viro en la bildo de Fig. 5.1 troviĝas en oficejo kaj laboras per komputilo. En la bildo de Fig. 5.2 li ferias kaj grimpas sur rokon.

En senco de fiziko, tiu viro plenumas pli da laboro, kiam li ferias, ol kiam li laboras.

Fig. 5.1:

Fig. 5.2:

Fizika laboro estas plenumata nur, kiam persono aŭ maŝino faras ion, por kio estas bezonata fizika peno.

Ekzemple, oni plenumas multe da fizika laboro, kiam oni ludas tenison, grimpas sur rokon aŭ levas pezon, kontraŭe, la laboro plenumita estas nur tre malmulta, kiam oni skribas leteron, korektas hejmtaskojn aŭ planas domon.

Kompreneble en ĉi tiu libro, la vorto ***laboro*** estas ĉiam uzata en senco de fizika laboro.

Estos konsiderataj la sekvaj ***specoj de laboro***:

levlaboro, farata dum levo de korpo al pli alta nivelo,
akcellaboro, farata dum ŝanĝiĝo de rapido de korpo,
etendlaboro, farata dum ŝanĝiĝo de formo de korpo,
frotlaboro, farata dum movo de korpo por venki froton ([36])

Ekzemploj

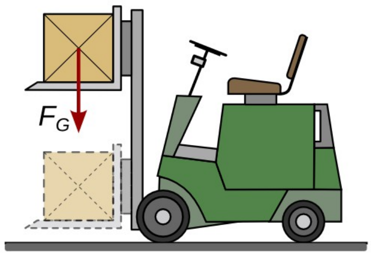


Fig. 5.5

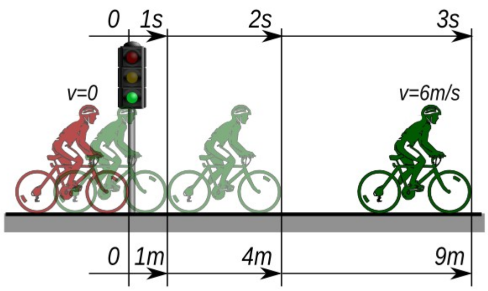


Fig. 5.3

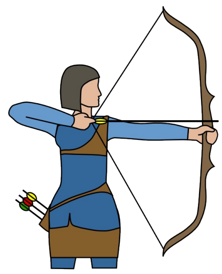


Fig. 5.4

1. En la bildo de Fig. 5.5 la forktraktoreto levas ŝarĝon. Ĝi plenumas ***levlaboron***.

2. En la bildo de Fig. 5.3 la biciklisto plialtigas sian rapidon. Li plenumas ***akcellaboron.***

3. En la bildo de Fig. 5.4 la arkpafistino etendas arkon. Ŝi plenumas ***etendlaboron.***

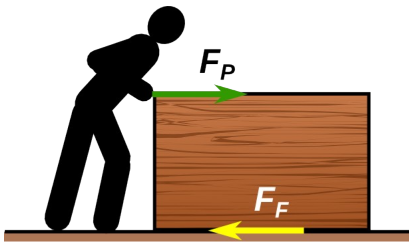


Fig. 5.6

4. En la bildo de Fig. 5.6 la laboristo forŝovas keston. Li plenumas ***frotlaboron.***

36 Dum ĉiu reala laboro, ĉeestas ankaŭ almenaŭ malgranda parto da frotlaboro.

Laboro estas karakteriza grando por ĉiu ***proceso***. Ĝi estas ***plenumata*** ĉiam, kiam okazas proceso, per kiu io estas ŝanĝata.

Rilate al la ekzemploj de paĝo 56 la diversaj specoj de laboro ŝanĝas la grandojn indikatajn en la sekva tabelo.

	speco de laboro	***grando ŝanĝita***
1	levlaboro	nivelo de ŝarĝo
2	akcellaboro	rapido de biciklisto
3	etendlaboro	formo de pafarko
4	frotlaboro	temperaturo de kesto kaj grundo

Tab. 5.1

5.2 Energio

Energio estas tio, kio necesas por plenumi laboron.

Energio estas karakteriza grando por ĉiu ***stato*** de korpo. Korpo (aŭ sistemo de korpoj) en ĉiu stato ***havas*** difinitan kvanton da energio. Kiam io aŭ iu havas energion, ŝi/li/ĝi kapablas fari laboron.

Ekzistas diversaj formoj de energio, listigitaj en la sekva tabelo.

	formo de energio	***dependas de***
1	nivelenergio	maso kaj nivelo
2	elektra energio	pozicio de elektraj ŝargoj
3	etendenergio	aliformigo
4	movenergio	maso kaj rapido
5	interna energio	materialo, maso kaj temperaturo
6	kemia energio	maso kaj materialo
7	nuklea energio	maso kaj materialo

Tab. 5.2

Nivelenergio, elektra energio kaj etendenergio estas subspecoj de la tiel nomata ***potenciala energio.***

Nivelenergio estas ju pli granda, des pli alta estas la nivelo ĉe kiu troviĝas la korpo. La valoro de nivelenergio estas ĉiam difinita rilate al iu ***nula nivelo***.

La movenergio nomiĝas ankaŭ ***kineta energio***. Ĉiu korpo, kiu moviĝas havas movenergion. Ĝi estas ju pli granda, des pli granda estas la rapido.

Kemia energio kaj nuklea energio estas liberigataj respektive dum kemiaj kaj nukleaj reakcioj.

5.3 Transformo de energio

Ĉiam, kiam estas farata laboro, energio estas transformata de unu formo en alian formon. Laboro kaj transformo de energio povas esti prezentataj per tiel nomata energitransformĉeno.

Ekzemplo 5.1 - Arkpafado

La pafisto etendas arkon, farante etendlaboron. Poste la arko havas etendenergion (1). Kiam la kordo estas maltenita, la arko, per la kordo, faras akcellaboron. La movenergio (kineta energio) de la sago estas plialtigata, ĝis la kordo estas tute malstreĉita kaj la sago havas maksimuman movenergion (2).

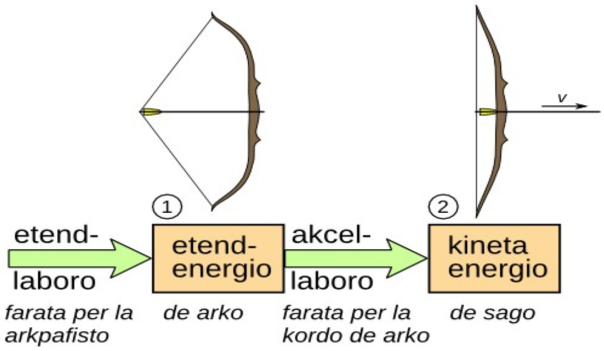


Fig. 5.7 Energitransformĉeno de arkpafado

Fig. 5.8 Ramo

Ekzemplo 5.2 - Ramo

Ramo estas ilo por enbati palisojn en la grundo. La maŝino faras levlaboron kaj levas martelon, kiu poste havas pli da nivelenergio (1). Sekve la martelo estas maltenita kaj falas. Tuj antaŭ ĝi kontaktas la palison, ĝi havas maksimuman movenergion (2). Per ĉilasta estas farata la frotlaboro bezonata por enbati la palison en la grundo. Fine pligrandiĝas la interna energio de paliso kaj grundo (3).

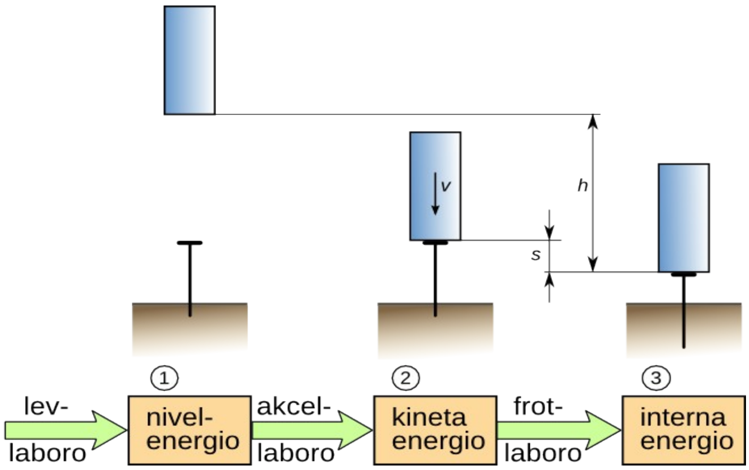


Fig. 5.9 Energitransformĉeno de ramo

Ekzemplo 5.3 - Forktraktoreto

Forktraktoreto levas ŝarĝon per elektra (aŭ kemia) energio, kiu provizas motoron. Ĝi plenumas levlaboron kaj pligrandigas la nivelenergion de ŝarĝo.

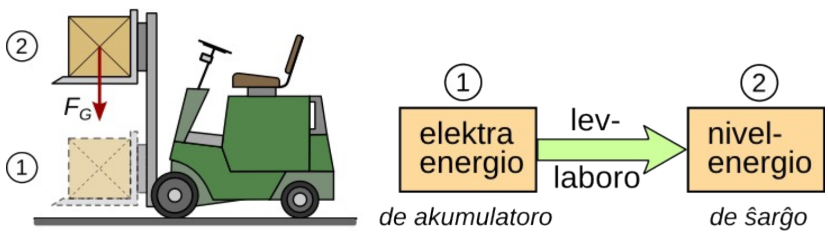


Fig. 5.10 Energitransformĉeno de forktraktoreto

5.4 Mezuro de laboro

La ekzemploj de paĝo 56 montras, ke ĉiam kiam estas plenumata laboro, estas bezonata forto.

Estas facile kompreneble, ke la fizika peno, kaj samgrade la laboro, estas ju pli granda, des pli granda estas la forto. Estas same kompreneble, ke la laboro pligrandiĝas, kiam plilongiĝas la vojo laŭ kiu la forto agas.

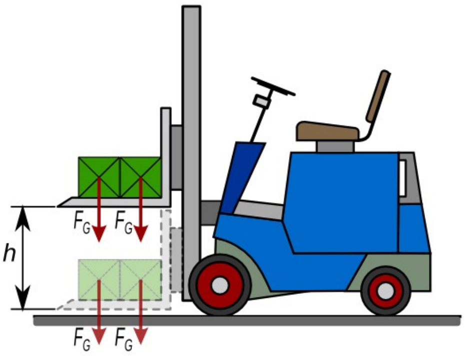


Fig. 5.11

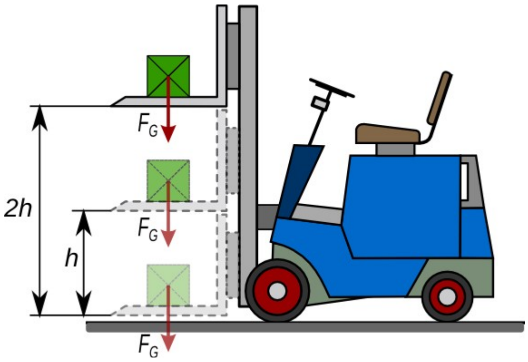


Fig. 5.12

En Fig. 5.11 la forktraktoreto levas du paketojn je la niveldiferenco h. La forto bezonata estas $2\,F_G$, kiu estas du foje la pezoforto de unu paketo. En Fig. 5.12 la forktraktoreto levas unu paketon je la niveldiferenco $2h$. Estas facile kompreneble, ke la laboro plenumata estas la sama kiel en Fig. 5.11.

Rezultas: $$2\,F_G \cdot h = F_G \cdot 2h = 2 \cdot F_G \cdot h$$

Oni vidas, ke la produkto de la forto kaj de la longo de vojo, laŭlonge kiu la forto agas, estas taŭga mezuro por la laboro plenumita.

Kiel formula simbolo por la laboro estas uzata la litero $\boldsymbol{W}$ (angle: work). Do rezultas:

$$\boxed{W = F \cdot s}$$

Gravas observi, ke la formulo validas nur, se la forto estas ***konstanta*** laŭlonge la tuta vojo, kaj forto kaj vojo estas ***samdirektitaj.***

La mezurunuo de laboro estas ***[W] = 1N · 1m = 1Nm = 1 J*** *(ĵulo)*

La ***ĵulo*** estis nomata honore al la angla fizikisto J.P. Joule ([37]).

Ekzemplo 5.4

La maso de unu paketo en Fig. 5.11 sumiĝas je 25 kg kaj la niveldiferenco estas h = 1,1 m. Kiom da laboro necesas por levi la paketojn?

Solvo

$$m = 25\,kg \quad \rightarrow \quad F_G = m \cdot g = 25\,kg \cdot 9{,}81\,kg/N = 245{,}3\,N$$

$$h = 1{,}1\,m \qquad W_L = 2 \cdot F_G \cdot h = 2 \cdot 245{,}3\,N \cdot 1{,}1\,m = 540\,Nm = 540\,J$$

Respondo: La levlaboro bezonata egalas al 540 J

37 James Prescott **Joule** (1818-1898) esploris la ecojn de varmo kaj malkovris ĝian rilaton al mekanika laboro. Ĉi tiu ideo kondukis al la teorio pri la konservado de energio. Li malkovris ankaŭ la rilaton inter la fluo de elektra kurento tra rezistanco kaj la varmo produktata pro tio.

5.5 Mezuro de energio

Ĉiam, kiam estas farata laboro, energio estas aŭ transformata aŭ transmisiata.

Ekzemple, la forktraktoreto de Fig. 5.11 faras levlaboron kaj tiamaniere ĝi transmisias energion el sia elektra akumulatoro al la paketoj, kies nivelenergio plialtiĝas. La kvanto da levlaboro farata egalas al plialtiĝo de la nivelenergio.

La mezurunuo de energio estas la ***ĵulo*** sama kiel tio de laboro.

Por la laboro de Fig. 5.11 validas: $W_L = \Delta E_N = 540\,J$

La levlaboro farita per la forktraktoreto, plialtigas la nivelenergion de paketoj je 540 J.

Estis jam rimarkita en par. 5.2, ke nivelenergio estas ĉiam difinenda rilate al iu nula nivelo. Kutime kiel nula nivelo estas uzata la plej malalta nivelo atingata dum la tuta proceso konsiderata.

Ekzemple por la pendolo de Fig. 5.13, kiel nula nivelo por la nivelenergio estas uzata la plej malalta nivelo de pendolmovo (2). Do en pozicio (2) nivelenergio egalas al nulo.

Por atingi la pozicion (1) el pozicio kun nula nivelenergio, necesas levlaboro

$$W_L = F_G \cdot h = E_{N1}$$

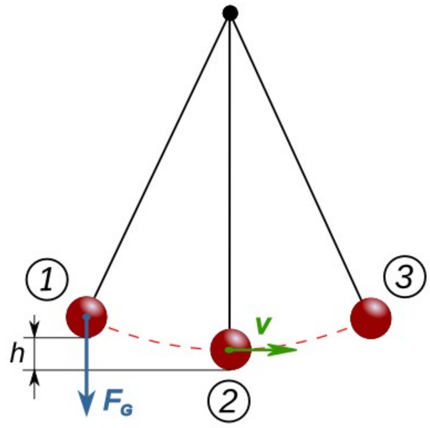


Fig. 5.13 Pendolo

Fig. 5.14 montras la energitransformĉenon de la pendolo.

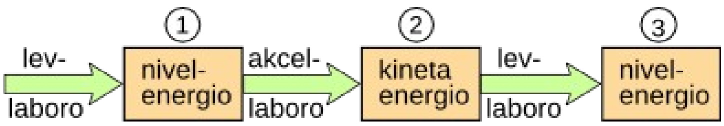


Fig. 5.14 Energitransformĉeno de pendolo

Se la movo okazus sen froto, kio reale ne eblas, la nivelenergio (1) estus egala al la movenergio (2) kaj al la nivelenergio (3).

$$E_{N1} = E_{K2} = E_{N3} \qquad \textbf{\textit{sen froto!}}$$

Ekzemplo 5.5 - Risortpistolo

Fig. 5.16 montras la energitransformĉenon de risortpistolo sen froto. La maso de pafaĵo sumiĝas je 25 g. Post depafo ĝi atingas niveldiferencon de 2,9 m.

Kiom granda estas la minimuma etendenergio entenita en la ŝarĝita pistolo?

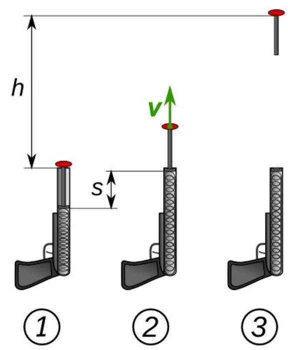


Fig. 5.15: Risortpistolo

Solvo $h = 2{,}9\,m$

$m = 25\,g \rightarrow F_G = m \cdot g = 0{,}025\,kg \cdot 9{,}81\,kg/N = 0{,}245\,N$

Se ĉiuj procedoj okazas sen froto, la entendenergio egalas al levlaboro bezonata por plialtigi la nivelon de pafaĵo.

$$E_E = \Delta E_N = F_G \cdot h = 0{,}245\,N \cdot 2{,}9\,m = 0{,}71\,J$$

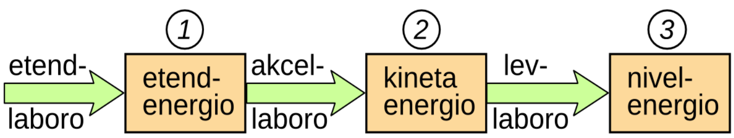


Fig. 5.16 Energitransformĉeno de risortpistolo

Respondo: La minimuma etendenergio bezonata sumiĝas je 0,71 *J*

5.6 Konservado kaj senvalorigo de energio

La viro en Fig. 5.17 tute ne devas timi, ke la pendolo tuŝegas lian nazon, post la unua oscilado. Validas la ***principo de konservado de energio.***

En iu ajn izolita sistemo (*[38]*) la tuta energio restas konstanta. Energio povas esti nek kreita nek detruita, ĝi povas nur ŝanĝi sian formon.

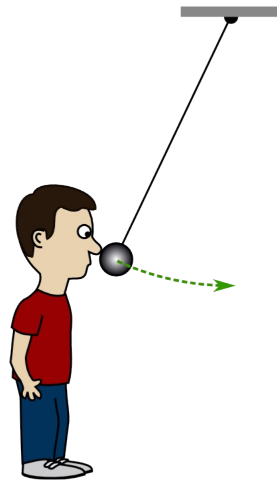


Fig. 5.17

Se la pendolo de Fig. 5.17 estus izolita sistemo, do se ĝi moviĝus en spaco sen aero kaj sia suspensio estus senfrota, ĝi atingus, post la unua oscilado, ekzakte la saman pozicion, el kiu ĝi ekmoviĝis.

Praktike oni observas, ke post ĉiu oscilado la nivelo, kiun la pendolo atingas, malaltiĝas. Post kelkaj osciladoj la moviĝo ĉesas kaj la pendolo haltas en la plej malalta pozicio. Kie troviĝas nun la ***nivel***energio, kiun la pendolo havis ĉekomence?

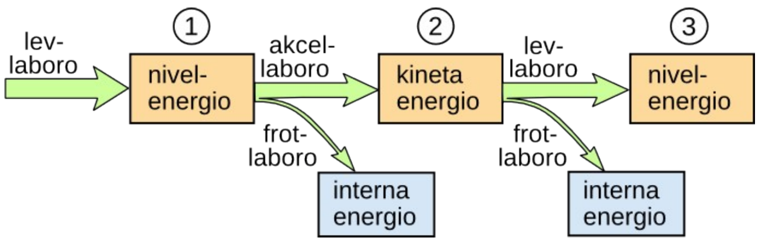


Fig. 5.18: Energitransformĉeno de pendolo kun froto

La energitransformĉeno de Fig. 5.18 montras la situaci--on rilate al pendolo de Fig. 5.14. Estas konsiderata ankaŭ la froto en la pendigilo kaj inter pendolo kaj aero.

Dum la moviĝo, parto de la komenca nivelenergio estas utiligata por frotlaboro kaj transformiĝas en internan energion. La temperaturo kaj de la pendolkorpo, kaj de la pendigilo, kaj de la ĉirkaŭa aero plialtiĝas iomete, sed nur tiom malmulte, ke oni praktike ne povas mezuri tion. Kompreneble, tiu ĉi interna energio ne estas uzebla kaj fine, kiam la osciladoj finiĝas, la tuta komenca nivelenergio estas transformita en neuzebla interna energio. La tuta komenca nivelenergio estas ***senvalorigita***.

En Fig. 5.19 estas montrata elasta pilko, kiu falas, tuŝas la plankon kaj eksaltas. Rezultas, ke saltante, la pilko ne atingas la nivelon h_1 de pozicio (1) , sed nur nivelon pli malaltan h_5.

La transformĉeno montras, ke dum ĉiu transformo parto de la komenca energio trans-formiĝas en ne uzeblan internan energion. Pro tio la fina nivelenergio de la pilko estas pli malalta ol la komenca nivelenergio. Parto de la komenca energio estis senvalorigita.

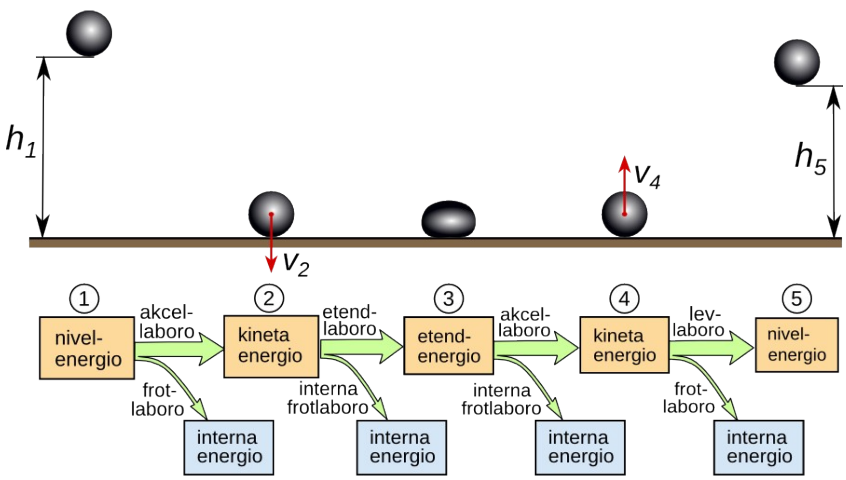


Fig. 5.19

38 Izolita sistemo estas sistemo kiu ne interagas iumaniere kun la ĉirkaŭaĵo.

Tio, kion ni observis en la lastaj ekzemploj, okazas ĝenerale. ***Senvalorigo de energio*** okazas ĉiam, kiam energio estas transformata. Do ĉiam, kiam laboro estas farata, parto de la komenca energio "perdiĝas", ĉar fine ĝi troviĝas en ne uzebla formo.

Fakte rezultas, ke ne vere eblas "konsumo" de energio, ĉar la tuta energio ĉiam konserviĝas. Sed ĉiam, kiam oni uzas energion, ĝi fine transformiĝas al ne uzeblan internan energion kaj senvaloriĝas.

5.7 Simplaj maŝinoj

Simplaj maŝinoj estas aparatoj, kiuj povas esti funkciigataj per nur unu forto. Plejofte, uzante simplan maŝinon, la forto bezonata por plenumi difinitan laboron malpliiĝas. Praktike ĉia mekanika maŝino estas kombinado de pluraj simplaj maŝinoj.

La bazaj simplaj maŝinoj estas la sekvaj: ***ŝnuro kaj stango, klinita ebeno, pulio, levilo.***

El tiuj estas farataj pluraj kombinitaj simplaj maŝinoj kiel ***ŝraŭbo***, ***kojno*** kaj ***takelo***. La bildoj en Fig. 5.20 montras kelkajn simplajn maŝinojn el la "Cyclopaedia" (Chambers 1728).

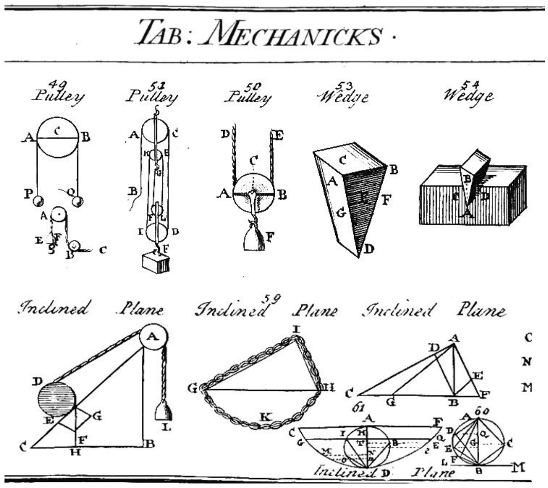


Fig. 5.20: Pulio, kojno kaj klinita ebeno en la "Cyclopedia" de Chambers (1728)

En ĉi tiu ĉapitro estos pritraktataj nur la klinita ebeno kaj la simpla takelo.

5.7.1 Klinita ebeno

Se oni devas levi pezan barelon sur ŝarĝaŭton, laŭeble oni ne levas ĝin vertikale, sed uzas klinitan ebenon.

Tiamaniere la ***forto*** bezonata fariĝas pli malgranda.

Kio okazas pri la ***laboro***?

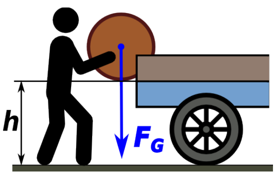


Fig. 5.22

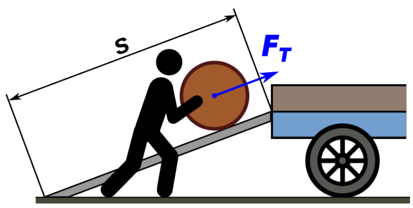


Fig. 5.21

Eksperimento 5.1 - Laboro laŭlonge la klinita ebeno

Celo de tiu ĉi eksperimento estas eltrovo de laboro bezonata por porti la metalan cilindron sur la pinton de triangula lignobloko. La afero povas esti plenumata laŭ diversaj vojoj.

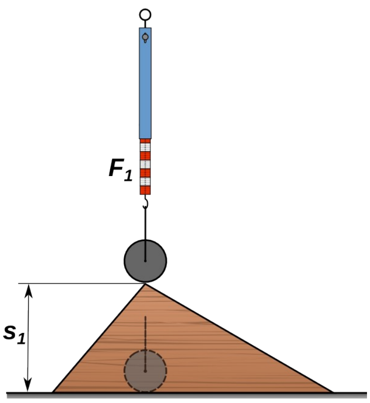


Fig. 5.23 vertikala levo

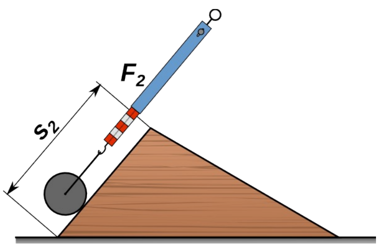


Fig. 5.24 mallonga klinita ebeno

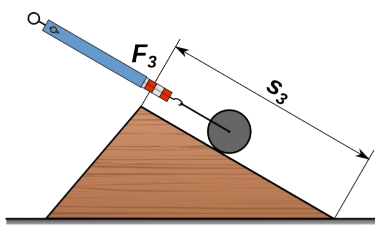


Fig. 5.25 longa klinita ebeno

La plej simplaj estas la sekvaj:

1. vertikala levo
2. tiro laŭlonge la mallonga klinita ebeno
3. tiro laŭlonge la longa klinita ebeno

En ĉiu okazo estas mezurata la forto bezonata kaj la longo de la vojo. El tiuj valoroj eblas kalkuli la laboron.
La rezultoj estas la sekvaj:

		s [cm]	F [N]	W [Ncm]
1	vertikala levo	10,0	2,05	20,5
2	mallonga klinita ebeno	13,2	1,58	20,9
3	longa klinita ebeno	19,8	1,04	21,4

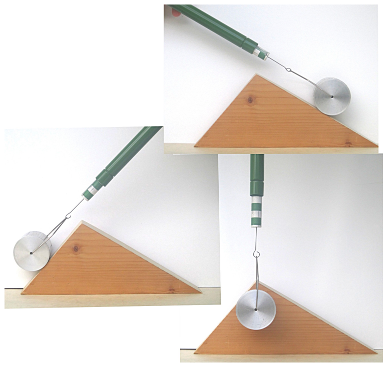


Fig. 5.26

La rezultoj de eksperimento 5.1 montras, ke la laboro bezonata laŭlonge la tri vojoj estas preskaŭ la sama. Ĝi estas nur iomete pli grandaj por la klinitaj ebenoj ol por vertikala levo. Tio estas facile komprenebla, ĉar laŭlonge la ebenoj agas frotforto, kaj ju pli longa estas la ebeno, des pli da frotlaboro estas farenda.

Se la movo estus sen froto, la laboro farita laŭlonge la tri vojoj estus identa, ĉar la tuta laboro estus utiligata por plialtigi la nivelenergion de la cilindro. $W = \Delta E_N$

Rilate al la bildoj de Fig. 5.21 kaj Fig. 5.22 rezultas

$$W = F_T \cdot s \qquad \Delta E_N = F_G \cdot h \qquad \rightarrow \qquad F_T \cdot s = F_G \cdot h$$

Sen froto, la forto por movi aŭ teni korpon laŭlonge klinita ebeno estas $\boxed{\boldsymbol{F_T = \frac{F_G \cdot h}{s}}}$

Ekzemplo 5.6

La maso de barelo en Fig. 5.27 egalas al 45 *kg* kaj la alto de la ŝarĝebeno estas 1,25 *m*.

a) Kiom da laboro necesas por levi la barelon?
b) Kiom longa devas esti la ramplo, por ke sufiĉas forto de 150 *N* por puŝi supren la barelon, ne konsiderante froton.

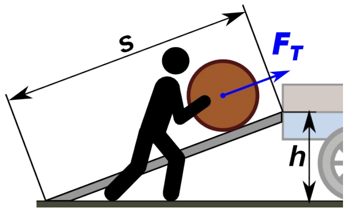


Fig. 5.27

Solvo

$m = 45\ kg \qquad \rightarrow \qquad F_G = m \cdot g = 45\,kg \cdot 9{,}81\ N/kg = 441\ N$

$h = 1{,}25\ m$

$F_T = 150\ N$

a) $$W = F_G \cdot h = 441\,N \cdot 1{,}25\,m = 552\,Nm = 552\,J$$

b) $$F_T \cdot s = F_G \cdot h \quad \rightarrow \quad s = \frac{F_G \cdot h}{F_T} = \frac{441\,N \cdot 1{,}25\,m}{150\,N} = 3{,}7\,m$$

Respondo: a) Necesas 552 *J* da laboro.
b) La rampo devas longi 3,7 *m*.

5.7.2 Takelo

Takelo estas aparato, kiu malpliigas la forton bezonatan por levi ŝarĝojn. Ĝi konsistas el du puliaroj, unu fiksa kaj unu libera, kunigitaj per ŝnuro aŭ ĉeno.

La forto bezonata por movi la liberan puliaron egalas la forton, kiu agas sur ĉilastan, dividita per la nombro de ŝnuroj, kiuj ligas la du puliarojn.

Aliaflanke la vojo, laŭlonge de kiu la ŝnuro estas tirenda, estas multobligita per la sama nombro. Kompreneble la valoroj indikitaj en la bildoj de Fig. 5.28 ekzakte validus nur, se la libera puliaro estus senpeza kaj la tuta ilo estus senfrota. Nur en tio okazo la laboro farita al la ŝnuro, egalas al plialtiĝo de nivelenergio de la ŝarĝo.

$$W = F_T \cdot s \qquad \Delta E_N = F_G \cdot h \qquad \rightarrow \qquad \boldsymbol{F_T \cdot s = F_G \cdot h}$$

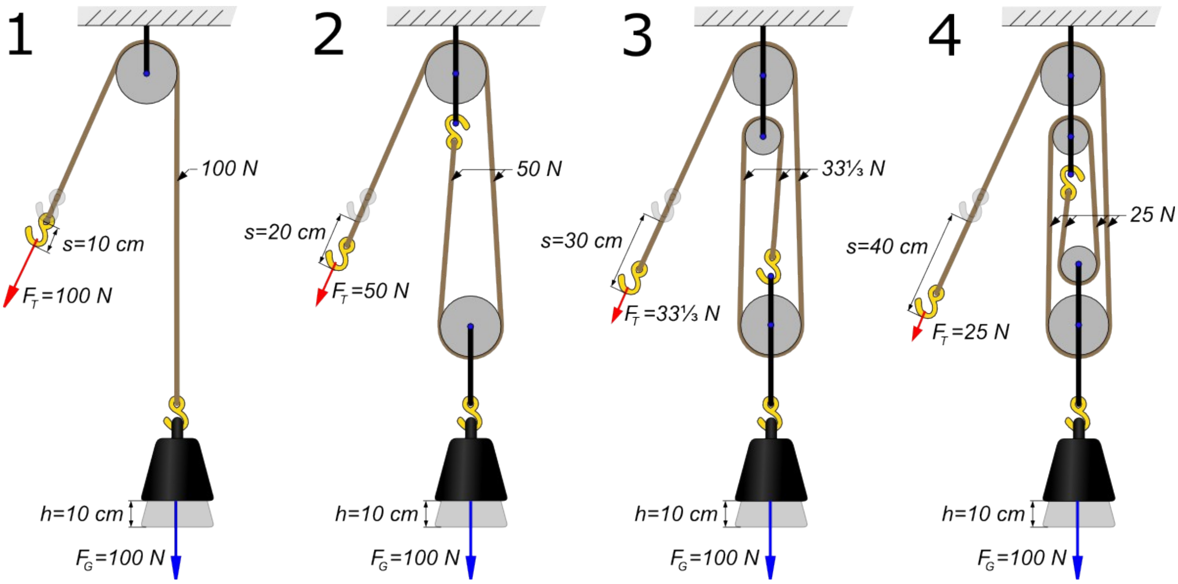


Fig. 5.28: Fiksa pulio (1) kaj takeloj kun du (2), tri (3), kvar (4) pulioj

Eksperimento 5.2 - Laboro ĉe takelo

En tiu ĉi eksperimento estas eltrovata la laboro W_T bezonata por suprenlevi ŝarĝojn helpe de la simpla takelo de Fig. 5.29 kompare kun la laboro W_L bezonata por levi ilin sen helpilo.

Por $h = 10\,cm \quad \rightarrow \quad s = 20\,cm \quad W_L = F_G \cdot h \quad W_T = F_T \cdot s$
la rezultoj estas la sekvaj:

	m [g]	F_G [N]	W_L [Ncm]	F_T [N]	W_T [Ncm]
1	50	0,49	4,9	0,26	5,2
2	100	0,98	9,8	0,52	10,4
3	150	1,47	14,7	0,76	15,2

Montriĝas, ke la laboro bezonata uzante takelon estas iom pli granda ol la levlaboro. Tio estas tute logika, unue, ĉar la libera pulio havas pezon, kiu devas esti levata, kaj due, ĉar la aparato ne estas senfrota.

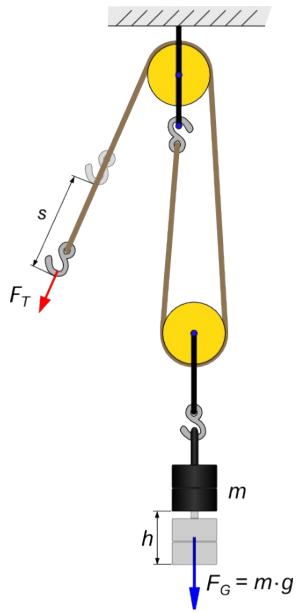


Fig. 5.29: Simpla takelo

5.8 Rendimento

El la eksperimentoj 5.1 kaj 5.2 rezultas, ke uzante maŝinojn eblas malpliigi la forton bezonata por levi korpon, sed la laboro neniam malpliiĝas.

Kontraŭe, ĉar la maŝinoj ne estas senpezaj kaj senfrotaj, necesas fari iom da ne utila laboro, kaj la tuta laboro bezonata pliiĝas.

Praktike ĉiam, kiam estas farata laboro per iu maŝino aŭ aparato, parto de la energio alportita estas transformata en ne utila energio kaj pro tio "perdiĝas".

La grando, kiu indikas, kioma parto de la alportita energio estas efektive utiligata, nomiĝas ***rendimento***. La formulsimbolo uzata estas $\boldsymbol{\eta}$ (eta).

La formulo por kalkuli rendimenton estas: $\boxed{\boldsymbol{\eta = \frac{E_u}{E_a}}}$ $\qquad \eta_{\%} = \frac{E_u}{E_a} \cdot 100\,\%$

$\boldsymbol{E_u}$ → energio utiligita de sistemo

$\boldsymbol{E_a}$ → energio portita al sistemo

La formulo validas ne nur por mekanikaj sistemoj, sed por ĉiu sistemo, kiu uzas energion por iu ajn celo.

Kompreneble, kiam la energio estas alportata per laboro kaj utiligata por laboro la formulo estas

$$\eta = \frac{W_u}{W_a}$$

Rendimento estas grando sen mezurunuo. Ĝia valoro estas ĉiam inter 0 kaj 1 (aŭ 0% kaj 100%).

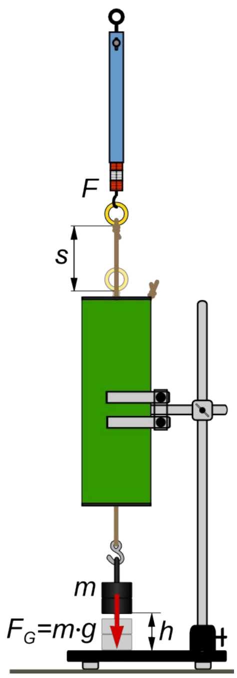


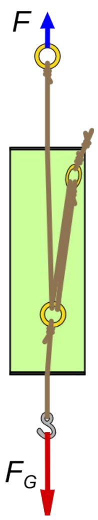
Fig. 5.30

Ekzemplo 5.7 Rendimento

La skatolo de Fig. 5.30 enhavas nekonatan simplan maŝinon. Por levi ŝarĝon, kies maso egalas al 200 g, je la niveldiferenco de 10 cm oni devas tiri la ŝnuron je 38 cm kun forto de 1,05 N.

a) Kiom grandas la rendimento de la simpla maŝino?

b) Kiel povas esti farita la maŝino?



5.31

Solvo

$m = 200\,g \quad \rightarrow \quad F_G = m \cdot g = 0{,}2\,kg \cdot 9{,}81\,N/kg = 1{,}96\,N$

$h = 10\,cm = 0{,}1\,m \qquad s = 38\,cm = 0{,}38\,m$

$F = 1{,}05\,N$

laboro utiligita $W_u = F_G \cdot h = 1{,}96\,N \cdot 0{,}1\,m = 0{,}196\,Nm$

laboro alportita $W_a = F \cdot s = 1{,}05\,N \cdot 0{,}38\,m = 0{,}399\,Nm$

rendimento $\eta = \frac{W_u}{W_a} = \frac{0{,}196\,Nm}{0{,}399\,Nm} = 0{,}49$

Respondo: a) La rendimento egalas al 0,49 aŭ 49%.

b) La bildo de Fig. 5.31 montras funkciadon de la maŝino. Pro la granda froto de la ŝnuroj la rendimento estas tiel malalta.

5.9 Eterna movilo

Plejmultaj biciklistoj iam revis pri biciklo, kiel tiu en la bildo de Fig. 5.32 .

Post mallonga pedalado la dinamo D produktas sufiĉe da energio por movi la motoron M, kiu antaŭenpuŝas biciklon, kies rado siaflanke movas la dinamon. La resta energio estas uzata por funkciigi la lampojn L_1 kaj L_2.

Tia biciklo estus ***eterna movilo*** *(latine:* ***perpetuum mobile)*** kaj bedaŭrinde ĝi restos revo.

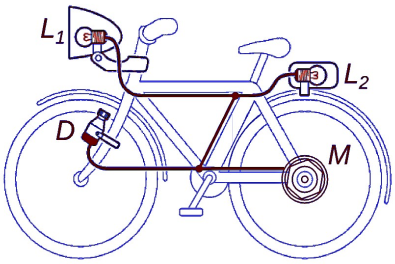


Fig. 5.32

Ankaŭ en pasinteco homoj provis eltrovi ilojn, kiuj povus faciligi la plenumadon de penigaj laboroj. Ĝis en mezepoko tiuj laboroj estis farataj precipe per homoj aŭ per bestoj, ĉar vento kaj akvo kiel energiliverantoj ne estis disponeblaj ĉiuloke. Do estas tute kompreneble, ke multaj inventistoj provis inventi maŝinojn, kiuj funkcius sen energiprovizado.

Ekzemplo troviĝas en la bildo de Fig. 5.33. La akvo el la supra baseno movas la grandan akvoradon dekstre de la bildo. Sur ties ŝafto estas muntita helico, kiu, per radoaro, movas pumpilon, kiu repumpas supren la akvon el la malsupra baseno. Samtempe la ŝafto de la granda akvorado movas ankaŭ akrigilon.

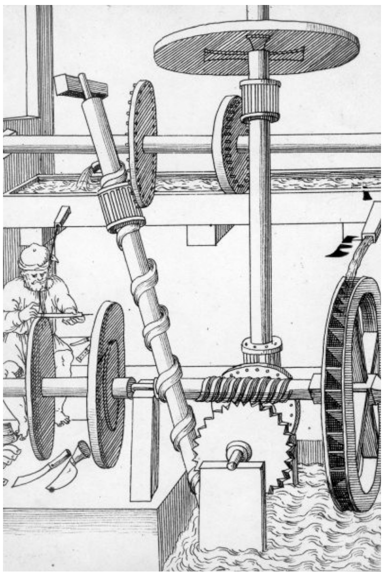


Fig. 5.33: Eterna movilo kiu movas akrigilon

Ankaŭ Leonardo da Vinci ([39]) studis eblecon de eternaj moviloj kaj faris kelkaj desegnaĵoj.

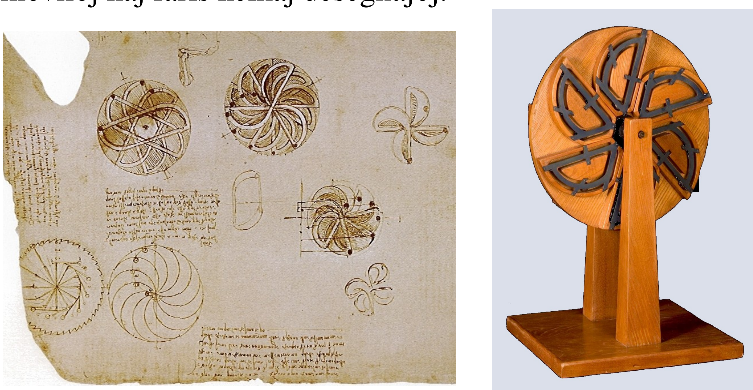


Fig. 5.34: Desegnaĵoj de Leonardo da Vinci kaj modelo laŭ ili

En la jaro 1775 la franca akademio de sciencoj decidis, ke ĝi ne estis plue inklina al kontrolo de iu ajn projekto de eterna movilo, ĉar la sciencistoj estis konvinkitaj, ke tiaj maŝinoj ne povus funkcii.

Sed nur meze de la deknaŭa jarcento homoj pli ĝenerale konvinkiĝis pri la neebleco de eternaj moviloj. Fakte nur tie la koncepto de energio mem, kaj la leĝo de konservado de energio kaj ĝia senvalorigado, fariĝis klara.

Hodiaŭ plej multaj instruitaj personoj estas konvinkitaj, ke por la neevitebla froto, dum ĉiu laboro parto de energio transformiĝas en ne utila formo, kaj pro tio, post ĉiu energitransformo la energio disponebla malpliiĝas.

Malgraŭ tio, ankaŭ nuntempe la ideo de eterna movilo estas tre alloga. Ekzistas ankoraŭ sufiĉe da homoj, kiuj provas inventi ĝin, sed ili ne sukcesos.

39 Leonardo **da Vinci** (1452-1519) estis itala pentristo, skulptisto, inventisto, arkitekto, anatomiisto, botanikisto, muzikisto, verkisto, inĝeniero kaj sciencisto de la alta renesanco, facile vivinte en la du kulturoj de scienco kaj belarto.

5.10 Froto

Kiam korpo, kiu moviĝas, kuntuŝiĝas kun alia korpo, kies rapido estas malsama, tiam okazas froto. La frotoforto agas kontraŭ la movo.

*Eksperimento 5.3 - **Frotforto***

En tiu ĉi eksperimento estas mezurata la forto bezonata por ekmovi lignoblokon, kaj la forto por konstante movi ĝin glitanta sur la sekvaj surfacoj: glata papero, lignofibra tabulo, smirga papero. La mezuroj estas plenumataj ŝarĝante la blokon kun diversaj peziloj.

La rezultoj estas kunmetitaj en la tabelo, kie la formulsimboloj havas la sekvajn signifojn:

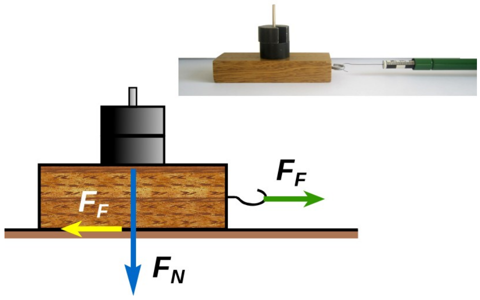


Fig. 5.35

F_N → ***orta forto*** (laŭlonge la normalo), ĝi perpendikle premas la korpon sur la surfacon. Kiam la surfaco estas horizontala, tiam la orta forto egalas al pezoforto

$$F_N = F_G$$

F_{FS} → statika frotforto, ĝi devas esti aplikata por ekmovi la korpon.

F_{FD} → dinamika frotforto, ĝi devas esti aplikata por movi la glitantan korpon.

m [g]	F_N[N]	desegna pap.		lignofibra tab.		smirga pap.	
		F_{FS}[N]	F_{FD}[N]	F_{FS}[N]	F_{FD}[N]	F_{FS}[N]	F_{FD}[N]
60	0,49	~0,12	0,10	~0,18	0,16	~0,4	0,35
110	1,08	~0,25	0,16	~0,33	0,28	~0,9	0,70
160	1,57	~0,35	0,24	~0,55	0,37	~1,1	1,00
210	2,06	~0,45	0,32	~0,70	0,49	~1,4	1,30

El eksperimento rezultas, ke la forto bezonata por ekmovi la korpon, la tiel nomata ***statika frotforto***, ne estas precize mezurebla. Ĉiuokaze ĝi estas pli alta ol tiu bezonata por konstante movi ĝin, kiu estas nomata ***dinamika frotforto***.

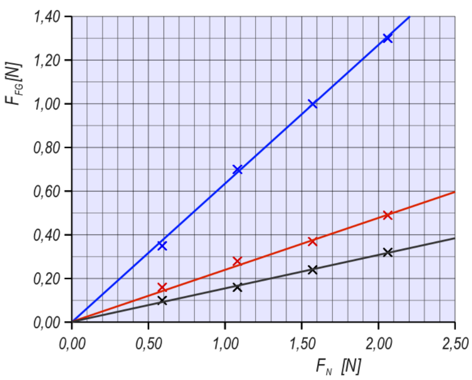


Fig. 5.36

La kaŭzo estas, ke la surfacoj nepre ne estas tute glataj. Mikroskope rigarditaj, ĝi aspektas, kiel montrataj en Fig. 5.37, iamaniere endentigitaj. Por ekmovi la supran korpon unue bezonas malkonekti la endentigon kaj por tio estas bezonata pli granda forto, ol por glitante movi ĝin.

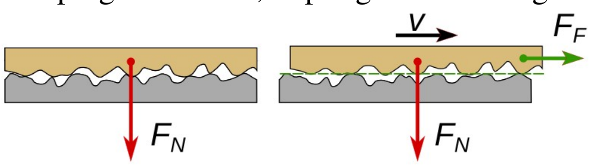


Fig. 5.37

El diagramo de Fig. 5.36 rezultas, ke la orta forto kaj la dinamika frotforto estas proporciaj.

$$F_{FG} \propto F_N \quad \rightarrow \quad \frac{F_{FG}}{F_N} = konst$$

5.10.1 Frotkoeficiento

La konstanto rezultanta el la mezuroj de eksperimento 5.3 estas tipa, por ĉiu paro da frotsurfacoj. Ĝi nomiĝas ***frotkoeficiento*** kaj por ĝi estas uzata la formula simbolo $\boldsymbol{\mu}$ (greka mu).

$$\boldsymbol{\mu = \frac{F_F}{F_N}}$$

Frotkoeficiento inter diversaj surfacoj		
surfacoj	*maksimuma* μ_S	*mezuma* μ_D
ŝtalo sur ŝtalo	0,15	0,06
ŝtalo sur glacio	0,03	0,01
skio sur neĝo	0,10	0,05
ligno sur ligno	0,40	0,25
ligno sur ŝtono	0,70	0,30
gumo sur vojo		
seka	0,90	0,50
malseka	0,40	0,30
glacio	0,20	0,05

Tab. 5.3

Por la frotforto rezultas $\boldsymbol{F_F = \mu \cdot F_N}$

El la lastaj mezurpunktoj de eksperimento 5.3, kiuj bone proksimiĝas la kompensorekto, rezultas por la dinamika frotkoeficiento de ligna bloko:

sur desegna papero $\mu = \frac{0{,}32\,N}{2{,}06\,N} = 0{,}16$

sur lignofibra tabulo $\mu = \frac{0{,}46\,N}{2{,}06\,N} = 0{,}22$ sur smirga papero $\mu = \frac{1{,}3\,N}{2{,}06\,N} = 0{,}63$

Kelkaj voloroj de statika kaj dinamika frotkoeficiento troviĝas en Tab. 5.3.

5.10.2 Frotlaboro

Kompreneble por la frotlaboro validas $\boldsymbol{W_F = F_F \cdot s = \mu \cdot F_N \cdot s}$

Ekzemplo 5.8 Frotlaboro

Dum longdistanca skikuro skiisto, kies tuta maso sumiĝas je 86 kg, trapasas sur horizontala skitrako 20 kilometrojn.
a) Kiom da frotlaboro li plenumas?
b) Komparu la kalkulitan valoron kun la energienhavo de 100 *g* da laktoĉokolado!

Solvo

$$s = 20\,km = 20000\,m$$

$$m = 85\,kg \quad \rightarrow \quad F_G = F_N = m \cdot g = 86\,kg \cdot 9{,}81\,N/kg = 844\,N$$

El Tab. 5.1 rezultas, ke la dinamika frotkoeficiento por skio sur neĝo egalas al μ_D = 0,05

$$F_F = \mu_D \cdot F_N = 0{,}05 \cdot 844\,N = 42\,N \quad \rightarrow \quad W_F = F_F \cdot s = 844000\,J = 844\,kJ$$

Respondo:

a) La frotlaboro sumiĝas je 844 *kJ*.
b) La energienhavo de 100 g da lakto ĉokolado sumiĝas je ĉirkaŭ 2400 *kJ*. Kompreneble, dum sia kurado la skiisto faras ne nur frotlaboron, sed ankaŭ sufiĉe da levlaboro por levi la mason de la propra korpo dum ĉiu paŝo. Pro tio li certe bezonas la tutan energion de la ĉokolado.

5.11 Etendlaboro kaj etendenergio

Por deformi korpon necesas laboro. Se la korpo estas elasta, dum la deformo la etendenergio plialtiĝas. Por tute elasta korpo validas: $\Delta E_E = W_E$

Kiam oni kalkulas etendlaboron, necesas atenti pri la fakto, ke la forto ne estas konstanta. Ekzemple, kiam oni streĉas la risorton de Fig. 5.38, la forto pligrandiĝas de la komenca valoro, (nulo, se komence la risorto estas tute ne streĉita) al la plej alta fina valoro. (vidu Fig. 5.39)

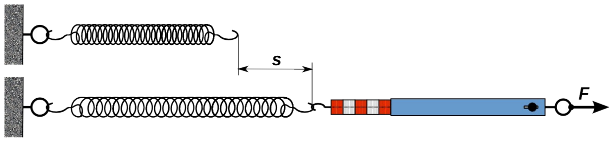
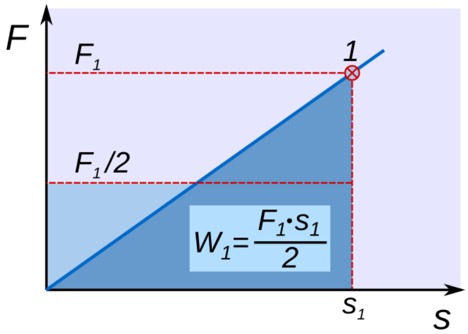


Fig. 5.38

Por kalkulado de etendlaboro estas konsiderenda la meza forto $\overline{F}$ bezonata dum la laboro.

Fine rezultas $\Delta E_E = W_E = \overline{F} \cdot s$

Por risorto, kiu komence estas tute ne streĉita kaj fine estas plilongigita je s, oni trovas:
komenca forto $F_k = 0$ fina forto $F_f = D \cdot s$, kie D estas la risortkonstanto.



$$\overline{F} = \frac{F_k + F_f}{2} = \frac{D \cdot s}{2} \rightarrow W_E = \Delta E_E = \frac{D \cdot s^2}{2}$$

Fig. 5.39

*Ekzemplo 5.9 - **Arkpafado supren***

La arko de Fig. 5.40 estas etendata je 48 cm. Dum la etendo la forto atingas maksimuman valoron de 120 N. La maso de la sago sumiĝas je 30 g. Kiom altas la maksimuma nivelo, kiun povas atingi la sago?

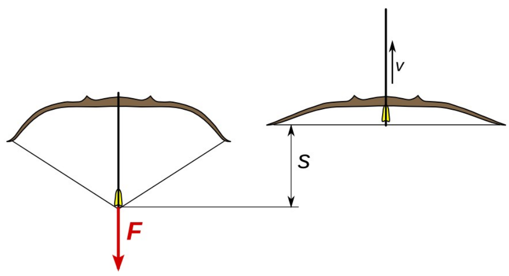


Fig. 5.40: Arko pafas supren

Solvo

$s = 48\ cm \qquad m = 30\ g \rightarrow F_G = m \cdot g = 0{,}03\ kg \cdot 9{,}81\ N/kg = 0{,}294\ N$

$F_k = 0\ N \qquad F_f = 120\ N \qquad \overline{F} = \frac{F_k + F_f}{2} = \frac{120\ N}{2} = 60\ N$

etendlaboro $W_E = \overline{F} \cdot s = 60\ N \cdot 0{,}48\ m = 28{,}8\ J \qquad h = \frac{W_E}{F_G} = 28{,}8 \frac{J}{0{,}294} N = 98\ m$

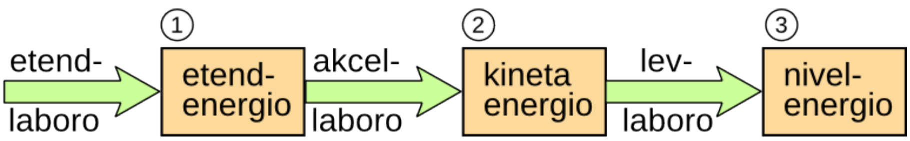


Fig. 5.41: Energitransformĉeno de suprenpafado

Respondo

Se la tuta etendenergio de la arko estus utiligata por levi la sagon, ĝi atingus nivelon de 98 m. Pro froto tiu nivelo ne estos fakte atingata.

5.12 Povumo

Povumo mezuras rapidon kun kiu difinita laboro estas plenumata, aŭ difinita kvanto da energio estas transmisiata. Ju pli malgranda estas la tempo por fari tion, des pli granda estas la povumo.

Ekzemple, la laboro bezonata por levi ŝarĝon al difinita nivelo ne ŝanĝiĝas se ĝi estas farata rapide aŭ malrapide. Sed la povumo bezonata estas ju pli granda, des pli rapide la laboro estas farata. Sama laboro povas esti plenumata en malpli da tempo, kiam estas disponebla pli da povumo.

La formula simbolo uzata por la povumo estas $\boldsymbol{P}$.

Kiam, por plenumi la laboron $\boldsymbol{W}$ estas bezonata la tempo $\boldsymbol{t}$, la ***meza povumo*** estas:

$$\boldsymbol{P = \frac{W}{t} = \frac{\Delta E}{t}} \qquad \text{kun mezurunuo} \qquad [P] = \frac{1\mathrm{J}}{1\mathrm{s}} = \frac{1\mathrm{Nm}}{1\mathrm{s}} = 1\mathrm{W} \qquad \textbf{\textit{(vato)}}$$

La nomo ***vato*** estis donita honore al James Watt. ([40])

Unu vato estas relative malgranda povumo. Ĝi estas la proksimuma povumo de homa koro. Tradicia elektra lumilo kun arda drato (inkandeska lampo) uzas kelkdek vatojn, kaj varmigiloj (hejmaj hejtiloj, fornoj, elektraj kuirpotoj) povas bezoni mil aŭ kelkmil vatojn. La daŭra povumo de homo sumigas je ĉirkaŭ 80 W. Tipa povumo de mezgranda personaŭto estas ĉirkaŭ 90 kilovatoj.

Kelkaj valoroj de povumo	
homo daŭra maksimuma	 70 W 1400 W
elektra miksilo	200 W
elektra bormaŝino	500 W
elektra bakujo	2 kW
kamiono	320 kW
elektra lokomotivo	5,5 MW
termika centralo	1,2 GW

Tab. 5.4

Ekzemplo 5.10 - Suprenirado

Dum suprenirado en montoj, meze sportema persono plialtigas nivelon je ĉirkaŭ 300 m en unu horo.
Kiom grandas la povumo bezonata por la levlaboro, se la maso de la persono sumiĝas je 70 kg

Solvo

$m = 70\,kg \quad \rightarrow \quad F_G = m \cdot g = 70\,kg \cdot 9{,}81\,N/kg = 687\,N$

$h = 300\,m \quad t = 1\,h = 3600\,s$ levlaboro $W_L = F_G \cdot h = 687\,N \cdot 300\,m = 206\,kJ$

meza povumo bezonata $P = \frac{W_L}{t} = \frac{206000\,J}{3600\,s} = 57\,W$

Respondo

La povumo utiligata por la levlaboro sumiĝas je 57 W.
La tuta povumo bezonata plialtiĝas, precipe por la perdoj atribueblaj al irado mem. Fakte ĉe ĉiu paso, piedo kaj kruroj estas levataj iomete pli ol la niveldiferenco de la vojo. Tiamaniere estas farata ankaŭ neutiligebla laboro, kiu plialtigas la povumon bezonatan ĝis la jam nomata valoro de ĉirkaŭ 80 W.

---

40 James **Watt** (1736-1819) estis skota inĝeniero kaj inventisto. Lia plej grava eltrovaĵo estis plibonigo de laborproceso de vapormaŝinoj, kiu ege pligrandigis ilian rendimenton.

5.12.1 Veturpovumo

Kiam veturilo moviĝas, ĝi devas superi la reziston, kiu kontraŭstaras movon.

Se la tuta rezistforto estas F, la vojo longas s kaj la tempo bezonata estas t, la ***meza povumo*** bezonata dum trapaso de vojo sumiĝas je

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot \bar{v} \quad \text{kie} \quad \bar{v} \quad \text{estas la meza rapido.}$$

Se en la supra formulo oni uzas la momentan rapidon v, el formulo $\boldsymbol{P = F \cdot v}$ rezultas la ***momenta povumo*** bezonata por movi la veturilon kun rapido v.

Sur ebena vojo la rezisto konsistas el rulrezisto kaj aerrezisto.

Oni kalkulas rulreziston kun la sama formulo kiel glitforto $F_R = \mu_R \cdot F_N$ kie μ_R estas la rulrezistkoeficiento. Por aŭtopneŭmatikoj sur asfalto validas μ_R =0,007 – 0,017

La aerrezisto estas kalkulebla per la formulo $F_A = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho_A \cdot C \cdot v^2$

A → areo de la faco, kiu moviĝas kontraŭ aero
ρ_A → denso de aero
C → koeficiento de aerrezisto

La diagramo en Fig. 5.42 rilatas al aŭto VW Golf 2.0 TDI kaj rezultis el la sekvaj valoroj.

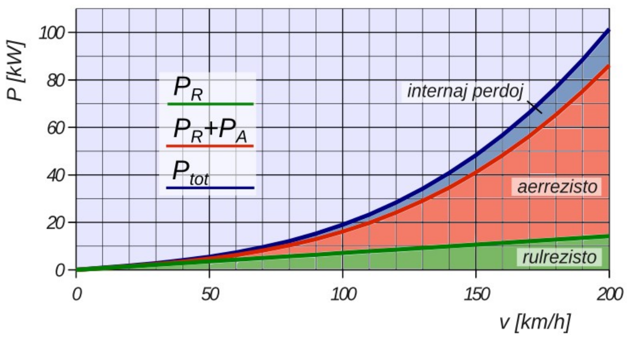


Fig. 5.42: Povumo bezonata de aŭtomobilo

m = 1530 kg (kun stiristo kaj benzino) A = 2,1 m² ρ_A = 1,29 kg/m³ C = 0,31 μ_R = 0,017

La internaj perdoj de transmisiilo estis konsideritaj egalaj al 15%.

El diagramo de Fig. 5.9 bone videblas, ke aerrezisto estas preskaŭ nekonsiderinda ĝis rapido de 50 km/h kaj fariĝas la plej grava parto de la tuta rezisto por rapido super 100 km/h. Por ŝpari benzinon kaj malaltigi poluon de aero do tre gravas, ke rapido de aŭtomobiloj ne superu 100 km/h.

Ekzemplo 5.11 - Rezistforto

El diagramo de Fig. 5.42 rezultas, ke ĉe rapido de 150 km/h la povumo bezonata de aŭtomobilo por superi rulreziston sumiĝas je 11 kW kaj tiu por superi aerreziston 31 kW.
a) Kiom grandas la rulrezistforto kaj la aerrezistforto?
b) Kiom grandas la rulrezistkoeficiento, se la maso de aŭtomobilo sumiĝas je 1530 kg?

Solvo

m = 1530 kg → $F_G = m \cdot g = 1530\,kg \cdot 9{,}81\,N/kg = 15000\,N = 15\,kN$

v = 150 km/h = 41,7 m/s $\quad P_R$ = 11 kW $\quad P_A$ = 31 kW

a) $F_R = \frac{P_R}{v} = \frac{11000\,W}{41{,}7\,m/s} = 260\,N$ $\qquad F_A = \frac{P_A}{v} = \frac{31000\,W}{41{,}7\,m/s} = 740\,N$

b) $$\mu_R = \frac{F_R}{F_N} = \frac{260\,N}{15000\,N} = 0{,}017$$

Respondo

a) La rulrezistforto sumiĝas je 260 N kaj la aerrezistforto je 740 N.
b) La rulrezistkoeficiento egalas al 0,017 kiel oni diris supren.

5.13 Ekzemploj

Ekzemplo 5.12 - Pumpilo

La elektra povumo sorbita de pumpilo sumiĝas je 2,5 *kW*. Ĝia rendimento egalas al 0,75. Kiom da litroj da benzino (denso 0,8 *kg/l*) ĝi pumpas el profundeco de 3,6 *m* en unu minuto?

Solvo

$P_S = 2500\,W$

$t = 1\,min = 60\,s$ → $E_S = P_S \cdot t = 2500\,W \cdot 60\,s = 150000\,J$ energio sorbita de pompilo

$\eta = 0{,}75$ → $E_U = E_S \cdot \eta = 150000\,J \cdot 0{,}75 = 112500\,J$ energio utiligata de pompilo

La energio estas utiligata por plenumi levlaboron. $E_U = W_L = m \cdot g \cdot h = V \cdot \rho \cdot g \cdot h$

$$V = \frac{E_U}{\rho \cdot g \cdot h} = \frac{112500\,J}{800\,kg/m^3 \cdot 9{,}81\,N/kg \cdot 3{,}6\,m} = 3{,}98\,m^3 = 3980\,l$$

Respondo: La pumpilo suprenpumpas 3980 litrojn da benzino en minuto.

5.13.1 *Solvendaj problemoj*

1. Dum montkurado la povumo de sportema partoprenanto kun maso de 60 kg sumiĝas je 350 W.

   Kiom da tempo li bezonas por plenumi la konkursvojon, kies niveldiferenco egalas al 820 m, se 70% de povumo estas utiligataj por fari levlaboron?

2. Dum etendo de risortpistolo la etendforto plialtiĝas de komence 18 N al fina valoro de 30 N. Entute la risorto estas etendata je 3 cm . Kiam oni pafas supren pafaĵon kun maso de 8,5 g, ĝi atingas nivelon de 1,5 m.

   Kiom grandas la rendimento de la pistolo, ne konsiderante la froton dum suprenmovo.

3. Pumpilo, kiu sorbas 5,5 kW da elektra povumo, pumpas en unu minuto 1400 litrojn da akvo al cisterno en alto de 18 m.

   Kiom grandas la rendimento de pumpilo?

Respondoj

1. La tempo bezonata sumiĝas je 1970 s = 32 min 50 s.
2. La rendimento de pistolo estas 17,4 %
3. La rendimento de pumpilo estas 75 %

6 Elektra cirkvito

6.1 Konsisto kaj celo de elektra cirkvito

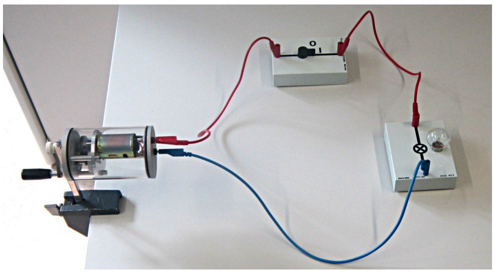


Fig. 6.2: Simpla elektra cirkvito

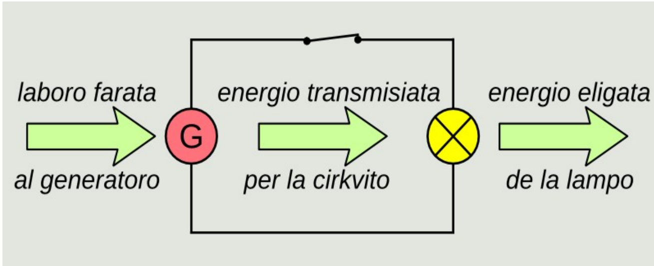


Fig. 6.1: Skemo de simpla elektra cirkvito

La Fig. 6.2 montras simplan elektran cirkviton. Ĝi konsistas el generatoro, inkandeska lampo, ŝaltilo kaj konduktantaj konektoj inter generatoro, ŝaltilo kaj lampo.

Kiam oni turnas la krankon de la generatoro kaj la ŝaltilo estas konduktanta, la lampo brilas. En tiu kazo por turni la krankon estas bezonata relative granda forto kaj turnante oni faras laboron. Per tiu laboro, en la generatoro estas plialtigata la elektra energio de elektronoj, kiu per la sistemo de konduktiloj estas transportata al la lampo. Tie la elektra energio faras internan frotlaboron, kiu plialtigas internan energion. La inkandeska filamento estas varmegigata kaj eligas energion, parte kiel varmo kaj parte kiel videbla radiado (lumo). Kompreneble, se la ŝaltilo estas malfermita, la elektra vojo estas interrompita (Fig. 6.3) kaj la lampo ne brilas. Tiukaze la kranko de generatoro estas tre facile turnebla, ĉar neniu energio estas transigata al la lampo.

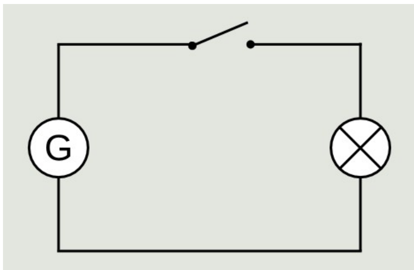


Fig. 6.3: Ŝaltilo malfermita

Alia simpla elektra cirkvito estas montrata en Fig. 6.4. Tiu cirkvito transportas la energion, kiu estas alportata al generatoro, al motoro, kiu tiamaniere kapablas fari levlaboron.

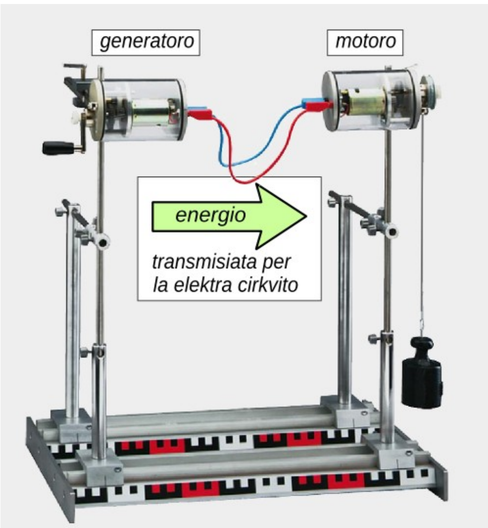


Fig. 6.4 Simpla elektra cirkvito

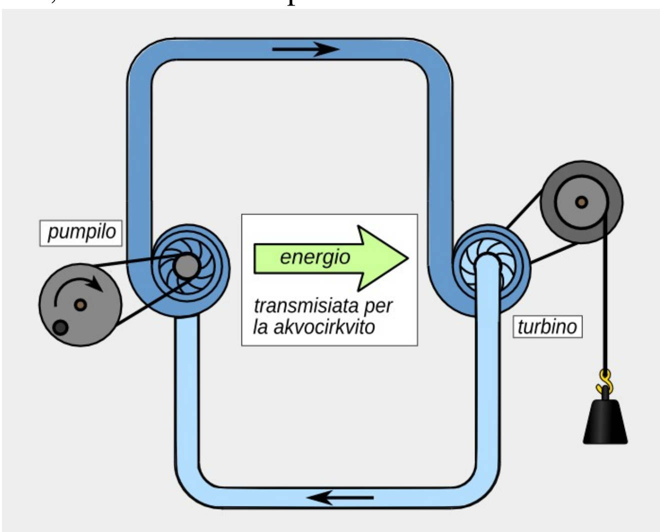


Fig. 6.5 Hidraŭlika modelo de simpla elektra cirkvito

En Fig. 6.5 estas prezentata hidraŭlika analogio de la elektra cirkvito de Fig. 6.4. La laboro farata al pumpilo plialtigas energion de la akvopartikloj en la supra parto de cirkvito. Tiu energio estas cedata al la turbino, kiu kapablas fari laboron.

Alia mekanika analogio de elektra cirkvito estas montrata en Fig. 6.6. Pedalante, oni alportas energion al la ĉenringo, kiu per la ĉeno transmisias ĝin al la malantaŭa dentradeto.

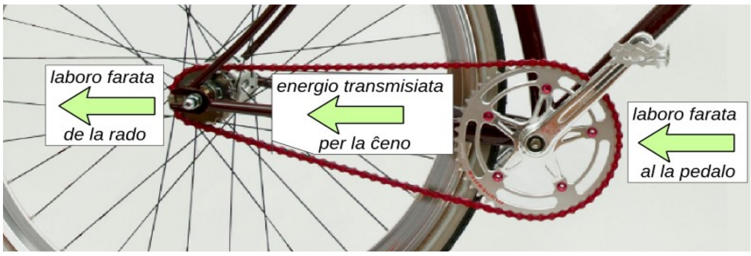


Fig. 6.6 La ĉeno turniĝas kaj transportas energion

Finfine oni povas konkludi, ke ***elektra cirkvito estas sistemo por transporti energion.*** Ĝi konsistas el

1. fonto de elektra energio
2. uzanto de elektra energio
3. fermita cirkvito el konduktantaj konektoj

6.2 Elektraj konduktantoj kaj kurento

La hidraŭlika cirkvito de Fig. 6.5 kaj la mekanika sistemo de Fig. 6.6 bone taŭgas por klarigi kio okazas en elektra cirkvito.

En la du ekzemploj la transporto de energio estas farata per la akvopartikloj en la hidraŭlika cirkvito kaj per la ĉeneroj en la movilo de biciklo. En la elektra cirkvito, tiu tasko estas farata per elektre ŝarĝitaj partikloj.

6.2.1 Elektraj konduktantoj

Ĉiu materialo enhavas elektrajn ŝargojn ([41]), sed nur se kelkaj el ili estas pli aŭ malpli libere moveblaj, la materialo fariĝas konduktanto.

Metaloj estas bonaj konduktantoj, ĉar ili enhavas multajn moveblajn ***elektronojn***. Ne metalaj likvoj konduktas nur, kiam ĝi enhavas ***jonojn***. Tiam ĝi nomiĝas ***elektrolito***.

En elektra cirkvito la moveblaj elektraj ŝargoj troviĝas ĉie en la cirkvito, ili estas ligitaj unu al alia per elektra forto kaj formas fermitan rondon. Kiam okazas transporto de energio, la tuta ĉeno de eroj moviĝas, simile al mekanika ĉeno.

Fig. 6.7 montras modele ([42]) la situacion en cirkvito kun metalaj konduktiloj.

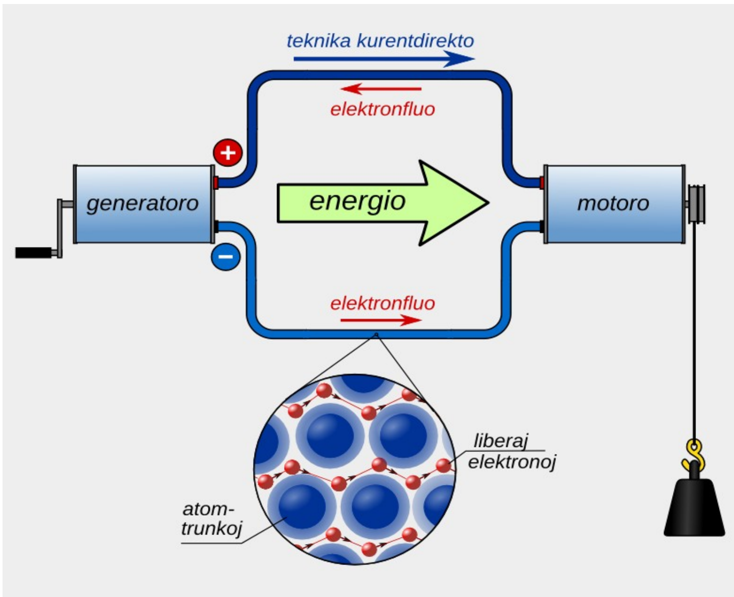


Fig. 6.7: Elektra cirkvito kun metalaj konduktiloj

41 La atomoj, kiuj estas la plej malgrandaj eroj de la kemiaj elementoj, konsistas el pozitive ŝargita kerno kaj negative ŝargitajn elektronojn, kiuj troviĝas en spaco ĉirkaŭ la kerno.

42 Fig. 6.7 prezentas nur simplan modelon de multe pli kompleksa realo, sed ĝi estas sufiĉe bona helpo por kompreni kiel funkcias elektra cirkvito.

En cirkvito de Fig. 6.7 la partikloj, kiuj transportas energion estas la liberaj elektronoj puŝataj aŭ tirataj per la energifonto (generatoro).

Kiam la elektronoj en la fonto estas ekmovigataj, ili tre rapide (kun lumrapido!), per la elektra interago, transportas la informon pri ekmovo al la tuta ĉeno de elektronoj, kiu siavice ekmoviĝas kun rapido de nur ĉirkaŭ unu centimetro en minuto kaj transportas la energion al uzanto (motoro).

6.2.2 Elektra kurento kaj elektra ŝargo

Elektra kurento estas fluo de elektraj ŝargoj en konduktilo.

Ju pli da elektra ŝargo fluas dum difinita tempospaco tra la sekcio de konduktilo, des pli granda estas la ***kurentintenso I***.

La mezurunuo de la kurentintenso estas $[I]=1\,A \quad (ampero)$

Ampero estas baza mezurunuo de la sistemo internacia de unuoj kaj estis nomata omaĝe al la franca fizikisto A. M. Ampere. ([43])

Por la kvanto de ***elektra ŝargo*** estas uzata la formulsimbolo ***Q***

Se dum la tempospaco *t* tra la sekcio de elektra konduktilo fluas la elektra ŝargo *Q,* la meza kurentintenso estas

$$I = \frac{Q}{t} \quad \rightarrow \quad Q = I \cdot t$$

Por la mezurunuo de la ŝargo rezultas $[Q] = 1\text{A}\cdot 1\text{s} = 1\text{As} = 1C \quad (kulombo)$

La unuo kulombo estis nomata honore al franca fizikisto C. A. de Coulomb.([44])

La ŝargo de ĉiu ĝis nun observita partiklo, estas aŭ pozitiva aŭ negativa entjera oblo de la ***elementa ŝargo***, kiu estas fundamenta fizika konstanto. Ĝi egalas al $e = 1{,}602\, x\, 10^{-19}$

La negativa elementa ŝargo egalas al ŝargo de elektrono.

La teknika direkto de la kurento estis difinita kiel fluo de pozitive ŝarĝitaj partikloj, kiuj moviĝas de la pozitiva poluso al negativa poluso (vidu Fig. 6.7). Sed en plejmultaj kazoj, la konduktiloj estas metalaj, kaj la kurento estas realigita per elektronoj, kiuj estas negative ŝarĝitaj, kaj pro tio moviĝas en kontraŭa direkto.

En cirkvito de Fig. 6.8 parto de la konduktilo konsistas el elektrolito (solvaĵo de salo - natrioklorido), kie la fluantaj ŝargoj estas la jonoj Na^+ kaj Cl^-.

La pozitivaj jonoj moviĝas laŭ la teknika kurentdirekto dum la negativaj jonoj moviĝas kontraŭ la teknika direkto, same kiel la elektronoj en la metalaj konduktiloj.

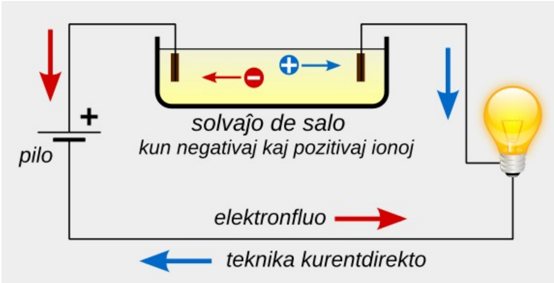


Fig. 6.8 Elektra cirkvito kun elektrolito

43 André Marie **Ampère** (1775 - 1836) estis franca profesoro pri matematiko kaj fiziko. Kiel fizikisto li okupiĝis precipe pri elektromagnetismo. Li estas konsiderata unu el ĝiaj malkovrintoj.

44 Charles Augustin de **Coulomb** (1736 -1806) estis franca armea inĝeniero kaj fizikisto. Kiel sciencisto li okupiĝis pri problemoj de froto, elektro kaj magnetismo. Li estas precipe konata pro siaj eksperimentoj por determini la forton inter elektraj ŝargoj, el kiuj rezultis la tiel nomata kulomba leĝo.

Ekzemplo 6.1 - Mezurunuo Ah - ŝargo de akumulatoro

Fig. 6.9

La ŝargokapablo de akumulatoroj estas kutime indikita en la mezurunuo ***amper-horo (Ah)***. Tiamaniere oni povas facile eltrovi, por kiom da tempo la akumulatoro kapablas liveri difinitan kurenton.

La akumulatoro de Fig. 6.9 havas ŝargokapablon de 2450 *mAh*. Por funkciigi malgrandan inkandeskan lampon necesas kurento de 40 *mA*.

a) Kiom da tempo funkcias la lampo?

b) Kiom da elektronoj fluas tra la akumulatoro, ĝis ĝi estas tute malŝarĝita?

Oni supozas, ke la akumulatoro kapablas liveri konstantan kurenton dum la tuta tempo.

Solvo

$Q = 2450\ mAh$ $\qquad I = 80\ mA$ $\qquad e = 1{,}602 \text{ x } 10^{-19}\ C$

a) $\quad Q = I \cdot t \quad \rightarrow \quad t = \dfrac{Q}{I} = \dfrac{2450\, mAh}{40\, mA} = 61\, h =$

b) $\quad Q = 2450\, mAh = 2{,}45\, A \cdot 3600\, s = 8820\, C \quad \rightarrow \quad n = \dfrac{Q}{e} = \dfrac{8820\ C}{1{,}602 \cdot 10^{-19} C} = 5{,}5 \cdot 10^{22}$

Respondo

a) La lampo funkcias dum 61 horoj.
b) Tra la akumulatoro kaj la lampo fluas 5,5 x 10^{22} elektronoj.

6.2.3 Mezuro de elektra kurento – ampermetro

Por mezuri la kurentintenson en cirkvito, necesas mezurilo, kiu "nombras", kiom da ŝargoj trapasas la sekcion de konduktilo.

Tiuj kurentmezuriloj estas nomataj ***ampermetroj*** kaj ili estas konektendaj en ***serio***, por ke la tuta kurento trasfluu ilin. En Fig. 6.10 la ampermetro indikas nulon, ĉar la ŝaltilo estas malfermita.

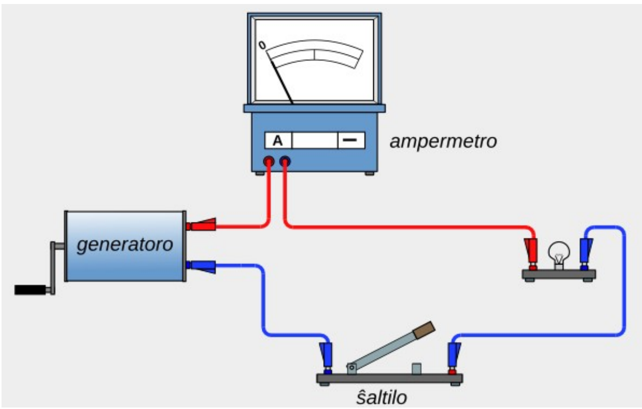


Fig. 6.10: Simpla cirkvito kun ampermetro

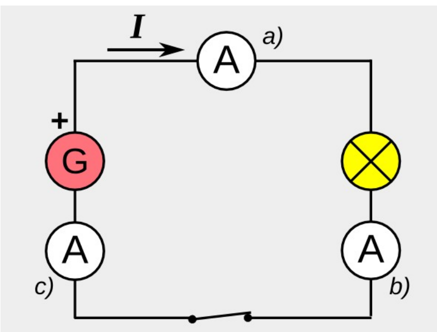


Fig. 6.11: Cirkvito kun ampermetroj

Kun fermita ŝaltilo (Fig. 6.11), en la tri pozicioj a), b), c) la valoro de la kurentintenso estas sama.

Kompreneble ampermetroj ne nombras la ŝargojn, kiuj transfluas ilin, sed ili evidentigas nur la efikon, kiun la kurento estigas en si mem. Ekzemple en la analoga ampermetro kun movebla bobeno, la magneta efiko de kurento ([45]) turnas la bobenon al kiu estas ligita montrilo, kiu montras la kurentintenson.

45 Kiel estos montrata en la dua volumo, elektra kurento estigas magnetan kampon ĉirkaŭ la konduktilo. Ĉi-lasta interagas kun la magneta kampo de daŭranta magneto, de kio rezultas torda momanto, kiu agas sur la bobenon.

6.3 Potencialo – Tensio

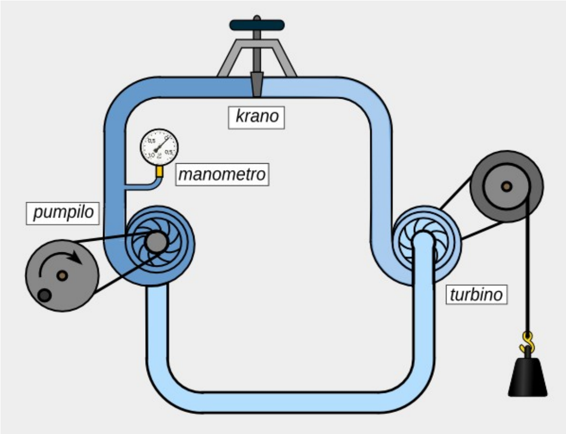


Fig. 6.12: Hidraŭlika cirkvito

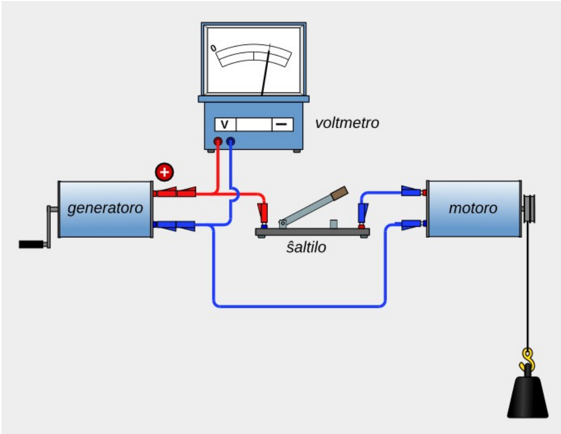


Fig. 6.13: Elektra cirkvito kun voltmetro

La Fig. 6.12 montras hidraŭlikan cirkviton kun fermita krano. La akvo ne povas cirkuli, kaj pro tio ne eblas transporto de energio. Malgraŭ tio, kiam la pumpilo funkcias, la premo en la likvo inter la pompilo kaj la krano plialtiĝas.

Plialtiĝo de premo signifas, ke la enhavita energio por unuo de volumeno de la akvaj partikloj, fariĝas pli granda. La partikloj estas pretaj por transporti energion, sed tio okazos nur, kiam la krano estos malfermata kaj la akvo fluas.

En Fig. 6.13 estas montrata analoga elektra cirkvito. La ŝaltilo estas malfermita, la elektronoj ne povas cirkuli, ne eblas kurento. Kiam oni turnas la krankon de generatoro la elektronoj estas pretigataj por la transporto de energio. La energio por unueco de ŝargo, nomata ***elektra potencialo,*** en la ruĝa parto de cirkvito fariĝas pli granda ol en la blua parto.

Diferenco de potencialo signifas elektran ***tension U.*** La elektra tensio indikas kiom grandas la potencialdiferenco t.e. la diferenco de energio por ŝargo inter du punktoj de la cirkvito.

$$U = \frac{\Delta E_{el}}{Q} \quad \rightarrow \quad \Delta E_{el} = U \cdot Q$$

Por la mezurunuo de la tensio rezultas $$[U] = \frac{1\,J}{1\,C} = 1\,V \quad (volto)$$

La ***volto*** estis nomata honore al itala fizikisto Alessandro Volta.([46])

Tensio necesas por ke kurento povu flui, sed povas ĉeesti tensio ankaŭ sen kurento kiel montras la cirkvito de Fig. 6.13.

Tensimezuriloj estas nomataj ***voltmetroj.*** Ili mezuras la potencialdiferencon inter du punktoj kiuj situas antaŭ kaj post la fonto de elektra energio respektive antaŭ kaj post la uzanto de elektra energio. Pro tio voltmetroj estas konektendaj paralele al energifonto, respektive energiuzanto.

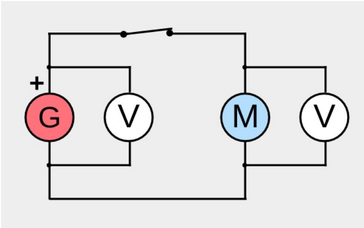


Fig. 6.14: Voltmetroj en cirkvito

46 Alessandro **Volta** (1745 – 1827) estis itala eksperimenta fizikisto. Li malkovris metanon en la marĉoj apud lia urbo kaj faris multajn eksperimentojn kun bruleblaj gasoj. Pli poste li okupiĝis pri elektro. En la jaro 1800 li inventis la unuan pilon, kiu estis kolono de diskoj el kupro kaj zinko. Ĝi estis la unua taŭga fonto de elektra energio.

6.3.1 Tensiofontoj

Por estigi elektran kurenton en cirkvito, necesas tensiofonto, kiu plialtigas la potencialon de la ŝargoj. Tiamaniere ili ekhavas la necesan energion por trapasi la konduktilojn kaj la energiuzanton.

Tensiofontoj povas esti mekanikaj, kemiaj aŭ lumelektraj (fotovoltaaj), depende de la energiformo kiu estas utiligata por produkti la elektran energion.

Mekanikaj tensiofontoj estas generatoro kaj dinamo. Pilo kaj akumulatoro estas kemiaj tensiofontoj kaj la fotovoltaaj ĉeloj kapablas produkti elektran energion el radianta energio, precipe de la lumo.

Kemiaj kaj fotovoltaaj tensiofontoj produktas kontinuan tension, dume la mekanikaj tensiofortoj ĝenerale produktas alternan tension.

Kiam pluraj tensiofontoj estas konektitaj en serio, la totala tensio de la aro egalas al sumo de la tensioj de la unuopaj fontoj.

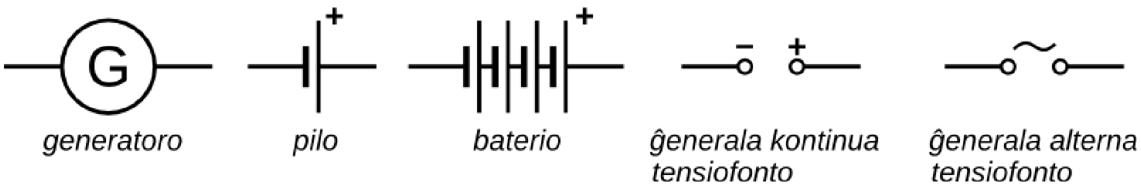


Fig. 6.15: Skemoj de tensiofontoj

6.4 Elektra energio kaj povumo

En la antaŭaj paragrafoj estis difinitaj la elektra tensio kaj la elektra kurentintenso.

$$U = \frac{\Delta E_{el}}{Q} \qquad I = \frac{Q}{t} \quad \rightarrow \quad Q = I \cdot t \quad \rightarrow \quad U = \frac{\Delta E_{el}}{I \cdot t}$$

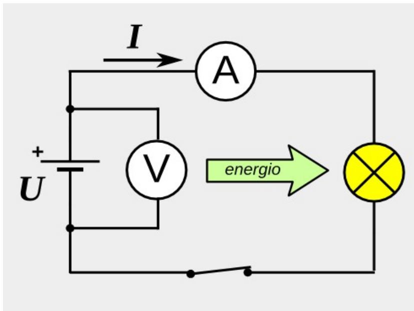


Fig. 6.16: Cirkvito kun pilo kaj lampo

La diferenco de elektra energio inter la mezurpunktoj de la tensio estas kalkulebla per la formulo: $\Delta E_{el} = U \cdot I \cdot t$

Se en unu de la mezurpunktoj de la tensio la potencialo egalas al nulo validas simple:

$$\textbf{\textit{elektra energio}} \qquad \boldsymbol{E_{el} = U \cdot I \cdot t}$$

Sekve por la elektra povumo rezultas:

$$P = \frac{E_{el}}{t} \rightarrow P = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} \quad \rightarrow \quad \textbf{\textit{elektra povumo}} \quad \boldsymbol{P = U \cdot I}$$

Por la mezurunuo rezultas :

$$[P] = 1\,V \cdot 1\,A = 1\frac{J}{C} \cdot 1\frac{C}{s} = 1\frac{J}{s} = 1\,W \quad (\textit{vato})$$

6.4.1 Mezurunuo kilovathoro

Tradicie la kutima mezurunuo por la elektra energio estas ***kilovathoro.*** (vidu Fig. 6.17)

Fig. 6.17: Mezuriloj por elektra energio

$$E_{el} = P \cdot t \quad \rightarrow \quad \mathbf{1\,kWh = 1000\,W \cdot 1\,h = 1000\,W \cdot 3600\,s = 3600000\,Ws = 3{,}6\,MJ}$$

Ekzemplo 6.2

Sur inkandeska lampo estas skribitaj la sekvaj valoroj: $70W\,/\,230V$.
a) Kiom grandas la kurentintenso tra la lampo, kiam ĝi estas konektita al tensio de 230 V ?
b) Kiom da elektra energio bezonas la lampo dum unu jaro, se ĝi estas enŝaltita po 4 horoj en ĉiu tago?

Solvo

$P = 70\ W$ $\qquad U = 230\ V$ $\qquad t = 365 \times 4\ h = 1460\ h$

a) $P = U \cdot I \quad \rightarrow \quad I = \frac{P}{U} = \frac{70\,W}{230\,V} = 0{,}30\,A$ $\quad$ b) $E_{el} = P \cdot t = 0{,}070\,kW \cdot 1460\,h = 102\,kWh$

Respondo

a) La kurentintenso egalas al 0,30 A.

b) La bezonata kvanto da elektra energio estas 102 kWh.

6.5 Elektra rezistanco

Elektra rezistanco estas eco de konduktiloj. De ĝi dependas la kurentintenso tra la konduktilo, kiam ĝi estas konektita al difinita tensio.

La rezistanco estas speco de froto kiu limigas la rapidon de elektronoj en la konduktanto**.** En solidaj metaloj la atomoj estas pli-malpli fiksaj kaj formas specon da reto. Tra la atomtrunkoj troviĝas ĉiam kelkaj liberaj elektronoj kiuj povas moviĝi tra la reto. Dum la movo la moviĝantaj elektronoj kolizias kun la fiksaj atomtrunkoj kaj tio kaŭzas la ***elektran rezistancon.***

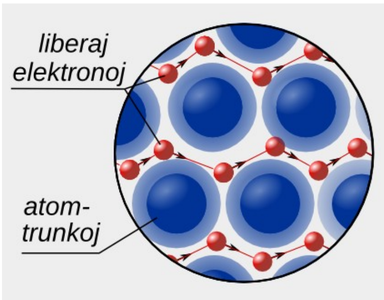


Fig. 6.18: Liberaj elektronoj moviĝas tra la reto de atomtrunkoj

La kolizioj ŝancelas la strukturon de la reto kaj la svingmovado de atomoj rapidiĝas. Sekve, kiel estis montrita en ĉap.4.2, la temperaturo plialtiĝas.

Aliflanke, kiam la amplitudo de la oscilado de atomoj pligrandiĝas, ankaŭ la ofteco de kolizioj pligrandiĝas. Pro tio la elektra rezistanco de metaloj pligrandiĝas kiam pligrandiĝas ilia temperaturo.

Formule la rezistanco estas difinita kiel kvociento de la tensio aplikita al la ekstremaĵoj de konduktilo per la kurentintenso, kiu trairas ĝin.

$$\boldsymbol{R = \frac{U}{I}} \qquad \text{La mezurunuo estas} \qquad \boldsymbol{[R] = \frac{1\,V}{1\,A} = 1\,\Omega} \quad (\textit{omo})$$

La supra formulo nomiĝas ***leĝo de Ohm*** honore al germana fizikisto Georg Simon Ohm.([47])

El la formulo rezultas por la kurentintenso $\boldsymbol{I = \frac{U}{R}}$ kaj por la tensio $\boldsymbol{U = R \cdot I}$

Ĝenerale, por metalaj konduktantoj la rezistanco estas konstanta nur, se la temperaturo ne ŝanĝiĝas.

47 Georg Simon **Ohm** (1789 – 1854) estis germana fizikinstruisto kaj eksperimenta fizikisto. En 1821 li eltrovis, ke la kurentintenso en elektra konduktilo estas proporcia al la tensio aplikita al ĝiaj ekstremaĵoj. Li laboris ankaŭ pri akustiko.

Ekzemplo 6.3

Sur inkandeska lampo estas skribitaj la sekvaj valoroj: $70W\,/\,230V$.
a) Kiom grandas la rezistanco de la lampo, kiam ĝi estas konektita al tensio de 230 *V* kaj brilas hele?
b) Kiam la sama lampo estas konektita al tensio de 12 *V* la kurentintenso tra la lampo egalas al 80 *mA*. Kiom grandas rezistanco kaj elektra povumo en tiu situacio?

Solvo

$P_1 = 70\ W$ $\quad U_1 = 230\ V$ $\quad U_2 = 230\ V$ $\quad I_2 = 25\ mA$

a) $P = U \cdot I \quad \rightarrow \quad I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{70\,W}{230\,V} = 0{,}30\,A \qquad R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{230\,V}{0{,}30\,A} = 756\ \Omega$

b) $R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{12\,V}{0{,}080\,A} = 150\ \Omega \qquad P_2 = U_2 \cdot I_2 = 12\,V \cdot 0{,}080\,A = 0{,}96\,W$

Respondo

a) La rezistanco egalas al *756* Ω .

b) La rezistanco egalas nur al 150 Ω ĉar la filamento restas malvarma. La povumo estas 0,96 *W.*

6.5.1 Rezistiloj

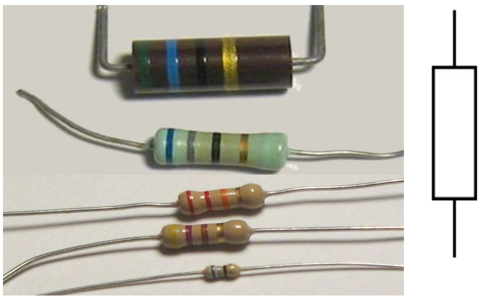


Fig. 6.20: Rezistiloj kaj skemo

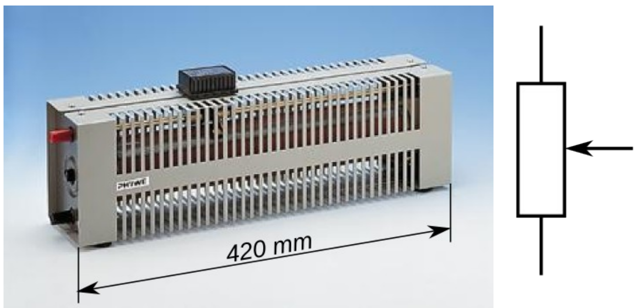


Fig. 6.19: Ŝovorezistilo (reostato) kaj skemo

En elektraj kaj precipe en elektonikaj cirkvitoj ofte necesas iloj kun difinita rezistanco (vidu Fig. 6.20) aŭ kun rezistanco modifebla inter difinitaj limoj (*ŝovrezistilo,* ***turnrezistilo*** *- vidu Fig. 6.19 kaj Fig. 6.21*). La lastaj nomiĝas ankaŭ *reostato* aŭ *potenciometro*.

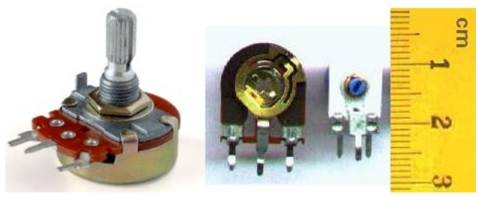


Fig. 6.21: Turnrezistilo - potenciometro

Sur la rezistiloj kun difinita rezistanco la valoro de ĉi lasta estas indikita per koloraj ringoj (Fig. 6.20)

La maksimuma povumo absorbebla per la rezistiloj varias inter 0,25 W por la plej malgrandaj, longaj ĉirkaŭ 6 mm (Fig. 6.20) kaj 500 W por la ŝovorezistilo (Fig. 6.19). Kiam estas konata la maksimuma povumo kaj la rezistanco, estas facile kalkulebla la maksimuma kurentintenso, kiu povas traflui la rezistilon.

$$U = R \cdot I \qquad P = U \cdot I \qquad \rightarrow \qquad P = R \cdot I \cdot I = R \cdot I^2 \qquad \rightarrow \qquad I = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

Sub la permesita kurentintenso la rezistanco estas preskaŭ nedependa de la temperaturo. Se la lima kurento estas superita, la temperaturo atingas tro altan valoron kaj eble la rezistilo fandiĝas.

6.5.2 Rezistiloj en serio

Kiam du rezistiloj konektitaj en serio estas konektitaj al elektra energifonto (vidu Fig. 6.22), la kurentintenso en la du rezistiloj estas la sama, ĉar ĉiuj ŝargoj, kiuj trapasas la unuan rezistilon, devas trapasi ankaŭ la duan.

La potencialdiferenco ĉe la du rezistiloj rezultas:

$$U_1 = R_1 \cdot I \qquad U_2 = R_2 \cdot I$$

Parto de la tuta energio, ricevita de la ŝargoj per la energifonto, necesas por trapasi la unuan rezistilon kaj alia parto por trapasi la duan rezistilon.

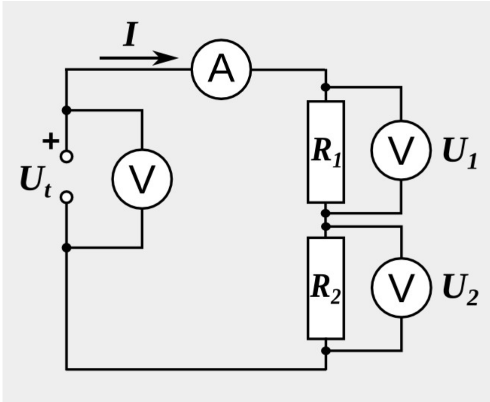


Fig. 6.22: Rezistiloj en serio

$$E_t = E_1 + E_2 \qquad \frac{E_t}{Q} = \frac{E_1}{Q} + \frac{E_2}{Q} \quad \rightarrow \quad U_t = U_1 + U_2 \qquad U_t = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = (R_1 + R_2) \cdot I$$

Sekvas, ke la tuta rezistanco de du rezistiloj ŝaltitaj en serio egalas la sumon de la du rezistancoj. $R_t = \frac{U}{I} = R_1 + R_2$

6.5.3 Rezistiloj en paralelo

Kiam du rezistiloj konektitaj paralele, estas konektitaj al komuna tensiofonto (vidu Fig. 6.23), la tensio ĉe la du rezistiloj estas la sama.

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \qquad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

$$\rightarrow \quad I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 \quad \rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

La kurentintenso tra du paralelaj rezistiloj rilatas inverse al ilia rezistanco.

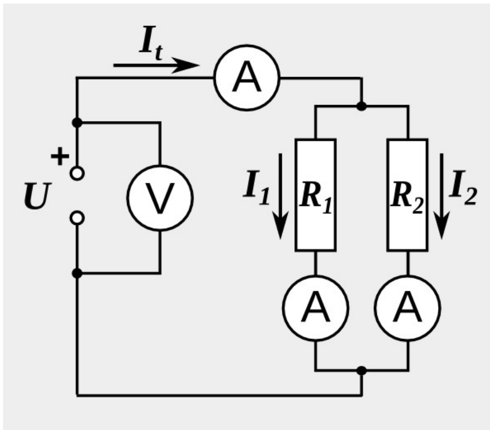


Fig. 6.23: Rezistiloj en paralelo

La tuta kurento kiu devenas de la energifonto egalas la sumon de la kurentintensoj tra la du rezistiloj, ĉar la ŝargoj trapasas nur unu el la du rezistiloj.

$$I_t = I_1 + I_2 \quad \rightarrow \quad I_t = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{U}{R_t}$$

Sekvas, ke la reciproko de la tuta rezistanco de du rezistiloj ŝaltitaj paralele egalas la la sumon de la reciprokoj de la du rezistancoj.

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \qquad \rightarrow \quad R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

6.6 Rezistanco de konduktiloj

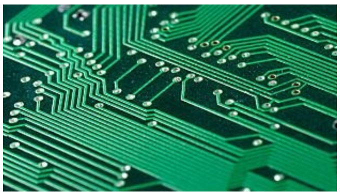


Fig. 6.24: Konduktiloj de presita cirkvito sur plato

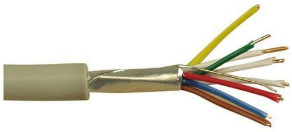


Fig. 6.25: Kablo por telefono

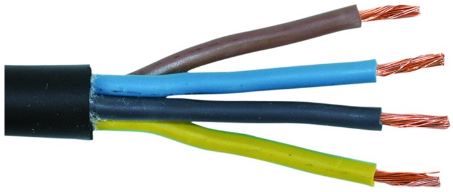


Fig. 6.26: Kablo por elektra maŝino

Por konekti elektrajn aparatojn oni devas uzi konduktilojn faritajn el tre bone konduktanta materialo.

Ĝenerale estas uzataj izolitaj konduktiloj kiuj povas esti unuopaj aŭ multdrataj. La multdrataj nomiĝas kabloj. Nudaj dratoj estas uzataj precipe kiel alttensiaj konduktiloj, muntitaj sur altaj kolonoj por energitransportado. Sur elektronikaj paneloj la konduktiloj estas metalaj (kutime kupraj) strioj.

Oni observas, ke ju pli granda estas la kvanto da energio transportata per la cirkvito, des pli dikaj estas la konduktiloj.

Eksperimento 6.1 - Rezistanco de dratoj

En ĉi tiu eksperimento estas mezurata la rezistanco de drato el konstantano ([48]) depende de ĝia longo kaj ĝia sekcio. Por tio oni konektas la dratojn al konstanta tensio de 4 V kaj mezuras la rezultantan kurentintenson (vidu Fig. 6.27). El tiuj valoroj estas kalkulata la rezistanco.

$$R = \frac{U}{I}$$

Por dratoj kun sama diametro d = 0,2 *mm* (sekcio A = 0,0314 *mm²*) la valoroj eltrovitaj por diversaj longoj estas kolektitaj en la sekva tabelo.

P	l [m]	I [A]	R [Ω]
1	0,3	0,81	4,9
2	0,6	0,42	9,5
3	0,8	0,32	12,5
4	1,0	0,26	15,7

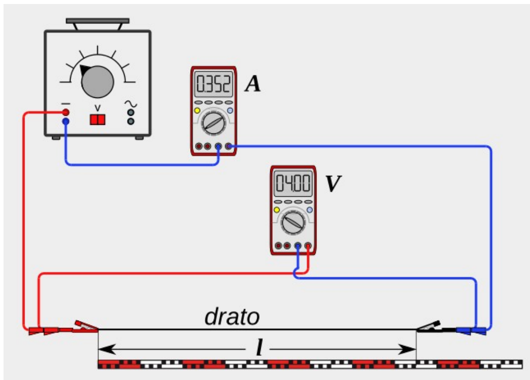


Fig. 6.27: Mezuro de rezistanco de drato

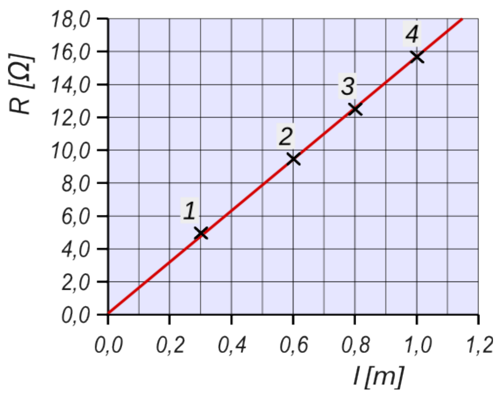


Fig. 6.28: Diagramo l - R por drato el konstantano kun d = 0,2 mm

El la valoroj rezultas la diagramo de Fig. 6.28. Oni rimarkas, ke la mezurpunktoj bone aproksimiĝas al rekto trairante la originon de la koordinatsistemo. Sekvas, ke la rezistanco estas proporcia al la longo de la konduktilo.

$$R \propto l$$

48 Konstantano estas alojo el 55% da kupro, 44% da nikelo kaj 1% da mangano. Kontraŭe al aliaj metaloj ĝia rezistanco estas preskaŭ nedependa de la temperaturo. Tio gravas, ĉar se la kurentintenso estas sufiĉe alta la drato varmiĝas.

Por dratoj kun sama longo l = 80 *cm* la valoroj eltrovitaj por diversaj diametroj estas kolektitaj en la sekva tabelo.

d [mm]	A [mm²]	1/A [1/mm²]	I [A]	R [Ω]
0,50	0,196	5,1	1,92	2,1
0,40	0,126	8,0	1,21	3,3
0,30	0,071	14,1	0,69	5,8
0,20	0,031	31,8	0,32	12,5

El diagramo de rezultas, ke la rezistanco estas proporcia al reciproko de la sekcio de konduktilo.

$$R \propto \frac{1}{A}$$

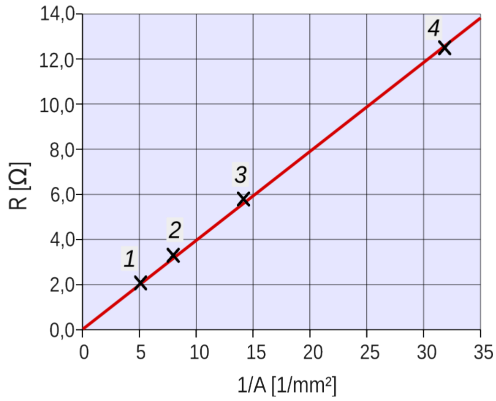


Fig. 6.29: Rezistanco de dratoj el konstantano kun diversaj diametroj

La rezultoj estas tute logikaj ĉar ju pli longa estas la drato, des pli da energio necesas por ke la elektronoj trapasu la draton, kaj ju pli granda estas la sekcio, des pli malofte la elektronoj kolizias kun la atomtrunkoj de la metala strukturo.

6.6.1 Specifa rezistanco

El la du mezurvicoj de eksperimento 6.1 rezultas, por dratoj el sama materialo:

$$R \propto \frac{l}{A} \quad \rightarrow \quad \frac{R \cdot A}{l} = konstanto$$

La konstanto estas nomata ***specifa rezistanco*** kaj havas formulsimbolon **ρ** .

$$\boldsymbol{\rho = \frac{R \cdot A}{l}} \quad \rightarrow \quad \text{kiel mezurunuo estas uzata} \quad [\rho] = \frac{\Omega\, mm^2}{m} = 10^{-6}\,\Omega\, m$$

Por kalkuli la rezistancon rezultas la formulo: $\boldsymbol{R = \frac{\rho \cdot l}{A}}$

El Fig. 6.28 rezultas, ke la mezurpunkto MP 2 staras relative precize sur la kompensorekto. Do por la specifa rezistanco de konstantano validas:

$$R = 9{,}5\,\Omega \qquad A = 0{,}0314\, mm^2 \qquad l = 0{,}6\, m$$

$$\rightarrow \quad \rho = \frac{9{,}5\,\Omega \cdot 0{,}0314\, mm^2}{0{,}6\, m} = 0{,}5\,\frac{\Omega\, mm^2}{m}$$

Specifa rezistanco ĉe 20 °C	
materialo	ρ [Ω mm²/m]
aŭro	0,023
arĝento	0,016
aluminio	0,028
kupro	0,017
tungsteno	0,053
fero/ŝtalo	0,1-0,5
konstantano	0,50
grafito	8,0

Tab. 6.1

En Tab. 6.1 troviĝas valoroj de la specifa rezistanco por kelkaj materialoj.

Oni atentu, ke la valoro indikita validas nur ĉe la temperaturo de 20 °C. Kiel estos montrata en la sekvanta paragrafo, la rezistanco de metaloj plialtiĝas, kiam la temperaturo kreskas. Metaloj konduktas pli bone ĉe malaltaj temperaturoj. Kontraŭe la duonkonduktantoj grafito (karbono), silicio ktp konduktas pli bone ĉe altaj temperaturoj. Ilia rezistanco malgrandiĝas ĉe plialtiĝo de temperaturo.

6.6.2 U-I diagramo de metalaj dratoj

Eksperimento 6.2

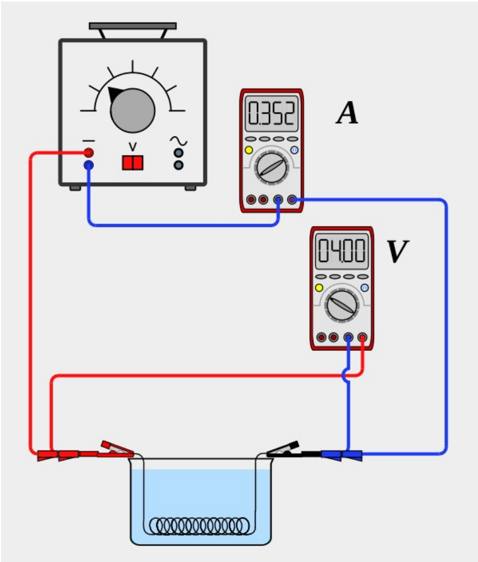


Fig. 6.30: Drato malvarmigita en akvo

En ĉi tiu eksperimento estas mezurata la kurentintenso tra drato de fero kun longo l = 1,0 m kaj diametro d = 0,2 mm, depende de la konektita tensio.
Unue la drato troviĝas en aero kaj plivarmiĝas kiam la kurento plialtiĝas.
Poste la drato estas mergita en akvo kaj pro tio ĝia temperaturo restas preskaŭ konstanta (vidu Fig. 6.30). La valoroj eltrovitaj estas kolektitaj en la sekva tabelo.

		en aero	en akvo
P	U [V]	I [A]	I [A]
1	1,0	0,23	0,23
2	2,0	0,46	0,46
3	4,0	0,72	0,90
4	7,0	1,00	1,50
5	10,0	1,15	2,05
6	15,0	1,25	3,00

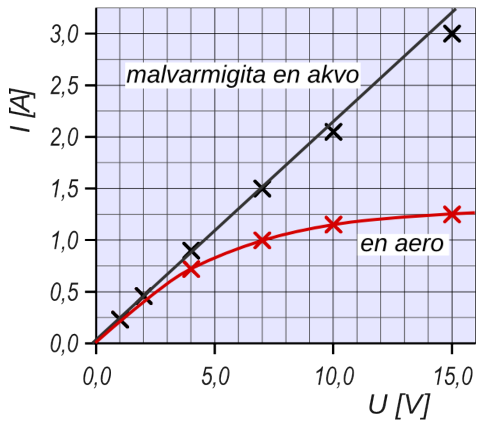


Fig. 6.31: Diagramo U-I por drato el fero

El la valoroj de la tabelo rezultas la diagramo de Fig. 6.31. Oni vidas ke, kiam la drato troviĝas en akvo, la mezurpunktoj troviĝas proksime al rekto. Do la kurentintenso estas proporcia al la tensio kaj la rezistanco estas konstanta.
Kiam la drato troviĝas en aero, la mezurpunktoj troviĝas sur kurbo, kies kliniteco malgrandiĝas. Tio signifas, ke la kurentintenso ne estas proporcia al la tensio. La rezistanco ne estas konstanta, ĝi pligrandiĝas. Tio konfirmas la fakton, jam esprimita en la antaŭa paragrafo, ke ĝenerale, metaloj pli bone konduktas ĉe malaltaj temperaturoj.

El la valoroj de la tabelo estas kalkulebla ankaŭ la specifa rezistanco de la ferodrato. Por la malvarma drato la plej bonaj valoroj estas tiuj de la punktoj 1-3, ĉar tie la akvo ankoraŭ bone malvarmigis la draton.

Por punkto 3 rezultas:

$$U = 4{,}0\,V \qquad I = 0{,}90\,A \qquad A = 0{,}0314\,mm^2 \qquad l = 1{,}0\,m$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4{,}0\,V}{0{,}90}A = 4{,}4\,\Omega \quad \rightarrow \quad \rho = \frac{4{,}4\,\Omega \cdot 0{,}0314\,mm^2}{1{,}0\,m} = 0{,}14\frac{\Omega\,mm^2}{m}$$

La valoro de la specifa rezistanco de la ferodrato rezultas iomete pli alta, ol tiu de pura fero, kies specifa rezistanco egalas al 0,099 Ωmm²/m. La kialo estas, ke la materialo por dratoj ne estas pura fero, sed ĝi enhavas ĉiam almenaŭ iom da karbono kaj kutime ankaŭ malgrandan kvanton da aliaj alojkomponantoj.

6.7 Ekzemploj

Ekzemplo 6.4 - Gladilo

Ĉe la tensio de 230 V la kurentintenso en la hejtrezistanco de gladilo rezultas 4,2 A.
a) Kiom grandas la elektra povumo kaj la rezistanco?
b) Kiom fariĝus la povumo se la tensio malpliiĝus al valoro de 220 V?

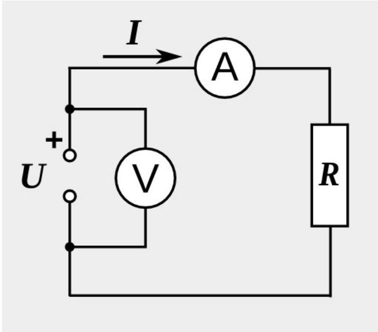


Fig. 6.32: Cirkvito kun rezistanco

Solvo

Ĉe la tensio de 230 V rezultas:

$$U_1 = 230\,V \quad I_1 = 4{,}2\,A \quad \rightarrow \quad P_1 = U_1 \cdot I_1 = 966\,W \quad \rightarrow \quad R = \frac{U_1}{I_1} = 54{,}8\,\Omega$$

Ĉe la tensio de 220 V la rezistanco restas proksimume la sama. Pro tio rezultas:

$$U_2 = 220\,V \quad I_2 = \frac{U_1}{R} = \frac{220\,V}{54{,}8\,\Omega} = 4\,A \quad \rightarrow \quad P_2 = U_2 \cdot I_2 = 220\,V \cdot 4\,A = 880\,W$$

Respondo: a) La elektra povumo egalas al 966 W kaj la rezistanco 54,8 Ω
b) La elektra povumo ĉe 220 V egalas al 880 W.

Ekzemplo 6.5 - Lampoj serie konektitaj

Du lampoj estas konektitaj en serio al tensio de 12 V (vidu Fig. 1.12). Sur la unua lampo estas skribita 6 V/ 3 W, sur la dua 12 V/ 3 W.
a) Kiom grandas la kurentintenso tra la lampoj, se la tensio de la baterio egalas al 12 V ?
b) Kiu lampo pli lumas?

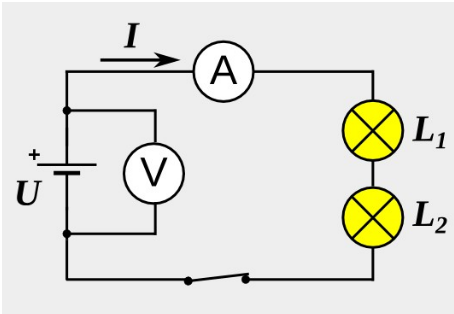


Fig. 6.33: Du diversaj lampoj en serio

Solvo

La nominalaj valoroj estas por la lampo L_1

$$U_1 = 6\,V \quad P_1 = 3\,W \quad \rightarrow \quad I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{3\,W}{6\,V} = 0{,}5\,A \quad \rightarrow \quad R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{6\,V}{0{,}5\,A} = 12\,\Omega$$

por la lampo L_2

$$U_2 = 12\,V \quad P_2 = 3\,W \quad \rightarrow \quad I_1 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{3\,W}{12\,V} = 0{,}25\,A \quad \rightarrow \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{12\,V}{0{,}25\,A} = 48\,\Omega$$

Por la du lampoj en serio, konektitaj al la tensio de U = 12 V rezultas tuta rezistanco $R_t = R_1 + R_2 = 60\,\Omega \quad \rightarrow \quad I = \frac{U}{R_t} = \frac{12}{60} = 0{,}2\,A$

Respondo: a) La kurentintenso tra la lampoj rezultos reale iomete pli granda ol 0,2 A, ĉar pro la fakto, ke la lampoj ne tute brilas, ĝia reala rezistanco estas pli malgranda ol la nominala valoro.
b) La lampo L_2 lumas multe pli ĉar la kurentintenso atingas preskaŭ la nominalan valoron de tiu lampo.

Ekzemplo 6.6 - Lumo de aŭto

Iu forgesis malŝalti la lumon de sia aŭto. Entute la lampoj bezonas elektran povumon de 86 W.
a) Kiom grandas la tuta kurentintenso tra la baterio kies tensio egalas al 12 V?
b) Post kiom da tempo la tute ŝarĝita baterio estos malplenigita, se ĝia ŝarĝkapacito egalas al 150 Ah?

Solvo

a) $U = 12\,V \qquad P = 86\,W \qquad \rightarrow \qquad I = \frac{P}{U} = \frac{86\,W}{12\,V} = 7{,}17\,A$

b) $Q = 150\,Ah \qquad I = \frac{Q}{t} \qquad \rightarrow \qquad t = \frac{Q}{I} = \frac{150\,Ah}{7{,}17\,A} = 20{,}9\,h$

Respondo: a) La kurentintenso tra la baterio egalas al 7,17 A.
b) La baterio estos malplenigita post 20,9 horoj.

6.7.1 Solvendaj problemoj

1. Sur inkandeska lampo estas skribita 12 V / 9 W.
   a) Kiom grandas la kurentintenso tra la lampo kiam ĝi estas konektita al tensio de $12V$?
   b) Kiom da elektronoj trairas tiam la lampon en unu sekundo?
2. Konduktilo el kupro havas diametron de 1,6 mm kaj longas 4,0 m.
   Kiom grandas ĝia rezistanco?
3. Elektrika hejtilo havas rezistancon de 18,0 Ω . Kiam ĝi estas konektita al elektra energifonto la kurentintenso rezultas 12,5 *A*.
   Kiom da elektra energio bezonas la hejtilo dum 20 minutoj?

Respondoj

1. a) La kurentintenso egalas al 0,75 A.
   b) $4{,}7 \times 10^{18}$ elektronoj trairas la lampon en sekundo.
2. La rezistanco egalas al 34 mΩ
3. La elektra energio bezonata egalas al 938 Wh = 0,94 kWh

7 Energitransformoj

7.1 Primara – fina – utila energio

Fig. 7.1 Baraĵlago

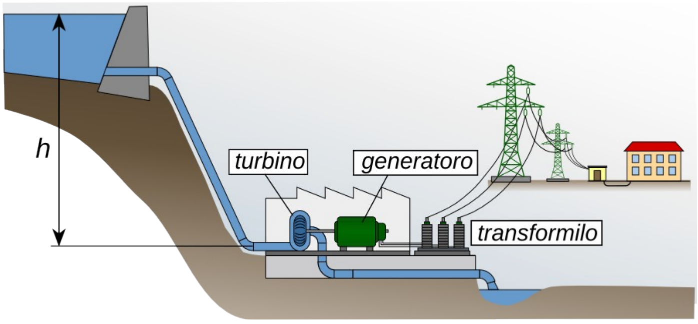


Fig. 7.2: Skemo de hidroelektra centralo

La Fig. 7.2 montras skemon de hidroelektra centralo kaj de la iloj, kiuj transportas la elektran energion de la centralo al uzantoj.

La energio, kiu troviĝas en la akvo enhavita en baraĵlago sur monto, nomiĝas ***natura*** aŭ ***primara energio***. Tiu energio ne estas surloke uzebla kaj por iĝi tia, ĝi devas esti transformata kaj transportata al uzantoj. La energio, kiu atingas la uzanton en utiligebla formo estas nomata ***fina energio***. Ĝi estas uzata por irigi ilojn, kiuj, kiel estis montrita en ĉap. 5, kapablas utiligi nur parton de la tuta alportita energio. Tiu parto nomiĝas ***utila energio.***

Ĝenerale, ***natura*** aŭ ***primara energio*** $\boldsymbol{E_p}$ nomiĝas energio, kiam ĝi troviĝas en natura stato. La akvo en baraĵlago estas fonto de primara energio, same kiel subtera karbono, nafto kaj tergaso. Por iĝi utiligeblaj, ili devas esti transformitaj kaj/aŭ transportitaj.

Kiam la karbono troviĝas apud la hejtilo, la transformita parto de la nafto troviĝas en benzinujo, la gaso transfluas la gasmezurilon en la domo, tiam ili fariĝas fontoj de ***fina energio*** $\boldsymbol{E_f}$.

La fluskemo de Fig. 7.3 montras, por kio la primara energio estas utiligata, ekzemple en Germanio. La valoroj estas similaj ankaŭ por aliaj industriaj landoj. Oni vidas sur la skemo, ke dum transformo de primara energio en finan energion, okazas multe da perdoj.

Fina energio estas utiligata en diversaj iloj por plenumi la bezonatan laboron aŭ por produkti la bezonatan energi-formon (ekzemple varmo aŭ lumo).

La parto de la fina energio, kiu estas efektive utiligita nomiĝas ***utila energio*** $\boldsymbol{E_u}$.

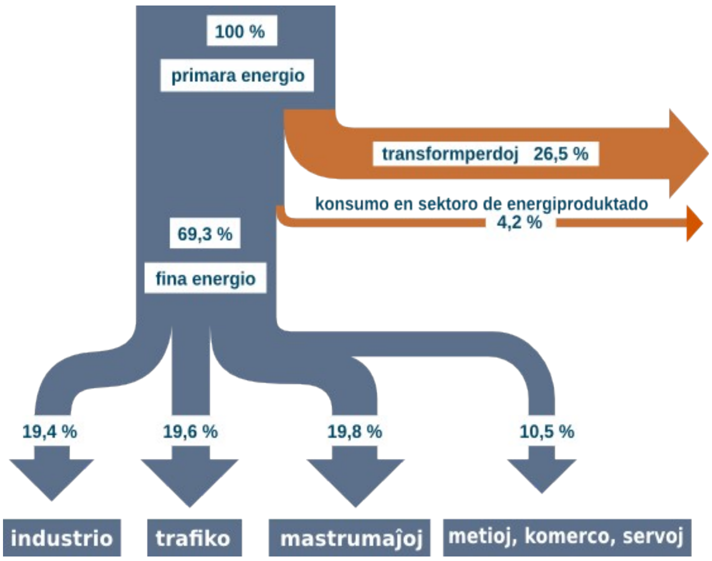


Fig. 7.3: Utiligo de primara energio en Germanio (fonto Agenda 21)

Ĉar dum ĉiu transformo perdiĝas parto de utiligebla energio, validas $\boldsymbol{E_p > E_f > E_u}$.

Eksperimento 7.1 - Primara kaj fina energio

En ĉi tiu eksperimento estas uzata la nivelenergio de korpo, kiu troviĝas je nivelo h kiel primara energio. Kiam la korpo malleviĝas, per ĝia nivelenergio la generatoro produktas elektran energion. Tiu iĝas fina energio kaj estas uzata de la lampo por eligi lumon (vidu Fig. 7.4).

Por kalkuli la diversajn energiojn, necesas mezuri la mason de la korpo, la niveldiferencon, la tempon, dum kiu la fariĝo disvolviĝas, la tension kaj la kurentintenson.

Se kiel generatoro estas uzata la motoro kun radoaro ([49]) de Fig. 7.5, la rezultoj estas la sekvaj:

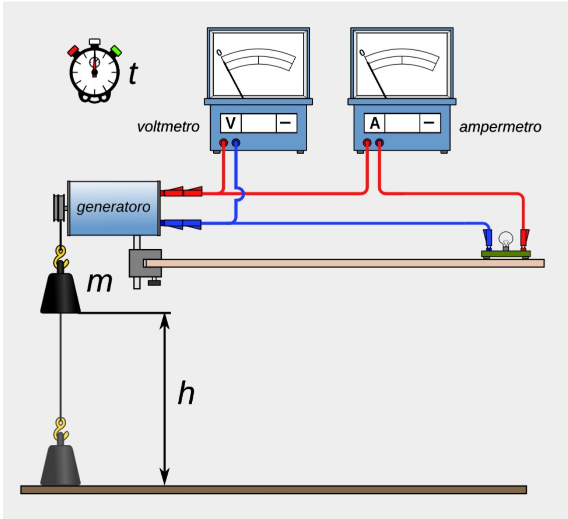


Fig. 7.4 Transformo de nivelenergio en elektra energio

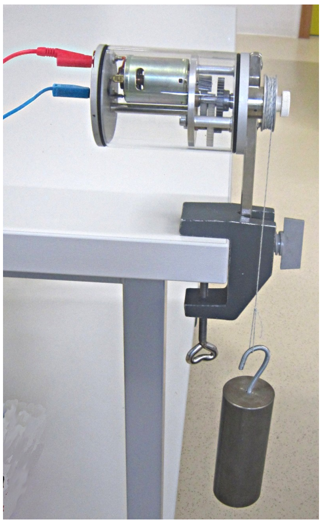


Fig. 7.5: Motoro kun radoaro

$m = 2{,}0\ kg \qquad h = 0{,}76\ m \qquad t = 6{,}5\ s$
$U = 1{,}2\ V \qquad I = 0{,}6\ A$

nivelenergio
$$E_N = m \cdot g \cdot h = 2{,}0\,kg \cdot 9{,}81\,m/s^2 \cdot 0{,}76\,m = 14{,}9\,J$$

elektra energio $E_{el} = U \cdot I \cdot t = 1{,}2\,V \cdot 0{,}6\,A \cdot 6{,}5\,s = 4{,}7\,J$

En ĉi tiu kazo la rendimento de la transformo de la primara energio en fina energio rezultas:

$$\eta = \frac{E_{el}}{E_N} = \frac{4{,}7\,J}{14{,}9\,J} = 0{,}31 \qquad \eta_{\%} = 31\ \%$$

Precipe pro la granda froto en la radaro, tiukaze la rendimento estas tre malalta. En grandaj generatoroj ĝi atingas 90% (sen konsideri radoaron).

7.2 Produktado de elektra energio

Elektra energio estas la plej facile uzebla kaj pro tio la plej valora energiformo. Ĝi ne ekzistas nature en uzebla formo ([50]) kaj necesas "produkti" ĝin, uzante aliajn enegiformojn.

Konsiderante la tutmonde/tuteŭrope produktitan elektran energion, la primaraj energiformoj utiligataj por ĝia produktado estas distribuitaj kiel montras la Fig. 7.6. El ili nur akvo, vento, suno kaj tervarmo (geotermo) estas renovigeblaj energifontoj kaj pro tio el la figuroj rezultas, ke nur entute ĉirkaŭ 20% de la primaraj energifontoj estos daŭre disponeblaj por la homaro. Tio signifas, ke necesas malpliigi la konsumon por garantii energion ankaŭ al la venontaj generacioj.

49 La ilo enhavas motoron por konstanta tensio, kiu povas funkcii ankaŭ kiel generatoro.
50 Multe da elektra energio estas nature enhavita en la atmosfero precipe dum fulmotondroj, sed ĝis hodiaŭ, ĝi estas tute ne uzebla.

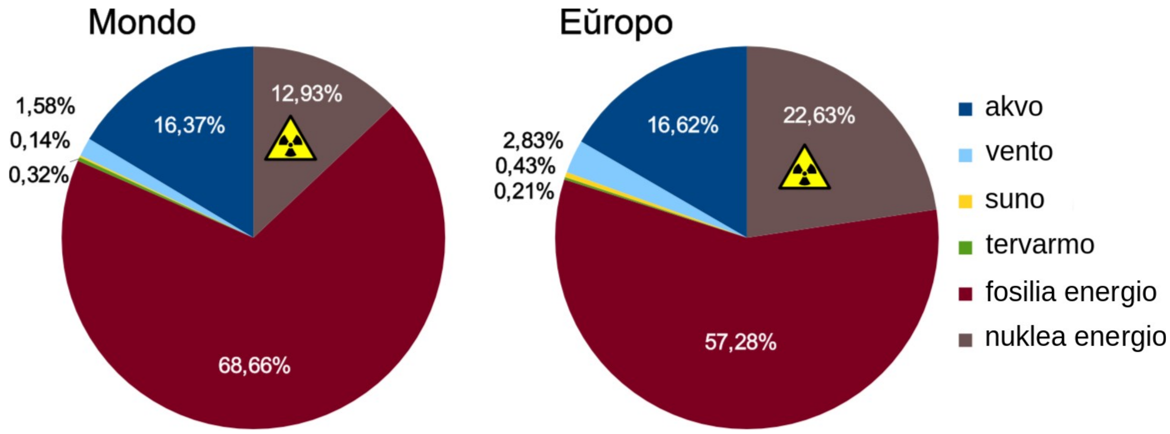


Fig. 7.6: Naturaj (primaraj) energifontoj por produktado de elektra energio (fonto: http://www.terna.it)

7.2.1 Hidroelektraj centraloj

Hidroelektraj centraloj produktas ĉirkaŭ 16% de la tutmonda elektra energio. Ili uzas fluantan aŭ falintan akvon por movi turbinon. La akvo devenas de rivero aŭ el artefarita barajlago. La niveldiferenco kaj la fluokvanto estas difinaj por la uzenda tipo de turbino.

Turbino Pelton

La turbino ***Pelton*** estis inventita en la jaro 1878 de Lester Pelton.([51])
Ĝi estas utiligata por grandaj niveldiferencoj (minimume 15 m sed kutime > 300 m ĝis 1600 m) kaj relative malgrandaj kvantoj da akvo.

Akvo el baraĵlago en granda altitudo estas transportata per premdukto al ajuto de la turbino, kie la potenciala energio (nivelenergio) transformiĝas en kineta energio (movenergio). La akvoŝpruco atingas la padelojn de la rado kun tre granda rapido (500 km/h ĉe niveldiferenco de 1260 m).

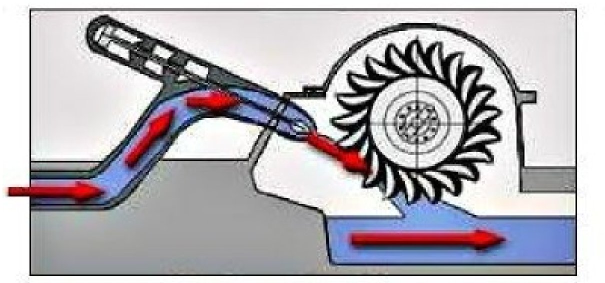


Fig. 7.7: Funkciskemo de turbino Pelton

Fig. 7.8: Padelrado de turbino Pelton

Pro la speciala formo de la padeloj preskaŭ la tuta kineta energio estas utiligata por fari la laboron, kiu necesas por movi la generatoron kaj produkti elektran energion.

Kun valoroj de = 0,85 – 0,90 la rendimento de la turbino Pelton estas alta kaj ĝi restas relative alta ankaŭ kiam la turbino ne estas plene ŝarĝita.

51 Lester Allan **Pelton** (1829 – 1908) estis usona teknikisto. Inter alie li laboris en minejo en Kalifornio, kie li konstruis la unuan turbinon en la jaro 1878.

Turbino Francis

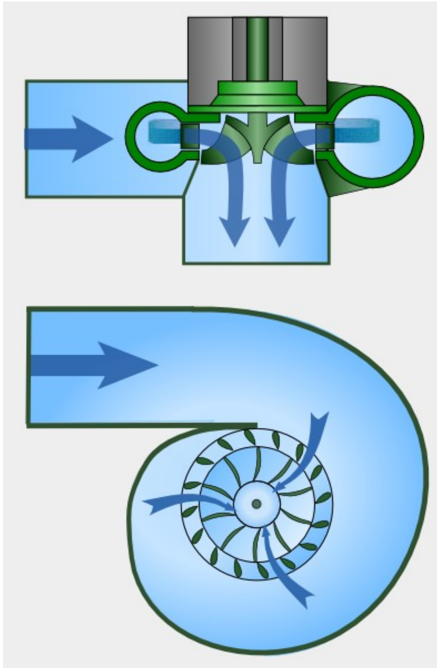


Fig. 7.9: Funkciskemo de turbino Francis

La unua turbino ***Francis*** estis konstruita en la jaro 1848 de James Francis.([52])

Ĝi estas utiligata por mezaj niveldiferencoj (10 m ĝis 600 m) kaj kvantoj da akvo de 2 m^3/s ĝis 50 m^3/s.

Premtubo transportas akvon al turbino, kie ĝi fluas sub granda premo radiale al padelrado en helika tubo. Gvidpadeloj kondukas la akvon al padelrado, kie, kaj per la potenciala kaj la kineta energio de akvo, estas farata laboro.

La modernaj turbinoj Francis atingas rendimenton de $\eta = 0{,}90$ sed, nur kiam la turbino laboras kun la tuta akvokvanto, por kiu ĝi estis projektita.

Turbino Kaplan

La turbino ***Kaplan*** estis projektita en la jaro 1913 de Viktor Kaplan.([53])

Ĝi estas utiligata por mezaj niveldiferencoj (< 25 m) kaj relative grandaj akvokvantoj.

Hidroelektraj centraloj kun grupo da turbinoj estas kutime konstruitaj ĉe riveroj. La turbinoj troviĝas en la baraĵsistemo mem, kaj la akvo fluas akse tra la padelradoj movante ilin.
Por plej bone adaptiĝi al diversaj fluokvantoj la padeloj estas reguleblaj. Tiamaniere la modernaj turbinoj Kaplan atingas rendimenton de $\eta = 0{,}90$.

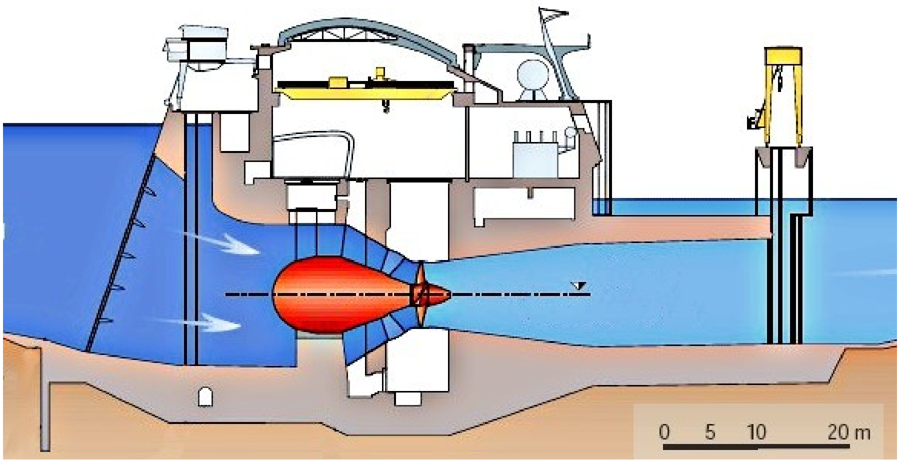


Fig. 7.10: Hidraŭlika centralo kun turbino Kaplan ĉe rivero Danubo

---

52 James Bicheno **Francis** (1815 – 1892) estis brita inĝeniero elmigrinta en Usonon. Tie li kunlaboris inter alie al konstruado de grandaj kanaloj. En 1848 kune kun U.A. Boyden li konstruis turbinon, kiu estis pli efika ol la aliaj ĝis tiam ekzistantaj.

53 Viktor **Kaplan** (1876 – 1934) estis aŭstria inventisto, inĝeniero kaj profesoro en teknika altlernejo. Li projektis sian novan turbinmodelon en la jaroj 1910-1913, sed nur en la jaro 1918 la unua turbino estis konstruita kaj utiligata.

Ekzemplo 7.1

En la hidroelektra centralo de Kardano troviĝas kvin turbinoj Francis, kiuj prilaboras maksimume 90 m³ da akvo en sekundo. La tuta niveldiferenco inter la baraĵsistemo kaj la turbinoj egalas al 183 m.

a) Kiom grandas la maksimuma elektra povumo de la centralo, se oni supozas, ke en la premdukto perdiĝas 5% de la potenciala energio de akvo, kaj la rendimento de la turbino, kaj tiu de la generatoro po egalas al 90%.

b) Desegnu la energifluskemon de la centralo!

c) Kiom da elektra energio jare produktas jare la centralo, se ĝi daŭre funkcias, kaj la meza fluokvanto da akvo egalas al 50% de la maksimumo.

Fig. 7.11: Hidroelektra centralo de Kardano

Solvo

a) $V = 90\ m^3$ → *por akvo* $m = 90000\,kg$

$h = 183\ m$ $t = 1\ s$

$\eta_{pd} = 0{,}95$ $\eta_t = 0{,}90$ $\eta_g = 0{,}90$

$$F_G = m \cdot g = 90000\,kg \cdot 9{,}81\,N/kg = 883\,kN$$

alportita nivelenergio $E_a = F_G \cdot h = 883\,kN \cdot 183\,m = 162\ MJ$

maksimuma utiligata energio $E_u = E_a \cdot \eta_{pd} \cdot \eta_t \cdot \eta_g = 162\,MJ \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 = 124\ MJ$

maksimuma elektra povumo $P_{maks} = \dfrac{E_u}{t} = \dfrac{162\ MJ}{1\,s} = 162\ MW$

b)

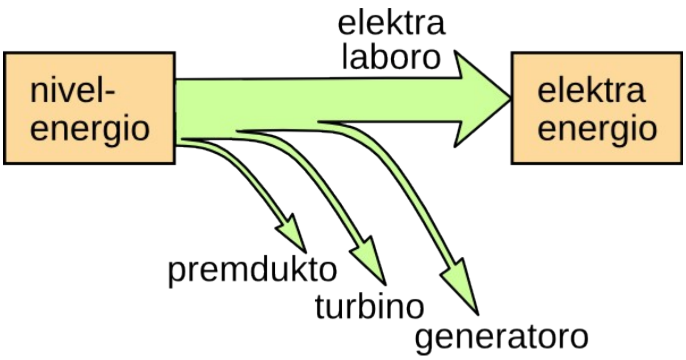


Fig. 7.12: Energifluskemo de hidroelektra centralo

c) $P_m = 0{,}5 \cdot P_{maks} = 81\ MW$

$t = 365 \text{ x } 24\ h = 8760\ h$ elektra energio $E_{el} = P_m \cdot t = 81\ MJ \cdot 8760\ h = 710\ GWh$

Respondo

a) La maksimuma elektra povumo egalas al 162 MW.

c) En unu jaro la centralo produktas 710 GWh da elektra energio.

7.2.2 Termoelektraj centraloj

Kiel la diagramoj de Fig. 7.6 montras, la plej granda parto de elektra energio estas produktata per termoelektraj centraloj.

En tiuj centraloj oni uzas varmenergion (internan energion) por vaporigi akvon. La vaporo fluas al vaporturbino, kie per la interna energio estas farata la necesa laboro por movi generatoron kaj produkti elektran energion. Por ke la turbino pli efike funkciu, post ĝi la vaporo devas esti kondensata. Por tio necesas malvarmigo en kondensilo.

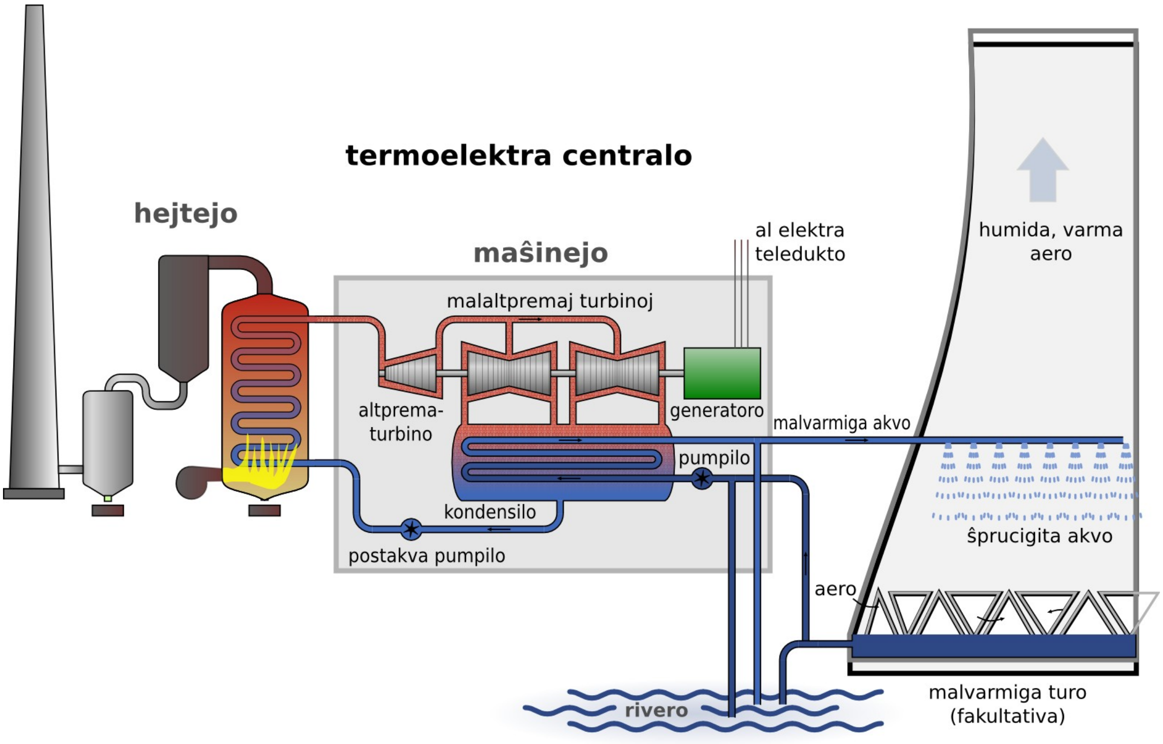


Fig. 7.13: Funkciskemo de termoelektra centralo

La interna energio uzata por vaporigi akvon, povas esti alportata ne nur per brulaĵo de fosiliaj brulaĵoj (ligno, karbo, gaso, nafto), sed ankaŭ per nukleaj reaktoroj aŭ helpe de tervarmo aŭ sunenergio.

Ĉiuokaze validas la energifluskemo de Fig. 7.14, kiu montras, ke en termoelektraj centraloj nur ĉirkaŭ 38 % de la energio alportita povas esti transformata en utiligebla elektra energio. Por transformi la elektran tension kaj por transporti la energion al la konsumantoj, perdiĝas ankoraŭ ~ 4% de la komenca energio.

Sekvas, ke por disponigi unu kilovathoron da fina elektra energio al konsumanto, necesas ĉirkaŭ tri kilovathoroj da energio en brulaĵo.

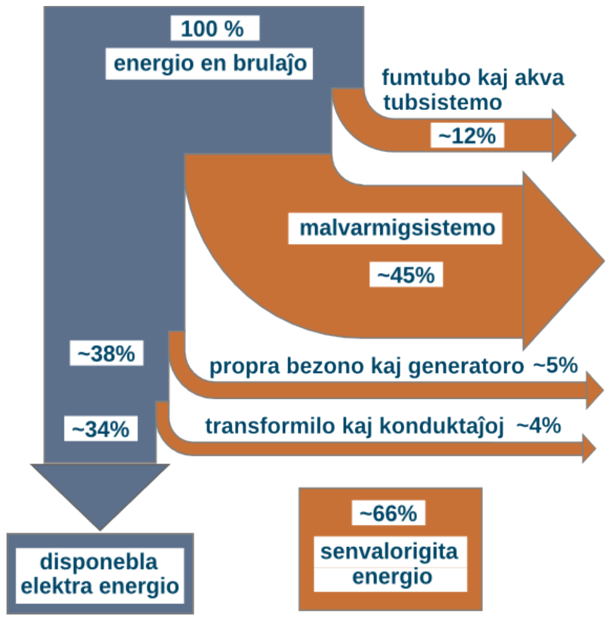


Fig. 7.14: Energifluskemo de termoelektra centralo

7.3 Temperaturo - interna energio - varmo

Fig. 7.15: Ardanta bremsdisko

En Fig. 7.15 oni vidas bremsdiskon kiu ardas, pro la granda frotlaboro farita per la bremso.

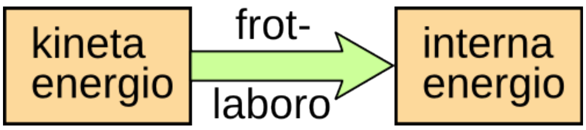


Fig. 7.16: Energitransformĉeno de bremsado

Kiam veturilo estas bremsata sur horizontala vojo, rezultas la energitransformĉeno de Fig. 7.16. La tuta movenergio estas transformata en ***internan energion*** de la bremsdisko kaj de la ĉirkaŭanta aero. La ***temperaturo*** de la disko povas atingi mallongtempe 800 °C kaj pli.

Gravas precizigi la diferencon inter temperaturo kaj interna energio.

- La ***temperaturo*** rilatas al rapido de la hazarda, vibranta movado de la partikloj de korpo. Ju pli rapide moviĝas la eroj, des pli alta estas la temperaturo.
- La ***interna energio*** estas sumo de la tuta movenergio *(kineta energio)* de la partikloj kaj de la potenciala energio estigita per la fortoj agantaj inter la partikloj. Pro tio la interna energio dependas de la ecoj de la molekuloj, de la temperaturo, de la maso kaj la stato (solida, likva, gasa) de la korpo.

7.3.1 Varmo

Fig. 7.17: Mergoboligilo kaj ĝia energitranformĉeno

La Fig. 7.17 montras varmigon de akvo per mergoboligilo kaj la rilatan energitransformĉenon. Per la elektra energio la elektronoj kapablas fari internan frotlaboron, kiu plialtigas la internan energion de la hejtrezistanco. Tiu transdonas sian internan energion al la akvo, kies interna energio pliiĝas.

Oni rimarkas, ke ***varmo*** estas la transdona formo de la interna energio, same kiel laboro estas la transdona formo de mekanikaj energiformoj.

Por la varmokvanto ni uzas la formulsimbolon $\boldsymbol{W_Q}$ ([54])

La transdonita varmokvanto egalas la ŝanĝiĝon de la interna energio. Se per la interna energio de korpo 1 estas varmigita korpo 2 validas:

$$\Delta E_{i1} = W_Q = \Delta E_{i2}$$

54 Kutime en termodinamiko por varmo estas uzata la formulsimbolo Q. Sed ĉar ni jam uzis la simbolon Q por la elektra ŝargo, kaj ĉar la varmo estas transdona formo de energio kiel la laboro, estas preferele uzi la formula simbolon W_Q.

7.3.2 Mezuro de varmo – specifa varmo

Eksperimento 7.2 - Specifa varmo 1

Estas mezurata la plialtigo de temperaturo depende de la alportita elektra energio por la sama maso da akvo kaj da puriga alkoholo ([55]). La energio estas mezurata per elektra energimezurilo, kies disko rivoluas unufoje por 1200 J. (vidu Fig. 7.18)

Unue oni registras la komencan valoron de la temperaturo.

Poste la elektra cirkvito estas fermata, kaj post tri rivoluoj de la disko de energimezurilo la ŝaltilo estas malfermata kaj la alporto de energio estas interrompata. Oni atendas, ĝis la temperaturo de la akvo atingas la maksimuman valoron, kiu estas notata.

Fig. 7.18: Mezuro de elektra energio kaj temperaturo

Poste oni enŝaltas denove la mergoboligilon, por tri rivoluoj de la energimezurilo k.t.p.

Por 300 g da akvo kaj 300 g da alkoholo rezultas la valoroj de la sekva tabelo. El tiuj valoroj eblas desegni la diagramon Fig. 7.19 .

	akvo		puriga alkoholo	
Eel [kJ]	ϑ [°C]	ΔT [K]	ϑ [°C]	ΔT [K]
0,0	22,00	0,0	22,30	0,0
3,6	24,70	2,7	25,90	3,6
7,2	27,30	5,3	29,50	7,2
10,8	29,70	7,7	33,10	10,8
14,4	32,30	10,3	36,50	14,2

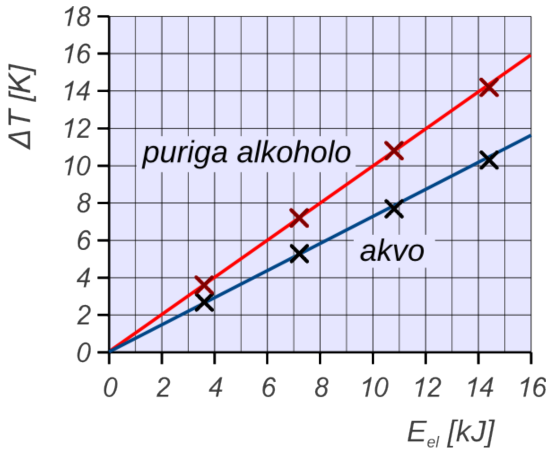


Fig. 7.19: Varmigo de akvo kaj puriga alkoholo

El diagramo de Fig. 7.19 rezultas, ke, por difinita maso de difinita substanco, la plialtigo de temperaturo estas proporcia al la kvanto de alportita energio. Se la procezo okazas sen perdoj rezultas

$$E_{el} = W_Q$$

kaj pro tio $\Delta T \propto W_Q \quad \rightarrow \quad W_Q \propto \Delta T$

Aliflanke estas tute logike, ke por plialtigi la temperaturon de difinita substanco je difinita valoro, necesas ju pli da energio, des pli granda estas la maso. $W_Q \propto m$

El la mezurvicoj de eksperimento 7.2 por difinita substanco rezultas:

$$W_Q \propto m \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad \frac{W_Q}{m \cdot \Delta T} = konstanto$$

La konstanto estas nomata ***specifa varmo*** kaj havas formulsimbolon ***c*** .

$$\boldsymbol{c = \frac{W_Q}{m \cdot \Delta T}} \quad \rightarrow \qquad \text{La mezurunuo estas} \quad [c] = \frac{J}{kg \cdot K}$$

Por kalkuli varmon rezultas la formulo: $\boldsymbol{W_Q = c \cdot m \cdot \Delta T}$

55 Puriga alkoholo estas 90%a denaturigita etanolo, ĝi enhavas 10% da akvo.

El diagramo de Fig. 7.14 rezultas, ke la mezurpunktoj rilataj al elektra energio de 7,2 kJ staras relative precize sur la kompensorekto. Do oni povas konsideri la sekvajn valorojn por la specifa varmo:

por akvo:

$$m = 0{,}3\,kg \qquad W_Q = 7{,}2\,J \qquad \Delta T = 5{,}3\,K \quad \rightarrow \quad c = \frac{7{,}2\,kJ}{0{,}3\,kg \cdot 5{,}3\,K} = 4{,}5\,\frac{kJ}{kgK} = 4500\,\frac{J}{kgK}$$

por puriga alkoholo:

$$m = 0{,}3\,kg \qquad W_Q = 7{,}2\,J \qquad \Delta T = 7{,}2\,K \quad \rightarrow \quad c = \frac{7{,}2\,kJ}{0{,}3\,kg \cdot 7{,}2\,K} = 3{,}3\,\frac{kJ}{kgK} = 3300\,\frac{J}{kgK}$$

En Tab. 7.1 troviĝas valoroj de la specifa varmo por kelkaj materialoj.

Videblas, ke la valoroj trovitaj en la supra eksperimento, estas pli altaj ol tiuj de la tabelo. La kialo estas, ke la likvo ne estas izolita. Parto de la alportita energio restas en la boligilo, kaj parto fluas al la ĉirkaŭanta aero. Tio iĝas des pli grave, ju pli alta estas la temperaturo. Pro tio la lastaj mezurpunktoj staras malsupre de la kompensorekto.

Memkompreneble la valoro por puriga alkoholo estas rimarkinde pli alta ol tiu de pura etanolo, ĉar puriga alkoholo enhavas 10% da akvo.

Videblas ankaŭ, ke la specifa varmo de akvo estas multe pli alta, ol tiu de ĉiuj aliaj materialoj. Tiu fakto tre gravas en la naturo.

Specifa varmo (ĉe 25 °C)	
materialo	c [J/(kgK)]
plumbo	129
aluminio	896
flava kupro	384
kupro	382
fero (pura)	452
ŝtalo	500
akvo	4184
etanolo	2430
glaso	800

Tab. 7.1

Ekzemplo 7.2 - Fando de drato

Fera drato kun maso egala 3,0 *g* kaj rezistanco de 0,4 Ω estas konektata al tensio de 6,0 *V*. Kiom da tempo pasas ĝis la drato fandiĝas?

Solvo

$$U = 6{,}0\,V \qquad R = 0{,}4\,\Omega \quad \rightarrow \quad I = \frac{U}{R} = \frac{6{,}0\,V}{0{,}4\,\Omega} = 15\,A$$

$$P_{el} = U \cdot I = 6{,}0\,V \cdot 15\,A = 90\,W \quad \rightarrow \quad E_{el} = P_{el} \cdot t$$

Se la tuta elektra energio transformiĝas en varmo $\rightarrow \quad E_{el} = P_{el} \cdot t = W_Q = c \cdot m \cdot \Delta T$

La specifa varmo de fero estas *c* = 452 *J/(kg K)* kaj ĝia fandopunkto egalas al 1538 °*C*.

Se la komenca temperaturo de drato estas 20 °*C* validas $\Delta T = (1538 - 20)\,K = 1518\,K$

tempodaŭro $t = \dfrac{c \cdot m \cdot \Delta T}{P} = \dfrac{0{,}452\,\frac{J}{g \cdot K} \cdot 3\,g \cdot 1518\,K}{90\,W} = 22{,}9\,s$

Respondo: La drato fandiĝas post ĉirkaŭ 23 sekundoj.

7.3.3 Transdono de interna energio

Kiam korpoj kun malsama temperaturo intertuŝiĝas, post iom da tempo iliaj temperaturoj egaliĝas. La interna energio de pli varmaj korpoj malpliiĝas kaj tiu de pli malvarmaj korpoj plialtiĝas. Se la sistemo de korpoj estas izolita, la tuta interna energio restas egala, la tuta varmo cedita de pli varmaj korpoj, egalas la tutan varmon sorbita de pli malvarmaj korpoj.

$$\Sigma W_{Qced} = \Sigma W_{Qsor}$$

Eksperimento 7.3 - Specifa varmo 2

Por determini la specifan varmon de metalo, peco el tiu metalo estas unue varmigata en bolanta akvo. Poste ĝi estas mergata en difinita kvanto da akvo, kies komenca temperaturo estis mezurata. La cilindro cedas internan energion al akvo, kies temperaturo plialtiĝas. La fina temperaturo, egala por akvo kaj metalo, estas mezurata.
El la mezuritaj valoroj eblas kalkuli la specifan varmon de la metalo. Por aluminia cilindro la rezultoj estas la sekvaj:

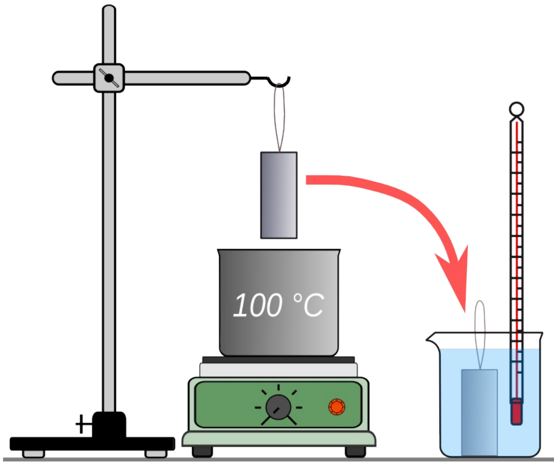


Fig. 7.20: Determino de specifa varmo de metalo

	akvo	aluminio
maso	m_1 = 200 g	m_2 = 97 g
komenca temperaturo	ϑ_{1k} = 22 °C	ϑ_{2k} = 100 °C
fina temperaturo	$\vartheta_{1f} = \vartheta_{2f}$ = 28,3 °C	
ŝanĝiĝo de temperaturo	ΔT_1 = (28,3 – 22)K = 6,3 K	ΔT_2 = (100-28,3)K= 71,7 K
specifa varmo	c_1= 4182 J/(kg K)	

varmo sorbita de akvo: $W_{Qsor} = c_1 \cdot m_1 \cdot \Delta T_1 = \frac{4{,}18\,J}{g \cdot K} \cdot 200\,g \cdot (28{,}3 - 22{,}0)\,K = 5270\,J$

varmo cedita de aluminio: $W_{Qced} = c_2 \cdot m_2 \cdot \Delta T_2$

se la tuta varmo cedita de aluminio estas sorbita de akvo: $W_{Qced} = W_{Qsor} = 5270\,J$

por la specifa varmo de alumino rezultas:

$$c_2 = \frac{W_{Qced}}{m_2 \cdot \Delta T_2} = \frac{5270\mathrm{J}}{97\,g \cdot 71{,}7\,K} = 0{,}76\,\frac{J}{g \cdot K} = 760\,\frac{J}{kg \cdot K}$$

La valoro eltrovita estas pli malalta ol tiu de la Tab. 7.1, kiu egalas al 896 J/(kgK). Fakte ne la tuta varmo cedita de la cilindro, estis sorbita de akvo. Parto estis cedita al glaso kaj al ĉirkaŭanta aero. Por eltrovi precizan valoron de la specifa varmo necesus bone izoli la sistemon kaj konsideri la varmon sorbita per la ujo en kiu troviĝas la akvo. Tio eblas uzante tiel nomataj *kalorimetroj*.

Fig. 7.21: Kalorimetro

Eksperimento 7.4 - Rendimento dum kuirado

Celo de la eksperimento estas determini la rendimenton rilate al la primara energio ĝis ekbolo de akvo, sur gasa flamo kaj sur elektra kuirplato.
En la poto troviĝas 250 ml da akvo kun komenca temperaturo de 20 °C. Por ekboli, la akvo devas atingi 100 °C . La energio utiligata egalas la sorbitan varmon.

$$m = 300\,g \qquad c = 4182\,J/(kgK) \qquad \Delta T = (100-20)\,K = 80\,K$$

$$E_u = W_Q = c\cdot m\cdot\Delta T = 4{,}18\,kJ/(kg\cdot K)\cdot 0{,}25\,kg\cdot 80\,K = 83{,}6\,kJ$$

Dum varmigo per gasflamo la energio alportata estas la kemia energio de la gaso (butano). Ĝi estas determinata pesante la gaskuirilon antaŭ la eksperimento kaj post la ekbolo de akvo.
Oni trovas, ke necesas 5 g da butano ĝis ekbolo de akvo en poto.
Ĉar kemia energio de butano egalas al 49,4 KJ/g , rezultas por la alportita energio:

$$E_a = 49{,}4\,\frac{kJ}{g}\cdot 5\,g = 247\,kJ$$

La rendimento de varmigo estas $\eta = \dfrac{E_u}{E_a} = \dfrac{83{,}6\,kJ}{247\,kJ} = 0{,}34$

Fig. 7.22: Varmigo sur gasflamo

Kompreneble tiu rezulto rilate al la primara energio validas nur, se la gaso estas alportata per gasdukto. Por la gaso en skatolo necesus konsideri ankaŭ produktadon kaj transporton de la skatolo.

Por la elektra plato rezultas, ke necesas 45 *Wh* da elektra energio por varmigi la akvon en la poto de 20 °C al bolpunkto de 100 °C.

La energio alportita egalas la elektran energion

$$E_a = E_{el} = 45\,Wh = 45\,Wh\cdot 3600\,\frac{kJ}{Wh} = 162\,kJ$$

Sur la elektra plato rezultas, rilate al la fina elektra energio $\eta_f = \dfrac{E_u}{E_a} = \dfrac{83{,}6\,kJ}{162\,kJ} = 0{,}52$

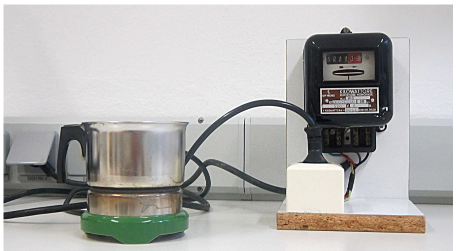


Fig. 7.23: Varmigo de akvo sur elektra plato

Se oni konsideras ankaŭ la rendimenton egala al 0,34 de la produktado de elektra energio en termoelektraj centraloj (vidu Fig. 7.14), la tuta rendimento rilate al la primara energio estas:

$$\eta_t = 0{,}52\cdot 0{,}34 = 0{,}18$$

Ĉirkaŭ 80% de la elektra energio estas produktita per termoelektraj centraloj (vidu diagramoj de Fig. 7.6 pag. 89) kaj ĉiuj centraloj estas konektataj en universala reto. Pro tio ĉiuokaze, uzi elektran energion por varmo estas tute malefika, kaj kuirado sur gasflamo, kiam la gaso estas alkondukata per gasdukto, estas multe pli efika ol kuirado sur elektra plato.

Fig. 7.24: Kuirado sur gasflamoj

Fig. 7.25: Kuirado sur elektra plato

7.4 Ekzemploj

Ekzemplo 7.3 - Konservado de interna energio

Oni boligas 1,2 kg da akvo en ŝtala poto, kies maso egalas al 650 g.
Kiom da akvo kun temperaturo de 20 °C necesas aldoni al la poto, por ke la fina temperaturo atingu 80 °C?

Solvo

poto: $m_p = 650\,g$ $\quad c_p = 450\frac{J}{kgK}$ $\quad$ akvo en poto: $m_{a1} = 650\,g$ $\quad c_a = 4180\frac{J}{kgK}$

komencaj temperaturoj: de poto kun akvo: $\vartheta_1 = 100\ °C$ de aldonita akvo: $\vartheta_2 = 20\ °C$

fina temperaturo de la tuto: $\vartheta_f = 80\ °C$

temperatursanĝiĝoj: poto kun akvo: $\Delta T_p = \vartheta_1 - \vartheta_f = 20\,K$

aldonita akvo: $\Delta T_a = \vartheta_f - \vartheta_2 = 60\,K$

varmo cedita de akvo en poto: $W_{Qa1} = c_a \cdot m_{a1} \cdot \Delta T_p = 4{,}18\frac{kJ}{kgK} \cdot 1{,}2\,kg \cdot 20\,K = 100\,kJ$

varmo cedita de poto: $W_{Qp} = c_p \cdot m_p \cdot \Delta T_p = 0{,}5\frac{kJ}{kgK} \cdot 0{,}65\,kg \cdot 20\,K = 6{,}5\,kJ$

tuta varmo cedita: $W_{Qc} = W_{Qa1} + W_{Qp} = 100\,kJ + 6{,}5\,kJ = 106{,}5\,kJ$

varmo sorbita de aldonita akvo: $W_{Qs} = c_a \cdot m_{a2} \cdot \Delta T_a$

pro konservado de interna energio (se la tuta energio restas en la poto) : $W_{Qs} = W_{Qc}$

la maso de aldonita akvo rezultas: $$m_{a2} = \frac{W_{Qs}}{c_a \cdot \Delta T_a} = \frac{106{,}5\,kJ}{4{,}18\,kJ/kgK \cdot 60\,K} = 0{,}425\,kg$$

Respondo: Teorie necesas aldoni 0,425 kg da akvo kun temperaturo de 20 °C .
Fakte sufiĉas iomete malpli, ĉar parto de varmo perdiĝas en ĉirkaŭaĵo.

7.4.1 Solvendaj problemoj

1. En glaso troviĝas 500 g da akvo. Kiom da kilovathoroj de elektra energio bezonas mergovarmigilo por plivarmigi la akvon de 20 °C al 80°C, se la rendimento de varmigo egalas al 94%?
2. En banujo troviĝas 45 l da akvo kun temperaturo de 50 °C. Kiom da malvarma akvo kun temperaturo de 15°C necesas aldoni, por ke la temperaturo atingu 38 °C?
3. Elektra hejtilo de lavmaŝino havas rezistancon de 35 Ω . Kiam ĝi estas konektita al elektra energifonto la kurentintenso rezultas 6,5 *A*.
 Kiom da tempo necesas, por plivarmigi 9,5 litroj da akvo de 12 °C al 60°C?
 Oni supozas, ke la tuta energio restu en akvo.

Respondoj

1. Ĝi bezonas 0,037 kWh da elektra energio.
2. Necesas aldoni 23,5 litroj da akvo.
3. La plivarmigo daŭras 21 minutoj kaj 29 sekundoj.

7.5 Hidrogena ekonomio

Hidrogena ekonomio estas ekonomio, en kiu hidrogeno anstataŭas la fosiliajn brulaĵojn kaj iĝas la ĉefa portanto de energio. Kondiĉo por tio estas, ke eblas produkti hidrogenon per novigeblaj energifontoj.

La ideo estas la sekva:
Per elektra energio, produktita per novigeblaj energifontoj, akvo estas disigata en hidrogeno kaj oksigeno per elektrolizo. $2H_2O$ + elektra energio → $2H_2 + O_2$

La produktita hidrogeno povas esti stokata kaj transportata al uzantoj, kiuj uzas ĝin kiel fuelo en aŭtoj aŭ por produkti elektran energion en fuelpiloj.
Praktike hidrogeno estas uzata nur kiel intertempa stokejo de energio.

Eksperimento 7.5 - Rendimento de hidrogena ekonomio

Celo de la eksperimento estas determini la rendimenton de hidrogena ekonomio.
Unue elektra energio estas uzata por produkti hidrogenon kaj oksigenon en fuelpilo kiu funkcias kiel elektrolizilo (vidu Fig. 7.26). Poste el hidrogeno kaj oksigeno en fuelpilo estas produktata elektra energio, kiu movas elektran motoron.

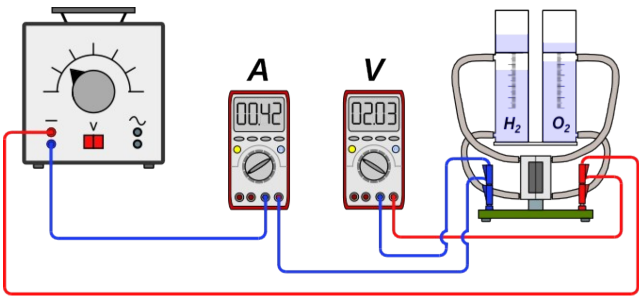


Fig. 7.26: Fuelpilo funkcianta kiel elektrolizilo

Mezurante la alportitan kaj la utiligitan elektran energion, eblas kalkuli la rendimenton de la proceso.

Montriĝas, ke kiam la fuelpilo estas konektita al tensio de 2,0 V la kurentintenso egalas al 0,42 A kaj por produkti 10 cm³ da hidrogeno necesas 3 minutojn.
La alportita elektra energio por produkti 10 cm³ da hidrogeno rezultas:

$$E_a = U_a \cdot I_a \cdot t_a = 2{,}0\,V \cdot 0{,}42\,A \cdot 180\,s = 151\,J$$

Kiam la fuelpilo estas provizita per hidrogeno kaj oksigeno, ĝi kapablas movi motoron per tensio de 1,3 V kaj kurentintenso de 51 mA. La volumeno de 10 cm³ da hidrogeno sufiĉas por movi la motoron dum 18 minutojn.

La utiligita elektra energio de 10 cm³ da hidrogeno rezultas:

$$E_u = U_u \cdot I_u \cdot t_u = 1{,}3\,V \cdot 0{,}051\,A \cdot 1080\,s = 71{,}6\,J$$

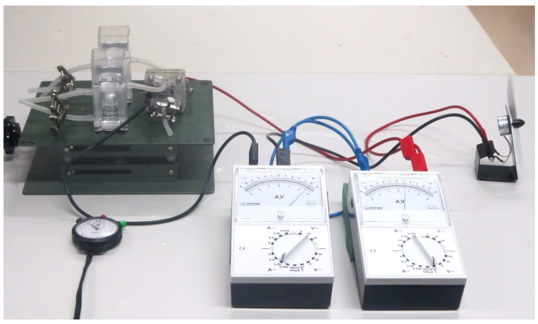


Fig. 7.27: Fuelpilo produktas elektran energion

El tiuj valoroj rezultas rendimento de la hidrogena ekonomio $\eta_f = \frac{E_u}{E_a} = \frac{71{,}6\,J}{151\,J} = 0{,}47$

Eksperimento 7.5 montras, ke kiam oni utiligas hidrogenon kiel intertempan stokejon, perdiĝas pli ol 50 % de la origina elektra energio. Ĉar ankaŭ grandaj instalaĵoj ne estas pli efikaj, oni povas konkludi, ke hidrogena ekonomio ne vere taŭgas por solvi la energiproblemojn de la mondo.

Vortindekso