

WALTER BERNARD

# FIZIKO

BAZA KURSO

DUA PARTO



ESPERANTO-KLUBO  
SUDTIROLO



## **Enhavo**

1 Statika ekvilibro.....	1
1.1 Fortoj en ekvilibro.....	1
1.1.1 Rezultanto kaj paralelogramo de fortoj.....	1
1.1.2 Ekvilibro de tri fortoj.....	2
1.1.3 Malkompono de forto en komponantojn.....	3
1.1.4 Malkompono de pezoforto sur klinita ebena.....	4
1.1.5 Ekzemploj.....	4
1.1.6 Solvendaj problemoj.....	5
1.2 Tordomomanto.....	6
1.2.1 Mekanika ekvilibro.....	7
1.2.2 Masocentro.....	10
1.2.3 Specoj de ekvilibro.....	12
1.2.4 Stabileco – sekureco rilate al renversiĝo.....	13
1.2.5 Ekzemploj.....	14
1.2.6 Solvendaj problemoj.....	15
2 Movo kaj forto.....	16
2.1 Ĝeneralaĵoj pri movo.....	16
2.1.1 Rapido kaj akcelo.....	16
2.1.2 Movo kun konstanta akcelo.....	18
2.2 Forto kaj akcelo.....	19
2.2.1 Leĝa difino de la unuo 1 N – baza ekvacio de mekaniko.....	19
2.2.2 Libera falo.....	20
2.2.3 Falo en aero – paraŝutado.....	21
2.2.4 Akcelo sur klinita ebena.....	22
2.3 Movenergio.....	23
2.3.1 Ekzemploj.....	23
2.4 Unuforma cirkla movo.....	26
2.5 Centra forto.....	27
2.5.1 Kalkulado de la centra forto.....	27
2.5.2 Ekzemploj.....	28
2.6 Solvendaj problemoj.....	30
3 Elektromagneta forto.....	31
3.1 Fundamentoj de magnetismo.....	31
3.1.1 Bazaj magnetaj fenomenoj.....	31
3.1.2 Klarigo de magnetado – elementaj magnetoj.....	32
3.1.3 Magneta kampo.....	33
3.2 Elektra kurento en magneta kampo.....	34
3.2.1 Magneta kampo de elektra kurento.....	34
3.2.2 Magneta forto aganta al elektra kurento.....	36
3.2.3 Mezuro de magneta kampo.....	37
3.2.4 Kalkulado de elektromagneta forto.....	38
3.2.5 Unuopa volvo kaj volvaĵo en magneta kampo.....	40
3.2.6 Forto inter paralelaj konduktiloj trafluataj de kurento.....	41
3.2.7 Difino de la mezurunuo ampero.....	41
3.3 Analogaj kurentmezuriloj.....	42
3.3.1 Mezurilo kun turniĝanta bobeno.....	42

3.3.2	Mezurilo kun moviĝanta fero.....	43
3.4	Elektraj motoroj.....	44
3.4.1	Motoroj por unudirekta kurento.....	44
3.5	Magneta kampo de bobeno - magneta permeablo.....	45
3.5.1	Kampo de bobeno.....	45
3.5.2	Magneta permeablo.....	46
3.6	Forto aganta al moviĝanta ŝargo - Lorenca forto.....	47
3.6.1	Defleksado de moviĝanta ŝargo en magneta kampo.....	48
3.6.2	Katodradia tubo.....	48
3.7	Ekzemploj.....	50
3.7.1	Solvendaj problemoj.....	50
4	Elektromagneta indukto.....	51
4.1	Indukto en movataj konduktantoj.....	51
4.1.1	Indukto en rotacianta volvo.....	52
4.2	Elektromagneta indukto kaj magneta flukso.....	53
4.2.1	Magneta flukso – leĝo pri elektromagneta indukto.....	54
4.3	Indukto kaj energio.....	56
4.3.1	Leĝo de Lenz.....	57
4.4	Generatoroj.....	58
4.4.1	Generatoroj por unudirekta tensio.....	58
4.4.2	Generatoroj por alterna tensio.....	59
4.4.3	Trifaza elektro.....	59
4.5	Transformilo.....	60
4.5.1	Funkciado de transformilo.....	60
4.5.2	Rilatumo inter la tensioj kaj kurentoj de transformilo.....	61
4.5.3	Perdoj de transformilo.....	62
4.5.4	Transmisio de elektra energio.....	63
4.6	Solvendaj problemoj.....	65

# 1 Statika ekvilibro

## 1.1 Fortoj en ekvilibro

### 1.1.1 Rezultanto kaj paralelogramo de fortoj

#### Eksperimento 1 - Rezultanto

La du fortoj  $F_1 = 2,7 \text{ N}$  kaj  $F_2 = 1,4 \text{ N}$  plilongigas la risorton de Fig. 1 je la distanco  $s$ . Sama plilongigo estas atingebla ankaŭ per la sola forto  $F_R = 3,1 \text{ N}$ . Tio signifas, ke la fortoj  $F_1$  kaj  $F_2$  kune, havas saman efikon kiel la forto  $F_R$  sola. Oni nomas  $F_R$  rezultanta forto aŭ **rezultanto** de la du fortoj  $F_1$  kaj  $F_2$ .

Ĝenerale validas:

La **rezultanto** de pluraj fortoj estas tiu forto, kiu sola havas saman efikon, kiel la konsideritaj fortoj kune.

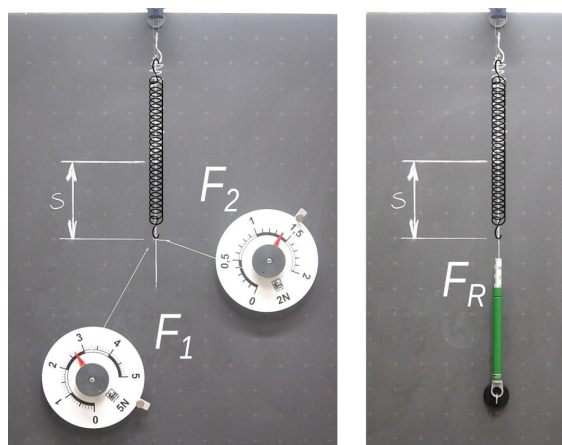


Fig. 1 Sama plilongigo de risorto

Por eltrovi la rezultanton de pluraj fortoj, ne sufiĉas fari sumon de la rilataj grandoj. Videblas el la supra eksperimento, ke

$$F_1 + F_2 = 2,7 \text{ N} + 1,4 \text{ N} = 4,1 \text{ N} > 3,0 \text{ N} = F_R$$

Sed fortoj ja estas vektoroj, kaj pro tio gravas ne nur ilia grando, sed ankaŭ ilia direkto. La rezultanto de pluraj fortoj akireblas nur, farante tiel nomantan **vektoraran sumon**.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_R$$

Kiam agas nur du fortoj, la vektora sumo estas facile trovebla per **paralelogramo de fortoj**. Oni povas konstrui ĝin en la sekvanta maniero:

- Unue estas difinita taŭga skalo por la fortoj.
- La donitaj fortoj estas desegnataj en la difinita skalo kiel sagoj kun ĝusta direkto.
- Paralele al la agolinioj de la donitaj fortoj oni desegnas helpliniojn por konstrui paralelogramon.
- La diagonalo de paralelogramo fariĝas la vektoro de la rezultanto.

La procedo estas ilustrata en la sekva Fig. 2

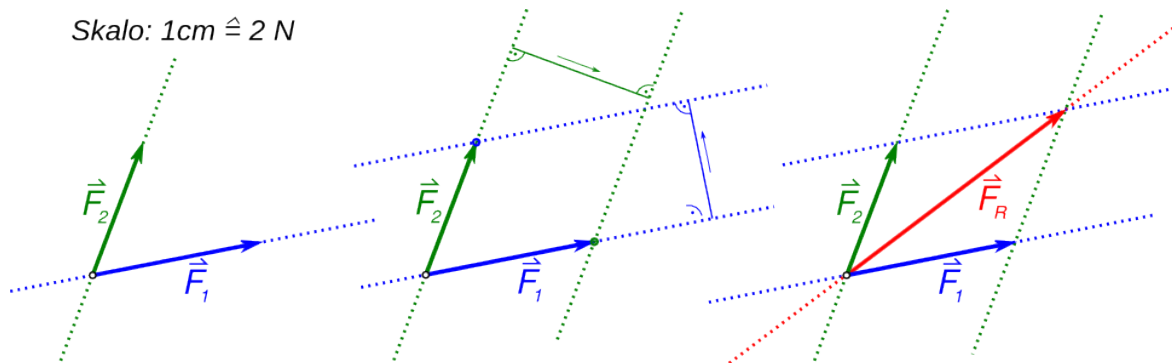


Fig. 2: Konstruado de paralelogramo de fortoj

## 1 Statika ekvilibro

Kiam du fortoj ortas, eblas determini la grandon de la rezultanto ne nur per paralelogramo sed ankaŭ kalkulante ĝin helpe de la teoremo de Pitagoro <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>. En tiu kazo, la granda de la rezultanto egalas al:

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$

### Ekzemplo 1 - Telegrafa fosto

Ĉe la telegrafa fosto de Fig. 3 la unua konduktilo tiras orienten, per forto de 440 N kaj alia konduktilo tiras suden, per forto de 280 N.

Eltrovi la grandon kaj direkton de la rezultanto!

**Solvo**

$$F_1 = 440 \text{ N} \quad F_2 = 280 \text{ N}$$

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{(440 \text{ N})^2 + (280 \text{ N})^2} = 522 \text{ N}$$

Por eltrovi la direkton de la rezultanto, necesas konstrui paralelogramon de fortoj. El tiu rezultas, ke  $\alpha = 32^\circ$ . Videblas ankaŭ, ke la longo de la sago, kiu rilatas al la rezultanto, konformas al la valoro eltrovita per la teoremo de Pitagoro.

**Respondo:**

La granda de la rezultanto egalas al 520 N kaj ĝi tiras sud-orienten laŭ angulo de  $32^\circ$ .

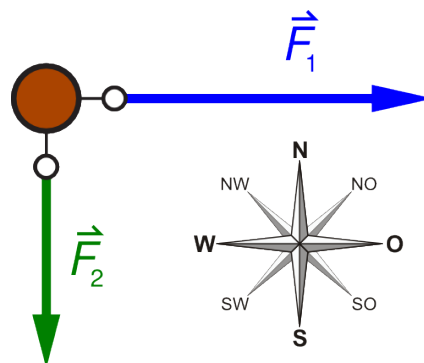
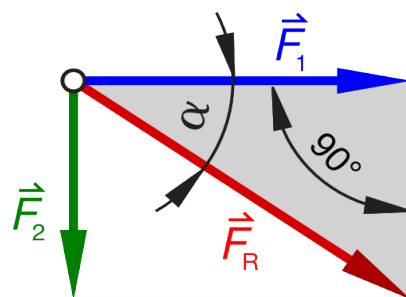


Fig. 3: Telegrafa fosto



Skalo: 1cm ≙ 100 N

Fig. 4:

### 1.1.2 Ekvilibro de tri fortoj

Punktmaso (aŭ korpo) troviĝas en ekvilibro, kiam la vektora sumo de ĉiuj fortoj agantaj sur ĝin estas nulo. Sekvas, ke tri fortoj agantaj en sama punkto ekvilibras, kiam la rezultanto de du el ili, havas saman grandon kaj inversan direkton de la tria (vidu Fig. 5).

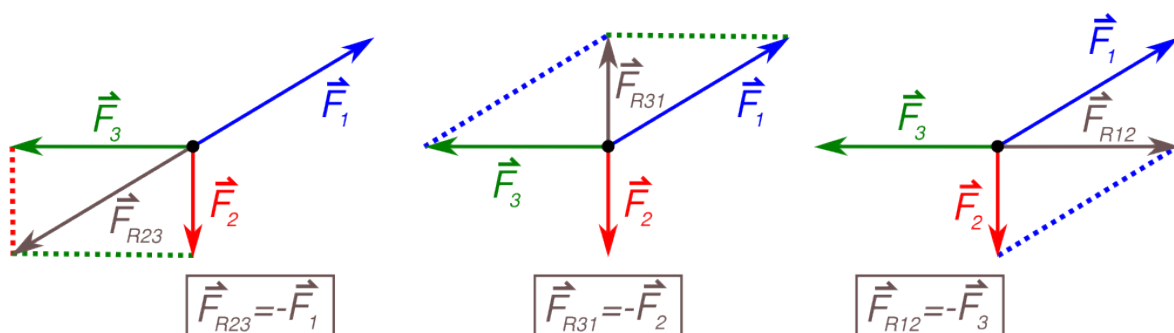


Fig. 5: La rezultanto de du fortoj ekvilibrigas la trian forton.

- 1 **Pitagoro** (greke Πυθαγόρας 570 a.K. - ~510 a.K.) Greka filozofa kaj matematikisto. Tridekjaraĝa, li direktiĝis al Krotono en Italio, kie li fondis filozofian komunumon laŭmodele de la religiaj kunfrataroj.
- 2 Uzante la metodojn de trigonometrio, la granda de la rezultanto kaj ĝia direkto estas kalkulebla senprobleme ankaŭ se la fortoj ne ortas. Sed tio ne estos pritraktata en tiu ĉi libro.

### 1.1.3 Malkompono de forto en komponantojn

En multaj realaj situacioj, iu ekstera forto aganta sur konstruaĵo, estas ekvilibrigata per pluraj fortoj, kies direktoj estas konataj. Ekzemploj estas prezentataj en la sekva Fig. 6.

Maldekstre la stangoj 1 kaj 2 ekvilibrigas la pezoforton de la lampo. Se la stangoj estas turneblaj ĉe siaj ekstremajoj, la fortoj estigataj per la stangoj, havas saman direkton de la stangoj mem.

Dekstre la pezoforto de la lampo estas ekvilibrigata per du fortoj, kiuj havas direkton de la ŝnuroj 1 kaj 2.

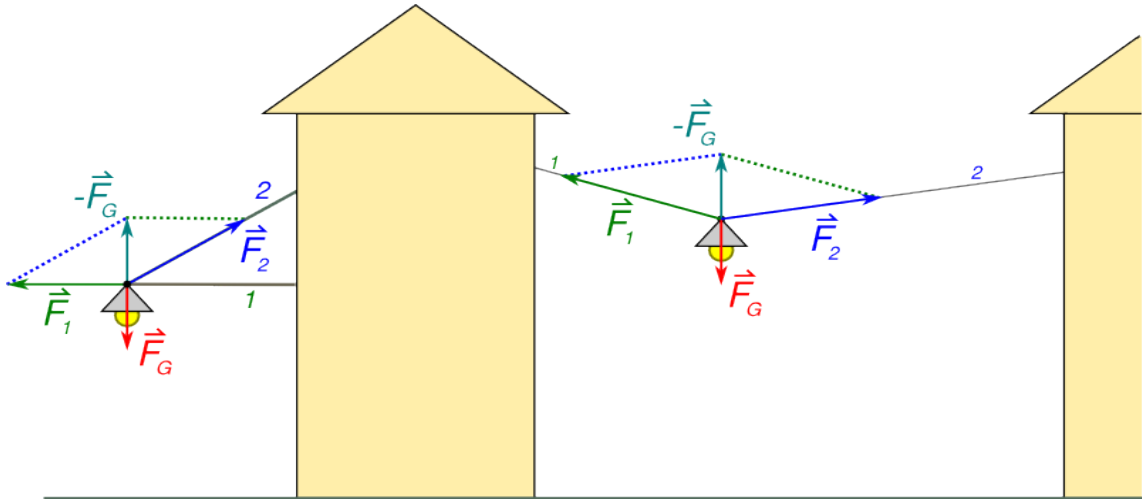


Fig. 6: Stratlampoj

Por eltrovi la fortojn, kiuj ŝarĝas la elementojn de la konstruaĵo, necesas malkomponi la eksteran forton. Eblas fari tion per konstruo de paralelogramo, kies lateroj havas direkton de la komponantoj, kaj kie la donita forto fariĝas diagonalo.

La procedo ilustrita en Fig. 7 estas la sekva :

- Unue oni difinas taŭgan skalon por la fortoj.
- La donita forto estas desegnata en la difinita skalo kiel sago, laŭ ĝusta direkto.
- Estas desegnataj la agolinioj de la trovendaj fortoj.
- Paralele al la agolinioj de la trovendaj fortoj oni konstruas helpliniojn. Rezultas paralelogramo, kies diagonalo fariĝas la donita forto.

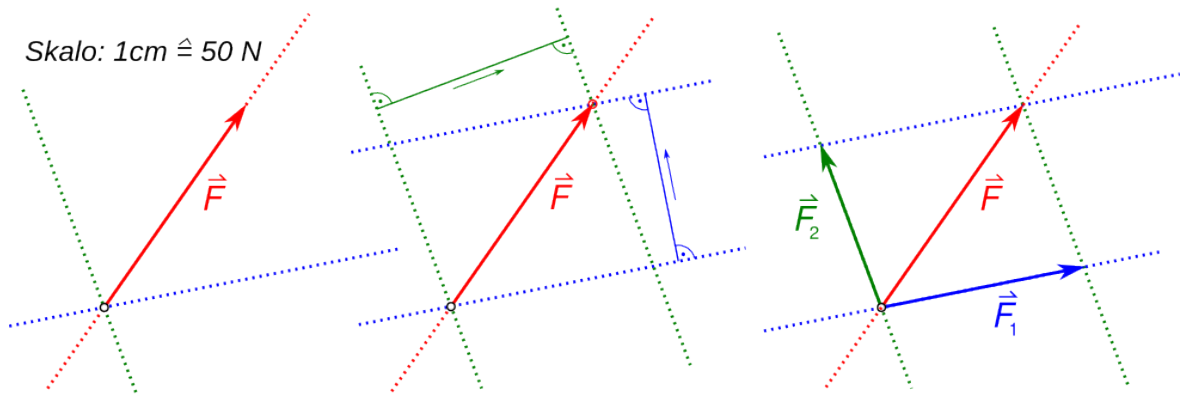


Fig. 7: Malkompono de forto

**1.1.4 Malkompono de pezoforto sur klinita ebena**

En ĉapitro 5 de la unua volumo, la forto, kiu necesas por puŝi supren la barelon de Fig. 8, estis determinita helpe de la leĝo de konservado de energio.

$$F_G \cdot h = F_T \cdot s \rightarrow F_T = \frac{F_G \cdot h}{s}$$

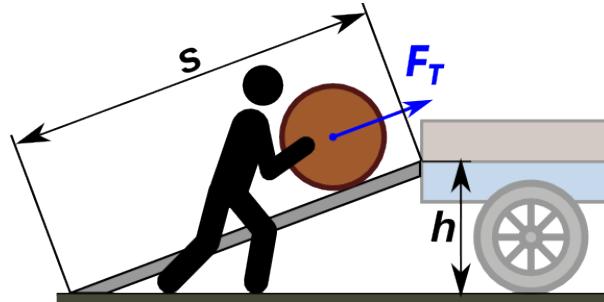


Fig. 8

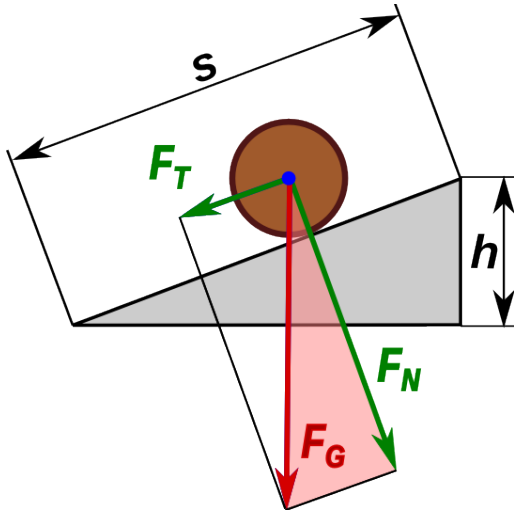


Fig. 9 Malkompono de pezoforto

Eblas eltrovi la forton  $F_T$  ankaŭ per malkompono de la pezoforto  $F_G$  en du komponantojn. La unua komponanto  $F_T$  agas laŭlonge la klinebena kaj tiras la barelon malsupren, la dua komponanto  $F_N$  agas orde al la klinebena kaj premas la barelon sur la ebena.

Pro la simileco de la triangulo de fortoj (rozkolora) kun la triangulo de klinita ebena (griza vidu Fig. 9) rezultas:

$$\frac{F_T}{h} = \frac{F_G}{s} \rightarrow F_T = \frac{F_G \cdot h}{s}$$

**1.1.5 Ekzemploj**

**Ekzemplo 2 - Murgruo**

Al murgruo de Fig. 10 estas pendigita metala cilindro kun maso de 130 kg .

Determinu la fortojn en la stangoj 1 kaj 2.

Solvo

$$m = 130 \text{ kg} \rightarrow F_G = m \cdot g = 1275 \text{ N} = 1,28 \text{ kN}$$

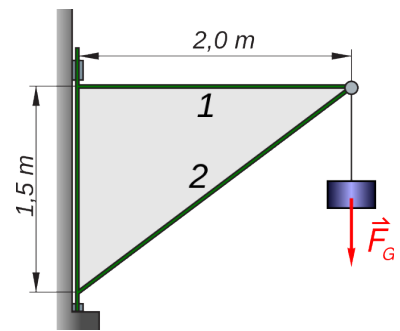


Fig. 10: Turniĝanta murgruo

Se la stangoj estas turneblaj ĉe siaj ekstremaĵoj, la direkto de la fortoj  $F_1$  kaj  $F_2$  estas tiu de la rilataj stangoj. Eblas konstrui la komponantojn laŭ la metodo klarigita en Fig. 7 . La rezulto estas montrata en sekva Fig. 11.

$$F_1 = 1,7 \text{ kN} \quad F_2 = 2,15 \text{ kN}$$

Pro la simileco de la grizaj trianguloj, eblas ankaŭ kalkuli la fortojn.

$$\frac{F_1}{2,0} = \frac{F_G}{1,5} \rightarrow F_1 = \frac{F_G \cdot 2,0}{1,5} = 1,7 \text{ kN}$$

$$F_2 = \sqrt{F_1^2 + F_G^2} = 2,13 \text{ kN}$$

La rezultoj estas sufiĉe koincidantaj.

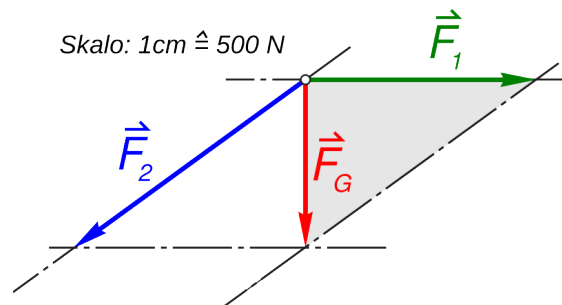


Fig. 11: Malkompono de  $F_G$

**Ekzemplo 3 -Stratlampo**

La maso de la lampo en Fig. 12 egalas al 9,5 kg.

Kiom grandas la fortoj en la kabloj 1 kaj 2?

**Solvo**

$$m = 9,5 \text{ kg} \rightarrow F_G = m \cdot g = 93 \text{ N}$$

La direkto de la fortoj  $F_1$  kaj  $F_2$  estas sama kiel tiu de la rilataj kabloj.

Eblas konstrui la komponantojn laŭ la metodo klarigita en par. 1.1.3 Fig. 7 .

La rezulto estas montrata en Fig. 13.

$$F_1 = 214 \text{ N} \quad F_2 = 207 \text{ N}$$

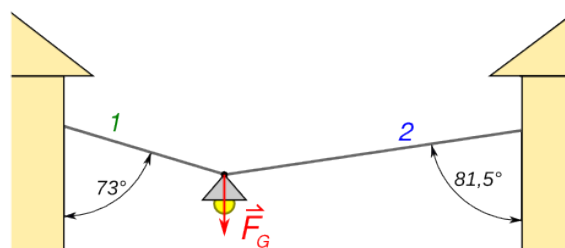
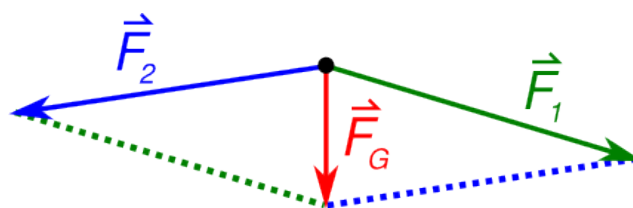


Fig. 12: Stratlampo pendigita per du kabloj



Skalo: 1cm  $\hat{=}$  50 N

Fig. 13: Malkompono de pezoforto

**1.1.6 Solvendaj problemoj**

1. La du fortmezuriloj de Fig. 15 montras saman forton egala al 2,5 N. La angulo egalas al  $\alpha = 120^\circ$ .

Determinu la mason de la pendigita pezilo!

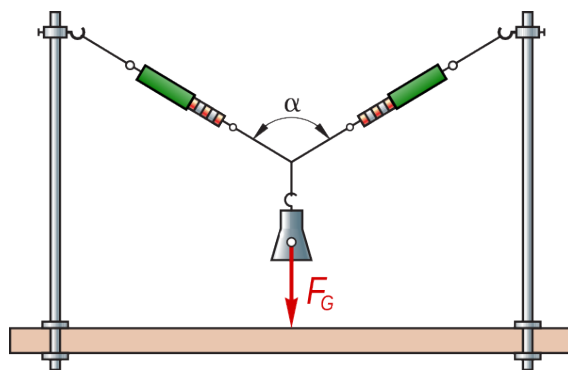


Fig. 15

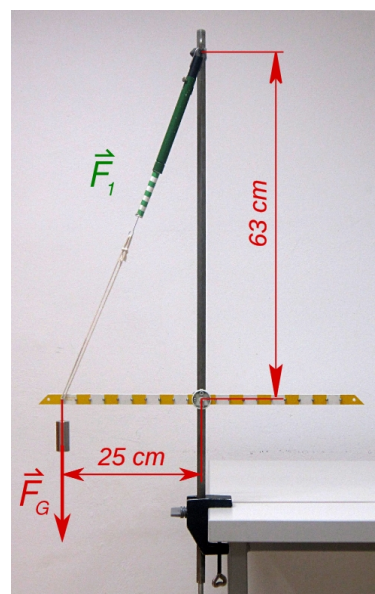


Fig. 14

2. La pezilo de Fig. 15 havas mason de 500 g kaj la angulo egalas al  $\alpha = 120^\circ$ . Determinu la fortojn en la du fortmezuriloj!
3. En la eksperimenta konstruaĵo de Fig. 14 la fortmezurilo montras  $F_1 = 2,1 \text{ N}$ . Determinu la mason de la pendigita pezilo!

**Solvoj**

1. La maso egalas al 250 g.
2. La fortoj en la du fortmezuriloj egalas al 4,9 N.
3. La maso egalas al 200 g.



## 1.2 Tordomomanto

### Eksperimento 2 - Tordomomanto

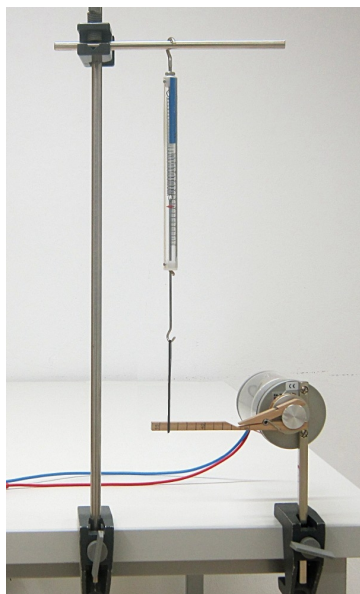


Fig. 17

La motoro de Fig. 16 turniĝas kaj ĝia ŝafto estas bremsata per la ligna pinĉilo. Por malebligi turnadon de la pinĉilo, oni haltigas ĝin per la forto  $F$ , kiu estas mezurata per fortmezurilo. La valoro de la forto  $F$  ŝanĝiĝas, depende de la distanco  $r$  inter la turniĝanta ŝafto kaj la alkrô-punkto de la forto mem.

Se oni atentis, ke la forto agas ĉiam ordo al la brako de la pinĉilo kaj la motoro turniĝas ĉiam en samaj kondiĉoj, oni eltrovas la valorojn de la sekva tabelo 1.

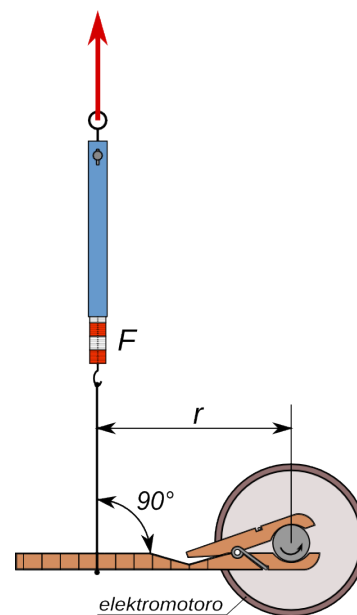


Fig. 16

$r$ [cm]	$F$ [N]	$F \cdot r$ [Ncm]
6,0	1,76	10,6
7,0	1,52	10,6
8,0	1,34	10,7
9,0	1,18	10,6
10,0	1,06	10,6
11,0	0,96	10,6
12,0	0,85	10,2
13,0	0,78	10,1
14,0	0,73	10,2
15,0	0,69	10,4

Tab. 1

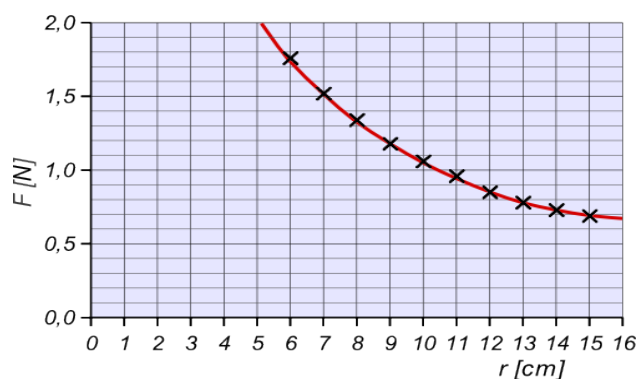


Fig. 18

El Tab. 1 rezultas, ke en ĉiu okazo la produkto de distanco kaj forto egalas al preskaŭ sama valoro. Do por la motoro turniĝanta en difinitaj kondiĉoj validas

$$F \cdot r = \text{konstanta}$$

La produkto  $F \cdot r$  nomiĝas **tordomomanto**  $M$ . Fakte la valoro eltrovita en eksp. 2 estas la tordomomanto de la motoro, en la kondiĉoj, en kiuj ĝi laboras dum la eksperimento.

Ĝenerale tordomomanto, rilate al iu punkto  $O$ , estas produkto de la forto  $F$  kaj de la distanco  $r$  inter la agorekto de la forto kaj la punkto  $O$  (vidu Fig. 19).

$$M = F \cdot r$$

$r$  nomiĝas levbrako de la forto  $F$  rilate al la rotacicentro  $O$ .

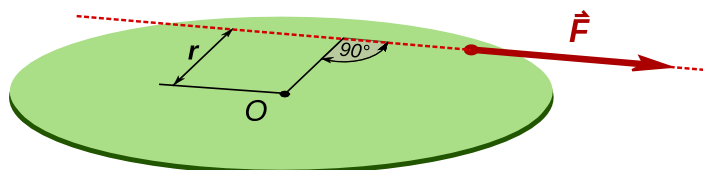


Fig. 19

**Ekzemplo 4 - Momantoboltilo (3)**

Kiom grandas la tordomomanto rezultanta el forto  $F = 250\text{ N}$  en la situacio de Fig. 20 ?

Solvo

Eblas solvi la problemon per diversaj metodoj.

a) El desegno en skalo Fig. 22 (4) troveblas la longo de levbrako egala al  $r = 31\text{ cm}$  →

$$M = F \cdot r = 250\text{ N} \cdot 0,31\text{ m} = 78\text{ Nm}$$

Skalo 1:10

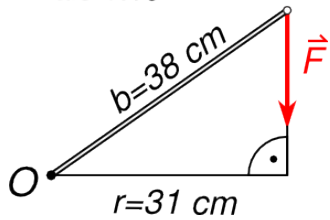


Fig. 22 Solvo a)

b) Oni povas malkomponi  $F$  en du komponantoj,  $F_1$  orta al momantoboltilo kaj  $F_2$  paralela al momantoboltilo (vidu Fig. 21).  $F_2$  ne estigas momanton, ĉar ĝia agorekto trapasas punkton  $O$ . Pro tio la momanto de  $F_1$  estas la tuta

momanto. El paralelogramo rezultas:  $F_1 = 205\text{ N}$  →  $M = F_1 \cdot b = 205\text{ N} \cdot 0,38\text{ m} = 78\text{ Nm}$

Kiel atendite, la rezulto estas sama kiel tiu de solvo a).

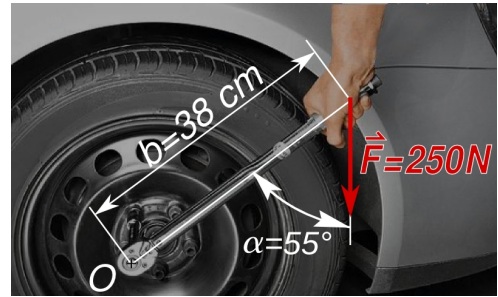
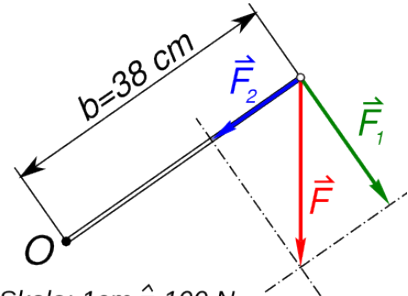


Fig. 20: Momantoboltilo



Skalo: 1cm ≙ 100 N

Fig. 21: Solvo b)

**1.2.1 Mekanika ekvilibro**

Fizika sistemo (punktmaso, aro da punktmasoj aŭ rigida korpo) troviĝas en **mekanika ekvilibro**, kiam la sumo de ĉiuj fortoj sur ĉiuj eroj de la sistemo estas nul, kaj ankaŭ la sumo de ĉiuj tordomomantoj sur ĉiuj eroj de la sistemo estas nul. En formuloj:

$$1. \sum \vec{F}_i = 0 \quad 2. \sum \vec{M}_i = 0$$

Rigida korpo en mekanika ekvilibro spertas nek linian, nek rotacian akcelon; tamen ĝi povas esti rekte movanta aŭ rotacianta kun konstanta rapido.

Kiel fortoj, ankaŭ momantoj estas vektoroj kaj havas ne nur grandon, sed ankaŭ direkton. La direkto de la momanto vektoro ortas sur la ebena, kiu enhavas la forton  $F$  kaj la levbrakon  $r$ . (vidu Fig. 23)

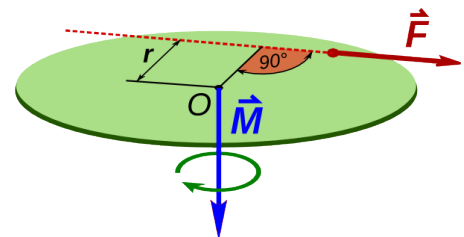


Fig. 23: Momanto tordanta dekstren

Por la problemoj pritraktataj en ĉi tiu libro sufiĉas distingi inter momantoj tordantaj dekstren kaj momantoj tordantaj maldekstren. Dekstren tordantaj kaj matematike negativaj estas tiuj, kiuj tordas en la direkto de horloĝmontrilo. Tiuj, kiuj tordas kontraŭ la direkto de horloĝmontrilo, estas maldekstren tordantaj kaj pozitivaj. (vidu Fig. 24). En mekanika ekvilibro la sumo de la momantoj dekstren tordantaj devas egali al la sumo de la momantoj tordantaj maldekstren .

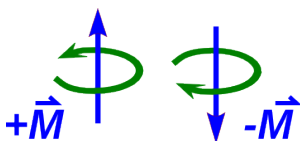


Fig. 24

$$\sum M_d = \sum M_m$$

3 Momantoboltiloj estas boltoturniloj, kiuj ebligas fiksturni boltojn je difinita regulebla tordomomanto.

4 Kompreneble, se oni konas trigonometrion, la longo de la levbrako estas ankaŭ kalkulebla per la formulo  $r = 38\text{ cm} \cdot \sin \alpha = 38\text{ cm} \cdot \sin 55^\circ = 31\text{ cm}$

## 1 Statika ekvilibro

### Ekzemplo 5 - Levilo 1

La peziloj de Fig. 27 havas mason de po 200 g.

Kiom devas grandi la fortoj aplikataj al fortmezurilo kaj al turnopunkto  $O$ , por ke la levilo estu en ekvilibro?

Solve

$$m = 200 \text{ g} \rightarrow F_G = m \cdot g = 1,96 \text{ N}$$

La distancoj estas la sekvaj:

$$a = 9 \cdot 2,5 \text{ cm} = 22,5 \text{ cm} \quad b = 6 \cdot 2,5 \text{ cm} = 15 \text{ cm}$$

$$c = 10 \cdot 2,5 \text{ cm} = 25 \text{ cm}$$

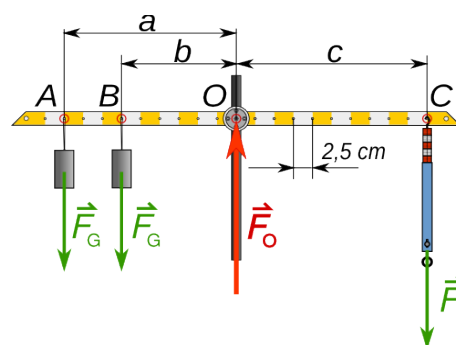


Fig. 25: Levilo en ekvilibro

Eblas solvi la problemon per diversaj metodoj konsiderante, ke estu:  $\sum \vec{F}_i = 0 \quad \sum \vec{M}_i = 0$

a) Ekvilibro rilate al punkto  $O$  <sup>(5)</sup>

$$\sum M_i = F_G \cdot a + F_G \cdot b - F \cdot c = 0 \quad \rightarrow \quad F = \frac{F_G \cdot (a+b)}{c} = \frac{1,96 \text{ N} \cdot 37,5 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 2,94 \text{ N}$$

$$\sum F_i = F_G + F_G - F_O + F = 0 \quad \rightarrow \quad F_O = F_G + F_G + F = 6,86 \text{ N}$$

b) Ekvilibro rilate al punkto  $C$

$$\sum M_i = F_G \cdot (a+c) + F_G \cdot (b+c) - F_O \cdot c = 0 \quad \rightarrow \quad F_O = \frac{F_G \cdot (a+b+2c)}{c} = 6,86 \text{ N}$$

$$\sum F_i = F_G + F_G - F_O + F = 0 \quad \rightarrow \quad F = F_O - 2 \cdot F_G = 6,86 \text{ N} - 3,92 \text{ N} = 2,94 \text{ N}$$

Kiel oni atendis, la rezultoj de la du metodoj estas egalaj.

### Ekzemplo 6 - Levilo 2

La pezilo de Fig. 26 havas mason egala al 200 g.

Kiom grandas la forto aplikata al fortmezurilo, kiu ekvilibrigas la levilon per ŝnuro?

Solve

$$m = 200 \text{ g} \rightarrow F_G = m \cdot g = 1,96 \text{ N}$$

El skala desegno aŭ kalkulo rezultas la longo de la levbrako  $r = 23 \text{ cm}$ .

Rilate al punkto  $O$  la forto  $F_G$  estigas maldekstren tordantan momenton  $M_m$ , kiun ekvilibrigas la dekstren tordanta momento  $M_d$  de la forto  $F_1$ .

Pro la ekvilibra kondiĉo devas esti  $M_d = M_m$

$$\rightarrow F_1 \cdot r = F_G \cdot 15 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad F_1 = \frac{F_G \cdot 15 \text{ cm}}{r} = \frac{1,96 \text{ N} \cdot 15 \text{ cm}}{23 \text{ cm}} = 1,3 \text{ N}$$

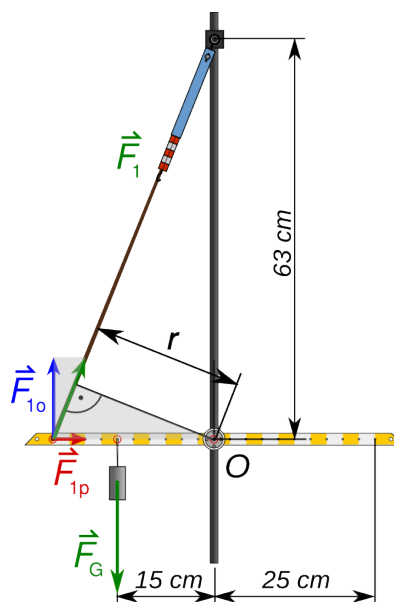


Fig. 26: Levilo en ekvilibro

Oni povas solvi la problemon ankaŭ, konsiderante la forton  $F_1$  malkomponita en komponanto orta al levilo  $F_{10}$  kaj en komponanto paralela al levilo  $F_{1P}$ .

Tiam la levbrako de la forto  $F_{10}$  tordanta dekstren, egalas al 25 cm. La forto  $F_{1P}$  ne estigas momenton, ĉar ĝia agorekto trapasas punkton  $O$ .

5 En ĉi tiuj kalkuloj la levilo mem, sen eksteraj fortoj, estas konsiderata en ekvilibro!

## 1 Statika ekvilibro

Pro ekvilibro validas  $F_{10} \cdot 25 \text{ cm} = F_G \cdot 15 \text{ cm} \rightarrow F_{10} = \frac{F_G \cdot 15 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 1,18 \text{ N}$

Pro la simileco de la grizaj trianguloj  $\frac{F_1}{F_{10}} = \frac{25 \text{ cm}}{r} \rightarrow F_1 = \frac{F_{10} \cdot 25 \text{ cm}}{23 \text{ cm}} = 1,3 \text{ N}$

Kiel oni atendis.

Kompreneble la lasta rezulto atingeblas ankaŭ per grafika metodo.

### Ekzemplo 7 - Stratlampo

La stratlampo de Fig. 27 havas mason de 13 kg. La longoj de la figuro estas  $a = 2,4 \text{ m}$ ,  $b = 1,4 \text{ m}$ .

Konsideru mekanikan ekvilibron de la lampo kaj de la stangoj 1 kaj 2.

Solve

$$m = 13 \text{ kg} \rightarrow F_G = m \cdot g = 128 \text{ N}$$

Per malkompono de la forto  $F_G$  laŭ la direktoj de la stangoj 1 kaj 2 oni eltrovas la fortojn  $F_1$  kaj  $F_2$ . Pro la simileco de trianguloj la fortoj estas senprobleme kalkuleblaj.

$$\frac{F_1}{a} = \frac{F_G}{b} \rightarrow F_1 = \frac{F_G \cdot a}{b} = \frac{128 \text{ N} \cdot 2,4 \text{ m}}{1,4 \text{ m}} = 219 \text{ N}$$

$$F_2 = \sqrt{F_G^2 + F_1^2} = 254 \text{ N}$$

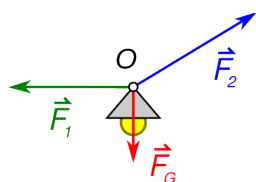


Fig. 29

a) ekvilibro de la lampo (Fig. 29)

La tri fortoj agas en la sama punkto O. Ili ne estigas momanton kaj ekvilibras.

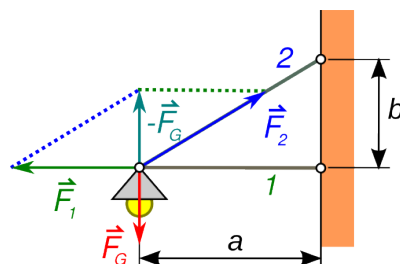


Fig. 27

b) ekvilibro de la stango 1 (Fig. 28)

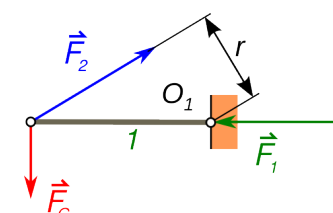


Fig. 28

Rilate al punkto  $O_1$  la forto  $F_G$  estigas maldekstren tordantan momanton kaj la forto  $F_2$  estigas dekstren tordantan momanton. El skala desegno aŭ kalkulo rezultas la longo de la levbrako  $r = 1,2 \text{ m}$

$$M_m = F_G \cdot a = 128 \text{ N} \cdot 2,4 \text{ m} = 307 \text{ Nm}$$

$$M_d = F_2 \cdot r = 254 \text{ N} \cdot 1,2 \text{ m} = 305 \text{ Nm}$$

Ene de la precizeco de la kalkuloj  $M_d = M_m$

c) ekvilibro de la stango 2 (Fig. 30)

Rilate al punkto  $O_2$  la forto  $F_G$  estigas maldekstren tordantan momanton kaj la forto  $F_1$  estigas dekstren tordantan momanton.

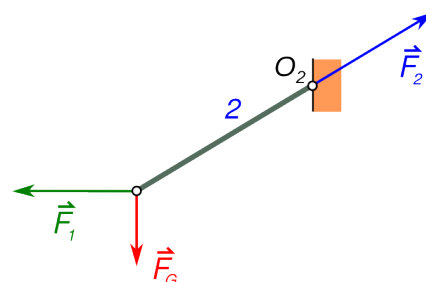


Fig. 30

$$M_d = F_G \cdot a = 128 \text{ N} \cdot 2,4 \text{ m} = 307 \text{ Nm} \quad M_m = F_1 \cdot b = 219 \text{ N} \cdot 1,4 \text{ m} = 307 \text{ Nm}$$

Ene de la precizeco de la kalkuloj  $M_d = M_m$

### 1.2.2 Masocentro

Kiam oni subtenas korpon en tri arbitraj punktoj, la subtenantaj fortoj ĉiam kapablas ekvilibrigi la pezoforton de la korpo. Se oni celas ekvilibrigi la pezoforton de la korpo per nur unu forto ŝi/li devas serĉi unikan punkton, la **masocentron**. Simpla eksperimento montrata en la sekvaj Fig. 31/Fig. 33 klarigas tion.



Fig. 32



Fig. 31

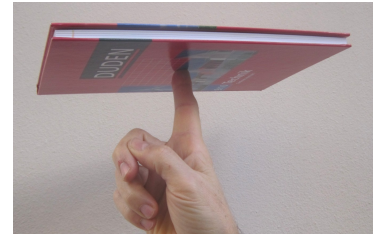


Fig. 33

Estas relative facile subteni la libron per tri fingroj, kaj ankaŭ kiam oni ŝanĝas la pozicion de la libro ĝi ekvilibras senprobleme. Subteni la libron per du fingroj estas iomete pli malfacila kaj eblas nur en difinitaj pozicioj. Fine troveblas nur unu punkto, en kiu eblas ekvilibrigi per unu fingro. En ĉi lasta okazo, la forto de la fingro, kiu ekvilibrigas la pezoforton trapasas la masocentron de la libro, kiu staras ĝuste super la fingro.

Rezultas, ke la **masocentro** de rigida korpo estas tiu punkto, en kiu la pezoforto agantaj sur ĉiuj eroj de la korpo estas ekvilibrigeblaj per nur unu forto, direktita supren. La grandeco de tiu forto egalas al la pezoforto aganta sur la tuta korpo. Oni diras ankaŭ, ke masocentro estas tiu punkto, en kiu agas la tuta pezoforto de ĉiuj eroj de la korpo.



Fig. 34: Ekvilibro sur la pinto de skribilo

Alia eksperimento, kiu bone klarigas la koncepton estas montrata en Fig. 34. La tuta korpo kunmetita el du forkoj, ŝtopilo kaj dentpinglo havas sian masocentron ĝuste ĉe la pinto de la globkrajono. Pro tio la forto aplikata per la pinto ekvilibrigas ĝin.

En homogenaj korpoj (ĉie faritaj el sama materialo), simetriaj aksoj trapasas masocentron kaj pro tio, se homogena korpo havas plurajn simetriajn aksojn, ili kruciĝas en masocentro.

#### Ekzemplo 8 - Masocentro 1

La tuta maso de la ludaŭto de Fig. 35 egalas al 140 g. Mezurante la forton, kiu agas sur la antaŭajn radojn oni trovas  $F_A=0,62\text{ N}$ . La distanco inter la radaksoj egalas al  $l = 8,5\text{ cm}$ .

Eltrovu la distancon  $a$ , je kiu troviĝas la masocentro.

Solvo

$$m = 140\text{ kg} \rightarrow F_G = m \cdot g = 1,37\text{ N}$$

La pezoforto agas en la masocentro. Pro la ekvilibro de momantoj rilate al punkto B (malantaŭa radakso) rezultas:

$$F_A \cdot l = F_G \cdot b \rightarrow b = \frac{F_A \cdot l}{F_G} = 3,8\text{ cm} \rightarrow a = l - b = 4,7\text{ cm}$$

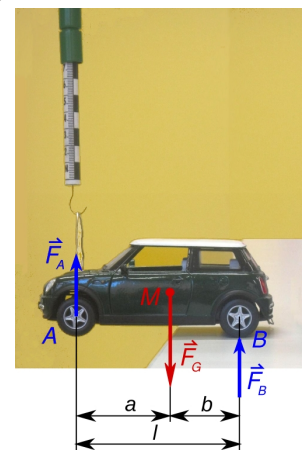


Fig. 35

**Eksperto 3 - Balailo en ekvilibro**

Apogita sur du fingroj, eblas ekvilibri senprobleme la balailon, se ĝia masocentro troviĝas inter la du fingroj. (vidu Fig. 36 a)

Kiam oni proksimigas la fingrojn, ili moviĝas alterne relative al bastono kaj fine renkontiĝas, ĝuste kiam la masocentro de la tuta balailo troviĝas meze de la kuntuŝiĝantaj fingroj. La kialo estas facile komprenebla.

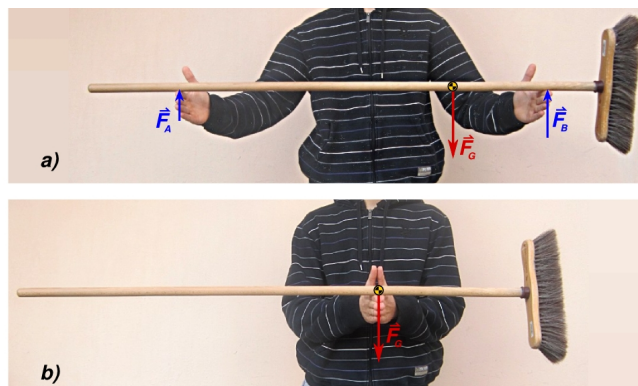


Fig. 36 Balailo en ekvilibro

Por movi la fingrojn relative al la bastono, necesas superi frotforton inter bastono kaj fingro. Tiu frotforto estas ju pli granda, des pli granda estas la apogforto de la balailo sur la fingro mem. La apogforto estas ju pli granda, des pli proksima al masocentro la fingro troviĝas. Pro tio moviĝas ĉiam la fingro, kiu troviĝas pli malproksime de la masocentro kaj ĝi proksimiĝas, ĝis ĝi troviĝas pli proksime al masocentro ol la alia fingro. Fine la fingroj kuntuŝiĝas ĉe la masocentro.

**Ekzemplo 9 - Martelo**

La tuta maso de la martelo de Fig. 37 egalas al 740 g. La mezuroj indikitaj en la figuro egalas al  $a = 29,8 \text{ cm}$  kaj  $b = 2,8 \text{ cm}$ . Eksperimente eblas eltrovi la distancon de la masocentro rilate al punkto  $O$  egala al  $c = 3,8 \text{ cm}$ .

Kiom grandas respektive la maso de la martelkapo kaj de la tenilo?

**Solvo**

maso de tuta martelo  $m = 740 \text{ g}$

La tuta pezoforto  $F_G$  aganta en la masocentro, devas egali la efikon de la pezofortoj de la martelkapo kaj de la tenilo, agantaj en respektiva masocentro.

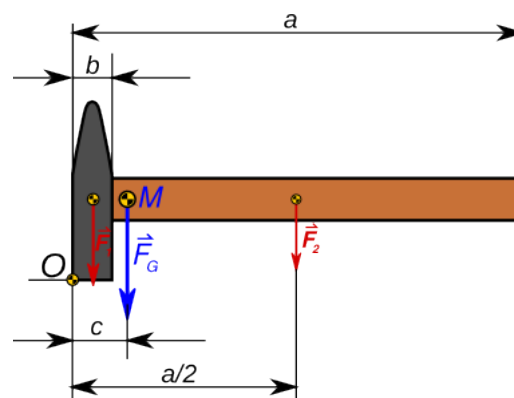


Fig. 37

Rilate al punkto  $O$  pro la egaleco de momantoj rezultas:

$$F_1 \cdot \frac{b}{2} + F_2 \cdot \frac{a}{2} = F_G \cdot c \quad \rightarrow \quad F_1 \cdot \frac{b}{2} + (F_G - F_1) \cdot \frac{a}{2} = F_G \cdot c \quad \rightarrow \quad F_1 \cdot \frac{b}{2} - F_1 \cdot \frac{a}{2} = F_G \cdot (c - \frac{a}{2})$$

$$F_1 = \frac{2 \cdot F_G \cdot (c - \frac{a}{2})}{b - a} = \frac{2 \cdot F_G \cdot (3,8 \text{ cm} - \frac{29,8 \text{ cm}}{2})}{2,8 \text{ cm} - 29,8 \text{ cm}} = 0,82 \cdot F_G$$

$$F_G = m \cdot g \quad F_1 = m_1 \cdot g \quad \rightarrow \quad m_1 = 0,82 \cdot m = 608 \text{ g} \quad m_2 = m - m_1 = 132 \text{ g}$$

**Respondo**

La maso de la martelkapo egalas al 608 g kaj la maso de la tenilo egalas al 132 g.

**Ekzemplo 10 - Bloketoj**

La korpo de Fig. 38 estas farita el kvin *LEGO*-bloketoj. La maso de ĉiu bloketo egalas al  $m_m$  kaj la longo egalas al  $a = 3,2 \text{ cm}$ .

Kalkulu la distancon  $x$ , ĉe kiu troviĝas la masocentro de la tuta korpo?

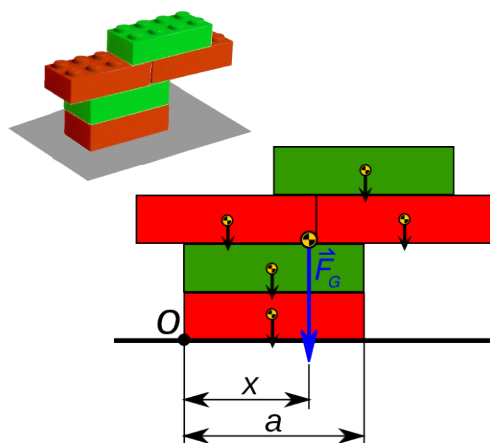


Fig. 38

**Solvo**

Rilate al punkto  $O$  rezultas:  $F_G \cdot x = \sum F_n \cdot x_n$

$$F_G = 5 \cdot F_n = 5 \cdot m_n \cdot g \rightarrow 5 \cdot m_n \cdot x = \sum m_n \cdot x_n$$

$$\rightarrow 5 \cdot m_n \cdot x = 2 \cdot m_n \cdot \frac{a}{2} + m_n \cdot \frac{a}{4} + m_n \cdot \frac{5a}{4} + m_n \cdot a$$

$$\rightarrow 5 \cdot x = \frac{14a}{4} \rightarrow x = 0,7 \cdot a = 2,24 \text{ cm}$$

**1.2.3 Specoj de ekvilibro**

La korpoj de Fig. 39 ekvilibras ĉar la agorekto de la subtenanta forto trapasas la masocentron  $M$ . Sed la speco de ekvilibro en la tri situacioj estas tute alia.

Maldekstre, la korpo troviĝas en **stabila ekvilibro**. Post malgranda perturbo la pezoforto mem agas tiamaniere, ke la korpo reiras al la ekvilibra pozicio.

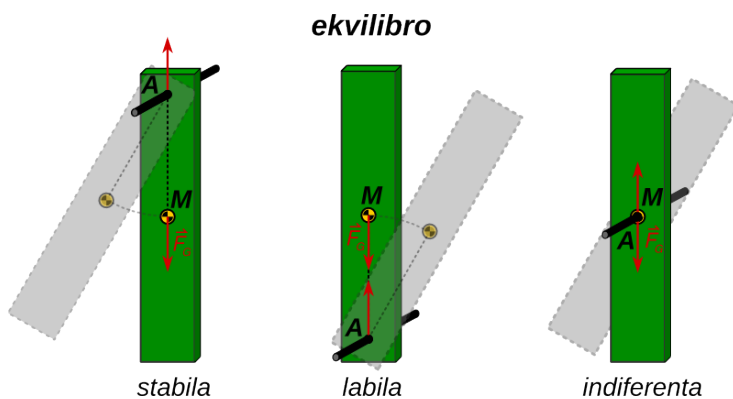


Fig. 39: Specoj de ekvilibro

Meze, la korpo troviĝas en **malstabila ekvilibro**. Post malgranda perturbo la pezoforto agas tiamaniere, ke la korpo tute foriras de la ekvilibra pozicio.

Dekstre, la korpo troviĝas en **indiferenta ekvilibro**. Post malgranda perturbo ĝi troviĝas en nova ekvilibra pozicio.

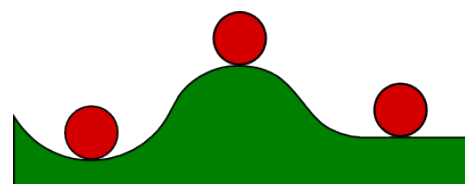
Ankaŭ Fig. 40 montras korpojn en stabila, malstabila kaj indiferenta ekvilibro.

Eblas klarigi la specon de ekvilibro ankaŭ helpe de la potenciala energio de korpoj.

En pozicio a) potenciala energio de la korpo estas minimuma. Por igi ĝin forlasi la pozicion necesas alporti energion.

En pozicio b) potenciala energio de la korpo estas maksimuma. Kiam la korpo forlasas la ekvilibrantan pozicion, necesas alporti energion por ke ĝi ekvilibru denove.

En pozicio c) en la ĉirkaŭaĵo de korpo la potenciala energio ne ŝanĝiĝas. Pro tio la ankaŭ la ĉirkaŭantaj pozicioj estas ekvilibrantaj.



a) stabila b) labila c) indiferenta  
Fig. 40

### 1.2.4 Stabileco – sekureco rilate al renversiĝo

Kompreneble necesas, ke konstruaĵoj kaj maŝinoj ĉiam troviĝu en stabila ekvilibro.

Por eviti renversiĝon, la stabiliganta momanto  $M_S$  rilate al iu renverspunkto  $O$ , devas esti pli granda ol la renversanta momanto  $M_R$ .

$$M_S > M_R$$

La **koeficiento de sekureco** rilate al renversiĝo egalas al kvociento de la stabiliganta momanto per la renversanta momanto.

$$s_R = \frac{M_S}{M_R} \rightarrow M_S = s_R \cdot M_R$$

Kutime la koeficiento de sekureco devas egali almenaŭ al

$$s_R = 1,5$$

#### Ekzemplo 11 - Ventgeneratoro

Por malgranda ventgeneratoro (vidu Fig. 41) oni kalkulas, ke la ventforto  $F_V$  egalas maksimume al 3400 N. La tuta maso de la generatoro kun masto egalas al 620 kg kaj la maso de la betona fundamento egalas al 9500 kg. La mezuroj indikitaj en la figuro estas:

$$h = 12 \text{ m} \quad a = 2,2 \text{ m} \quad b = 1,2 \text{ m}$$

Kiom grandas la koeficiento de sekureco de la konstruaĵo rilate al renversiĝo?

Solve

ventforto  $F_V = 3400 \text{ N}$

maso de generatoro kun masto  $m_G = 620 \text{ kg} \rightarrow F_G = m_G \cdot g = 620 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 6080 \text{ N}$

maso de fundamento  $m_F = 9500 \text{ kg} \rightarrow F_F = m_F \cdot g = 9500 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 93100 \text{ N}$

stabiliganta momanto rilate al  $O$   $M_S = (F_G + F_F) \cdot \frac{a}{2} = (6,1 \text{ kN} + 93,1 \text{ kN}) \cdot 1,1 \text{ m} = 109 \text{ kNm}$

renversanta momanto rilate al  $O$   $M_R = (F_V) \cdot h + b = 3,4 \text{ kN} \cdot 13,2 \text{ m} = 44,9 \text{ kNm}$

koeficiento de sekureco rilate al renversiĝo  $s_R = \frac{M_S}{M_R} = 109 \frac{\text{kNm}}{44,8 \text{ kNm}} = 2,4 > 1,5$

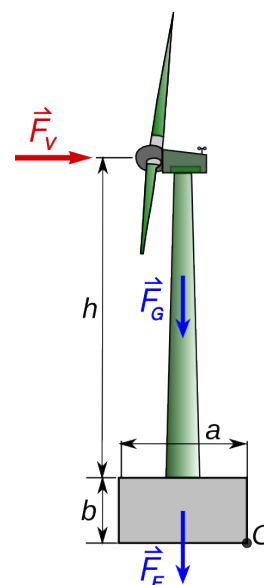


Fig. 41 Ventgeneratoro

Kiam sur korpon agas nur fortoj kaj ne agas momantoj, tiam la korpo ekvilibras, se la agorekto de la rezultanto de la agantaj fortoj staras inter la eblaj renversaksoj de la korpo. En Fig. 42 la korpo estas stabila ĉar la agorekto de la rezultanto  $F_R$  pasas inter la punktoj  $O_1$  kaj  $O_2$ . Ĝi estus stabila ankaŭ se agus nur la gravita forto  $F_G$ . En la pozicio 3 de Fig. 43 la korpo troviĝas en malstabila ekvilibro, ĉar la masocentro staras ĝuste super la renversakso  $O_2$ .

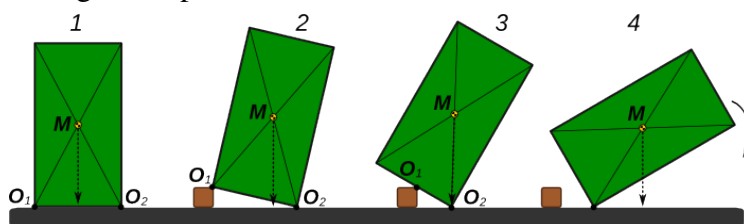


Fig. 43

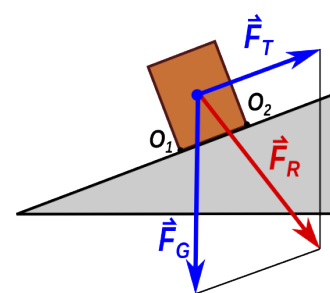


Fig. 42



### 1.2.5 Ekzemploj

#### Ekzemplo 12 - Levĉaro 1

La levĉaro de Fig. 44 havas tutan mason de 2800 kg . La maso de la levita kesto egalas al 900 kg. La horizontala distanco inter masocentro kaj antaŭa radakso egalas al  $c=1,0\text{ m}$ . La aliaj mezuroj indikitaj en la figuro estas la sekvaj:

$$a = 1,5 \quad b = 0,8\text{ m}$$

a) Kiom grandas la forto aganta sur la antaŭa respektive la malantaŭa radakso.

b) Kiom grandas la koeficiento de sekureco rilate al la antaŭa radakso.

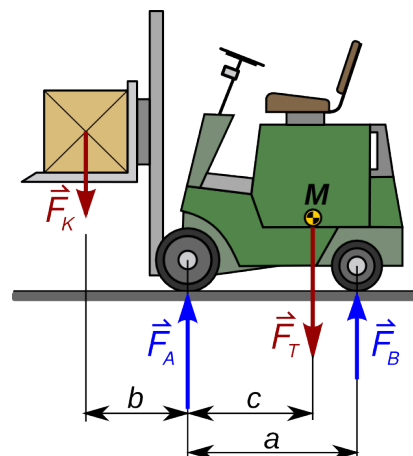


Fig. 44: Levĉaro

Solve

$$\text{tuta maso de la levĉaro} \quad m_T = 2800\text{ kg} \rightarrow F_T = m_T \cdot g = 2800\text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 27,4\text{ kN}$$

$$\text{tuta maso de la kesto} \quad m_K = 900\text{ kg} \rightarrow F_K = m_K \cdot g = 900\text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 8,82\text{ kN}$$

a) Rilate al la malantaŭa radakso rezultas pro ekvilibro de momantoj:

$$F_A \cdot a = F_K \cdot (a+b) + F_T \cdot (a-c) \rightarrow$$

$$\rightarrow F_A = \frac{F_K \cdot (a+b) + F_T \cdot (a-c)}{a} = \frac{8,82\text{ kN} \cdot 2,3\text{ m} + 27,4\text{ kN} \cdot 0,5\text{ m}}{1,5\text{ m}} = 22,7\text{ kN}$$

pro la ekvilibro de fortoj rezultas:

$$F_A + F_B = F_K + F_T \rightarrow F_B = F_K + F_T - F_A = 8,8\text{ kN} + 27,4\text{ kN} - 22,7\text{ kN} = 13,5\text{ kN}$$

b) Rilate al la antaŭa radakso rezultas:

$$\text{stabiliganta momanto} \quad M_S = F_T \cdot c = 27,4\text{ kN} \cdot 1,0\text{ m} = 27,4\text{ kNm}$$

$$\text{renversanta momanto} \quad M_R = F_K \cdot b = 8,82\text{ kN} \cdot 0,8\text{ m} = 7,1\text{ kNm}$$

$$\text{koeficiento de sekureco rilate al renversiĝo} \quad s_R = \frac{M_S}{M_R} = \frac{27,4\text{ kNm}}{7,1\text{ kNm}} = 3,9$$

#### Ekzemplo 13 - Levĉaro 2

La levĉaro de Fig. 44 havas tutan mason de 2800 kg kaj mezuroj kiel en la antaŭa ekzemplo.

Kiom povas grandi la maso de la levita kesto, se la sekureco rilate al renversiĝo devas egali almenaŭ al  $s_R = 2$ .

Solve

a) Rilate al la antaŭa radakso rezultas:

$$\text{stabiliganta momanto} \quad M_S = F_T \cdot c = 27,4\text{ kN} \cdot 1,0\text{ m} = 27,4\text{ kNm}$$

$$\text{renversanta momanto} \quad M_R = F_K \cdot b = \frac{M_S}{s_R} \rightarrow F_K = \frac{M_S}{b \cdot s_R} = \frac{27,4\text{ kNm}}{0,8\text{ m} \cdot 2} = 17,1\text{ kN}$$

$$\text{maksimuma maso de la kesto} \quad m_k = \frac{F_k}{g} = \frac{17100\text{ N}}{9,8\text{ N/kg}} = 1750\text{ kg}$$

### 1.2.6 Solvendaj problemoj

1. La kapo de martelo en Fig. 45 havas mason de 900 g.

Kiom povas grandi maksimume la maso de la tenilo, por ke la martelo estu en stabila ekvilibro en la desegnita pozicio?

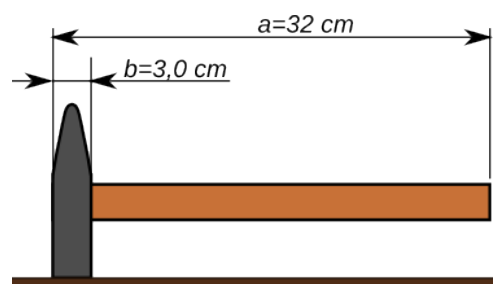


Fig. 45: Martelo sur la tablo

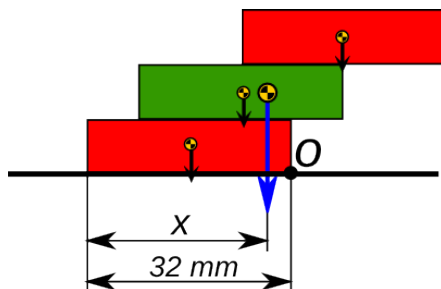


Fig. 46

2. La korpo de Fig. 46 farita el tri LEGO-bloketoj estas en ekvilibro ĉar ĝia masocentro troviĝas maldekstren de la renverspunkto O.

Kalkulu la distancon x, ĉe kiu troviĝas la masocentro de la tuta korpo ?



Fig. 47

3. Kial la liniilo en Fig. 47 ekvilibras sur la rando de la tablo, kiam oni pendigas martelon sur ĝi?

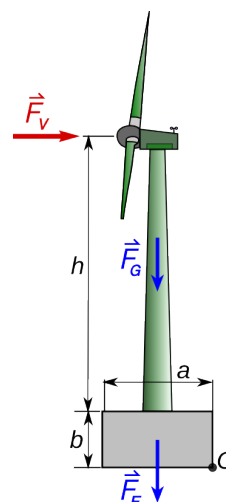


Fig. 48

4. Por malgranda ventgeneratoro (vidu Fig. 48) oni kalkulas, ke la ventforto egalas maksimume al 4000 N. La tuta maso de la generatoro kun masto egalas al 620 kg. La mezuroj indikitaj en la figuro estas:

$$h = 12 \text{ m} \quad a = 2,2 \text{ m} \quad b = 1,2 \text{ m}$$

Kiom devas grandi la maso de la betonfundamento, por ke la koeficiento de sekureco de la konstruaĵo rilate al renversiĝo estu almenaŭ egala al 1,5?

### Respondoj

1. La maksimuma maso de la tenilo egalas al 103 g.
2. La distanco x egalas al 26,7 mm.
3. La tuta korpo kunmetita el martelo, liniilo kaj kaŭĉukbendo troviĝas en ekvilibro en la situacio de Fig. 47, ĉar ĝia komuna masocentro troviĝas ĝuste sub la rando de la tablo.
4. La maso de betonfundamento devas egali minimume al 6720 kg.

## 2 Movu kaj forto

### 2.1 Ĝeneralaĵoj pri movo

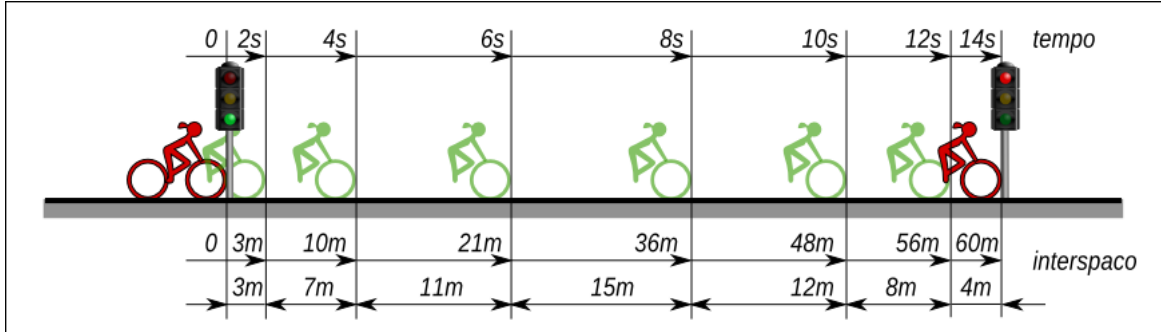


Fig. 49

#### 2.1.1 Rapido kaj akcelo

En Fig. 49 estas montrata biciklistino, kiu ekveturas, kiam la trafiklumo komutiĝas al verda, kaj haltas ĉe la ruĝa trafiklumo. La spaco, transveturita post po du sekundoj, estas mezurata. La Tab. 2 resumas rilatajn valorojn kaj la Fig. 50 montras rilatan t-s diagramon.

Kun la valoroj de la Tab. 2 eblas kalkuli la valorojn de la Tab. 3

MP	t [s]	s [m]	MP	$\Delta s$ [m]	v [m/s]
1	2,0	3	0 – 1	3,0	1,5
2	4,0	10	1 – 2	7,0	3,5
3	6,0	21	2 – 3	11,0	5,5
4	8,0	36	3 – 4	15,0	7,5
5	10,0	48	4 – 5	12,0	6,0
6	12,0	56	5 – 6	8,0	4,0
7	14,0	60	6 – 7	4,0	2,0

Tab. 2

Tab. 3

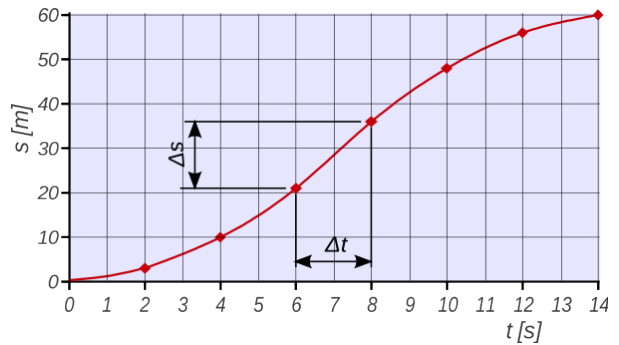


Fig. 50: Diagramo tempo-distanco (t-s)

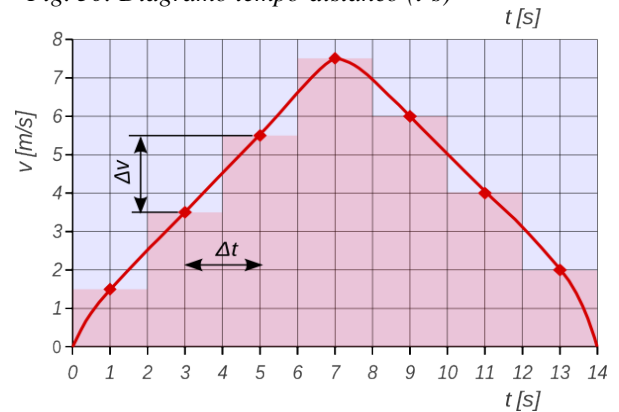


Fig. 51: Diagramo tempo-rapido (t-v)

Por eltrovi mezan rapidon dum ĉiu intervalo  $\Delta t = 2 \text{ s}$  estas uzata la formulo  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Rezultas la t-v diagramo de Fig. 51. Oni vidas, ke la rapido de la biciklistino unue pligrandiĝas, ŝi akcelas. Poste la rapido malgrandiĝas, ŝi malakcelas.

Ĝenerale **akcelo** okazas ĉiam, kiam la vektora rapido ŝanĝiĝas. Ĝi estas kalkulebla per

la formulo:  $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$  <sup>(6)</sup>

kie  $\Delta \vec{v}$  estas la diferenco inter fina kaj komenca rapido en tiu intervalo  $\Delta \vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_0$

6 Ĉi tie estas uzata la notacio  $\vec{v}$  kaj  $\vec{a}$  por emfazi, ke kaj rapido, kaj akcelo estas vektoroj. Ili havas ne nur grandon sed ankaŭ direkton. Plej ofte en la sekvontaj paĝoj, tio ne gravas, kaj pro tio la notacio ne estos uzata. En la ĉapitro pri rotacia movo, kie la vektora kvalito gravas, la notacio estos denove uzata.

## 2 Movo kaj forto

La mezurunuo de akcelo rezultas  $[a] = \frac{[v]}{[t]} = \frac{m/s}{s} = \frac{m}{s^2}$

Por la biciklistino de Fig. 49 dum la unuaj sep sekundoj la rapido pligrandiĝas je  $7 m/s$  kaj dum la lastaj sep sekundoj ĝi malgrandiĝas je la sama valoro.

Ju pli grandas la akcelo, des pli kruta estas la kurbo en t-v diagramo.

Por la biciklistino de Fig. 49 la plej granda ŝanĝiĝo de rapido okazas dum la lasta sekundo, kiam ĝi estas  $\Delta v = v_f - v_0 = 0 m/s - 2 m/s = -2 m/s$

La rilata akcelo estas  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{-2 m/s}{1 s} = -2 \frac{m}{s^2}$  negativa, ĉar la rapido malpliĝas.

La plej granda pozitiva akcelo okazas dum la unua sekundo, kiam la ŝanĝiĝo de rapido estas  $\Delta v = v_f - v_0 = 1,5 m/s - 0 m/s = 1,5 m/s$  kaj la akcelo  $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = 1,5 \frac{m}{s^2}$

### Ekzemplo 14 - Akcelo de aŭtomobiloj

En aŭtoĵurnaloj troveblas la valoroj pri la tempo bezonata de aŭtomobiloj, por atingi difinitajn rapidojn. Ekzemple, por la aŭtomobiloj Fiat 500L kaj VW Golf 2.0 TDI, la valoroj estas tiuj de Tab. 4. El la valoroj de la tabeloj eblas desegni la diagramon de Fig. 52



	Fiat 500L	VW Golf
v [km/h]	t [s]	t [s]
50	4,9	3,6
80	10,2	6,2
100	15,2	8,6
120	22,4	11,1
130	28,6	12,8

Tab. 4

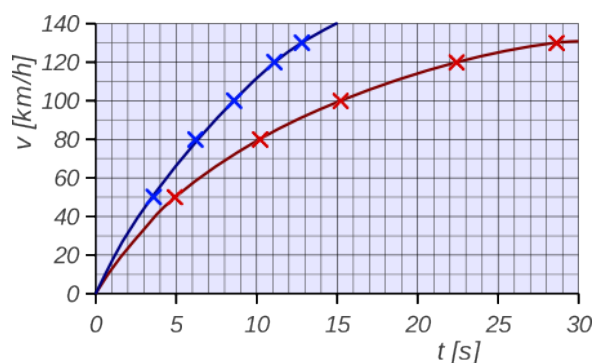


Fig. 52

Kiom grandas la akcelo de la du veturiloj

a) en la unuaj du sekundoj      b) por la akcelado inter  $120 km/h$  kaj  $130 km/h$

**Solvo**

a) El diagramo de Fig. 52 rezultas, ke post du sekundoj la veturiloj atingas rapidon de  $24 km/h$  respektive  $34 km/h$ . El tio kalkuleblas la sekvantaj akceloj:

$$\text{Fiat 500L } v_f = 24 \frac{km}{h} = 6,7 \frac{m}{s} \rightarrow \Delta v = 6,7 \frac{m}{s} - 0 = 6,7 \frac{m}{s} \quad a_0 = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{6,7 m/s}{2 s} = 3,3 \frac{m}{s^2}$$

$$\text{VW Golf } v_f = 34 \frac{km}{h} = 9,4 \frac{m}{s} \rightarrow \Delta v = 9,4 \frac{m}{s} - 0 = 9,4 \frac{m}{s} \quad a_0 = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{9,4 m/s}{2 s} = 4,7 \frac{m}{s^2}$$

b) La ŝanĝiĝo de rapido por ambaŭ veturiloj egalas al  $\Delta \vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_0 = 10 km/h = 2,78 m/s$ . La rilataj tempoj rezultas el Tab. 4

$$\text{Fiat 500L } \Delta t = 28,6 s - 22,4 s = 6,2 s \rightarrow a_{120} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2,78 m/s}{6,2 s} = 0,45 \frac{m}{s^2}$$

$$\text{VW Golf } \Delta t = 12,8 s - 11,1 s = 1,7 s \rightarrow a_{120} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2,78 m/s}{1,7 s} = 1,6 \frac{m}{s^2}$$

### 2.1.2 Movo kun konstanta akcelo

El la supraj t-v diagramoj rezultas, ke ju pli kruta estas la kurbo en t-v diagramo, des pli granda estas la akcelo. Se la movo okazas kun konstanta akcelo, ĝia prezentaĵo en t-v diagramo estas rekto.

#### Ekzemplo 15 - Ekveturado kun konstanta akcelo

Veturilo ekveturas kun konstanta akcelo de  $1,5 \text{ m/s}^2$ .

- Kalkulu la rapidon atingitan post  $6 \text{ s}$ .
- Desegnu la t-v diagramon por  $6 \text{ s}$ !
- Kalkulu la distancon trairita post  $6 \text{ s}$ !

Solvo  $a = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad \Delta t = 6 \text{ s}$

a)  $\Delta v = a \cdot \Delta t = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 6 \text{ s} = 9,0 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow$

$v_f = v_0 + \Delta v = 9,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ĉar la komenca rapido estas nul.

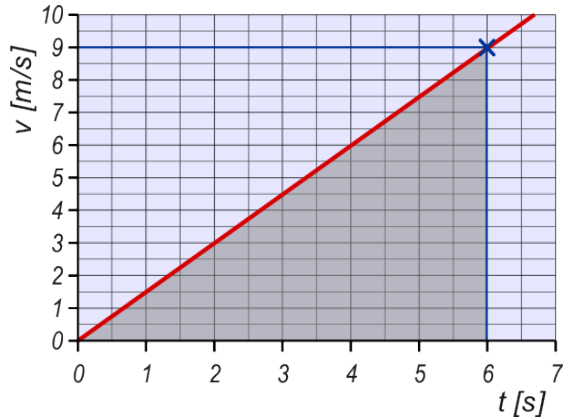


Fig. 53: t-v diagramo de konstanta akcelado

b) Rezultas la t-v diagramo de Fig. 53

c) Por kalkuli la distancon estas uzebla la konata formulo  $s = \bar{v} \cdot t$ , kie  $\bar{v}$  estas la meza rapido dum la tempo t. Ĉar la akcelo estas konstanta, la rapido kreskas proporcie kun la tempo.

La meza rapido estas kalkulebla per la formulo  $\bar{v} = \frac{v_0 + v_f}{2} = \frac{v_f}{2} = 4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Sekvas:  $s = 4,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6 \text{ s} = 27 \text{ m}$

Oni vidas, ke en t-v diagramo, la distanco trairita estas prezentebla per la areo sub la linio, kiu prezentas la movon. Por ekveturado kun konstanta akcelo la areo estas triangula (griza triangulo en Fig. 53).

La rezultoj de ekzemplo 15 estas ĝenerale validaj. Por konstanta akcelado ekde halto, oni akiras la sekvajn formulojn por la fina rapido, la meza rapido kaj por la trairita distanco post la tempo t.

fina rapido  $v_f = a \cdot t$       meza rapido  $\bar{v} = \frac{v_f}{2} = \frac{a \cdot t}{2}$

trairita distanco  $s = \bar{v} \cdot t = \frac{a \cdot t^2}{2}$

La lasta formulo montras, ke la t-s diagramo de la konsiderata movo estas parabolo. Por la movo de ekzemplo 15 tio estas montrata en Fig. 54.

En diagramo de Fig. 54. videblas, ke kiam la tempo duobliĝas la trairita distanco kvarobliĝas.

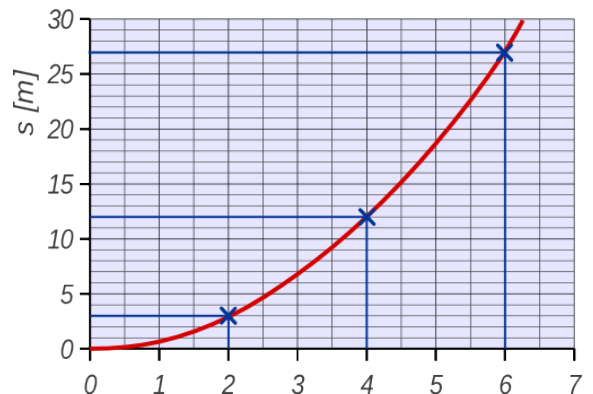


Fig. 54: t-s diagramo de konstanta akcelado

## 2.2 Forto kaj akcelo

En la unua volumo estis enkondukita la forto kiel kaŭzo de akcelo. Simpla eksperimento de Fig. 55 sen mezurado, kvalite montras:

- Ju pli granda estas la akcelanta forto (t.e. la pezoforto aganta sur la pezilo), des pli grandas la akcelo.
- Ju pli granda estas la maso, kiu devas esti akcelata, des pli malgrandas la akcelo.

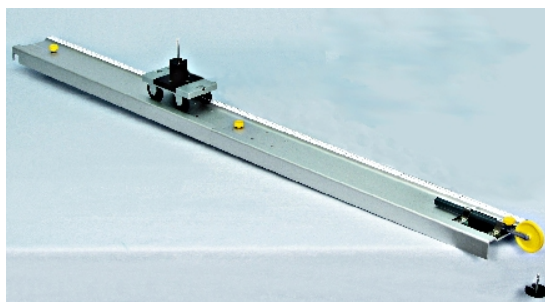


Fig. 55: Pezilo akcelas eksperimentan veturileton

Matematike oni skribas tion jene:  $a \sim \frac{F}{m} \rightarrow F \sim m \cdot a \rightarrow F = konst \cdot m \cdot a$

### 2.2.1 Leĝa difino de la unuo 1 N – baza ekvacio de mekaniko

En la unua volumo estis donita statika difino de la fortunuo neŭtono.

Laŭleĝe la neŭtono estas difinita baze de la akcelanta efiko de fortoj.

***Unu neŭtono (1 N) estas la forto necesa por akceli mason de unu kilogramo je unu metro kvadratsekunde (1 m/s<sup>2</sup>)***

El tiu difino rezultas, ke la konstanto en la supra formulo estas unu. Sekvas la tiel nomata ***baza ekvacio de mekaniko***

$$F = m \cdot a \rightarrow 1 N = 1 \text{kg} \cdot 1 \frac{m}{s^2}$$

#### Ekzemplo 16 -Avio

Maksimume la ekflugmaso de la avio Airbus 330 povas egali al 238 tunojn. Ĝiaj du motoroj havas puŝforton de po 300 kN.

- Kiom grandas la akcelo dum ekflugo?
- Ĉu kurejo, kiu longas 1500 m sufiĉas por atingi la minimume necesan rapidon de 270 km/h por ekflugi?



Fig. 56: Avio Airbus 330

Solvo

$$m = 238000 \text{ kg} \quad F = 2 \cdot 300 \text{ kN} = 600 \text{ kN} \quad s = 1500 \text{ m}$$

$$\text{a) } a = \frac{F}{m} = \frac{600 \cdot 10^3 \text{ N}}{238 \cdot 10^3 \text{ kg}} = 2,52 \frac{m}{s^2}$$

$$\text{b) } s = \frac{a \cdot t^2}{2} \rightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1500 \text{ m}}{2,52 \text{ m/s}^2}} = 34,5 \text{ s} \rightarrow v = a \cdot t = 87 \frac{m}{s} = 313 \frac{km}{h}$$

**Respondo:** La maksimuma akcelo dum ekflugo egalas al 2,52 m/s<sup>2</sup>. Se ĉio perfekte funkcias, la avio atingas la minimuman rapidon por ekflugi sed la sekureco estas tre malgranda. Pro tio grandaj avioj, kiel "Airbus 330", ekflugas nur de flughavenoj, kiuj havas kurejon longan minimume 3000 m.

## 2 Movo kaj forto

### 2.2.2 Libera falo

Libera falo estas la movo, kiu estiĝas, kiam sur korpo agas nur la gravita forto (aŭ pezoforto)  $F_G$ . Se la faldistanco ne estas tro granda, la forto povas esti konsiderata konstanta kaj pro tio la estigata movo estas konstante akcelata.

La rezultanta akcelo estas 
$$a = \frac{F}{m} = \frac{F_G}{m} = \frac{m \cdot g}{m} = g$$

La valoro de la akcelo de libere falantaj korpoj estas egala al valoro de la lokofaktoro  $g$  (vidu volumon 1 par. 2.2.2). Sur la Tero ĝia meza valoro estas  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Por libere falantaj korpoj la validantaj formuloj estas resumataj ĉisekve.

fina rapido post tempo  $t$ :  $v_f = g \cdot t$       faldistanco post tempo  $t$ :  $h = \frac{g \cdot t^2}{2}$

#### Ekzemplo 17 - Libera falo 1

La Fig. 57 montras libere falantan pilkon. La tempointervalo inter du sekvantaj prezentitaj pozicioj egalas al 0,05 s.

- Kiom grandas la tuta faldistanco post 0,5 s kaj la tiam atingita rapido ?
- Post kiom da tempo la faldistanco egalas al 0,5 m, kiom grandas tiam la rapido?

Solvo

$$\text{a) } h = \frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,5 \text{ s})^2}{2} = 1,2 \text{ m} \quad v = g \cdot t = 4,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{b) } t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,5 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 0,32 \text{ s} \quad \rightarrow \quad v = g \cdot t = 3,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 11,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

**Respondo:** a) Post libera falo de 0,5 sekundoj, la distanco trairita egalas al 1,2 m kaj la rapido atingita egalas al 4,9 m/s.

b) Por trairi distancon de 0,5 m necesas 0,32 s kaj la tiam atingita rapido egalas al 3,1 m/s.

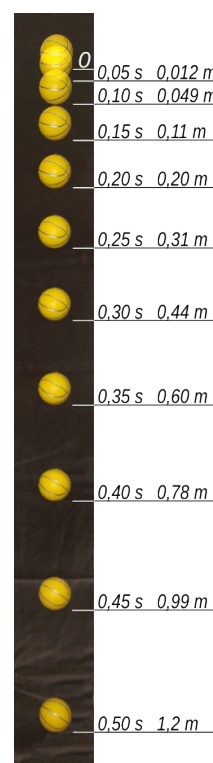


Fig. 57

La lastaj formuloj de ekzemplo 17 taŭgas por kalkuli la rapidon de libere falanta korpo post falo tra konata distanco  $h$ .

La tempo necesa estas  $t = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}$       Por la rapido sekvas  $v = g \cdot t = g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$

#### Ekzemplo 18 - Libera falo 2

Kiom grandas la rapido de korpo, libere falanta ene de gravita kampo de la Tero, post faldistanco de 1000 m?

Solvo

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1000 \text{ m}} = 140 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 504 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

### 2.2.3 Falo en aero – paraŝutado

Ekzemplo 18 montras, ke post 1000 metroj da libera falo, korpo atingas rapidon de 504 km/h. Sed ene de la tera atmosfero, tute libera falo ne eblas.

Dum falo en aero, kiam la rapido plialtiĝas, ankaŭ la rezisteco de aero fariĝas pli granda. Pro tio la akcelanta forto, kaj sekve la akcelo, malgrandiĝas. Fine, kiam la akcelanta pezoforto kaj la bremsanta frotforto fariĝas samgrandaj, akcelo nuliĝas kaj la rapido restas konstanta ĉe sia maksimuma valoro.

Paraŝutisto en malalta atmosfero, en kutima falpozicio (vidu Fig. 58), post ĉirkaŭ 10 sekundoj atingas maksimuman rapidon de 200 km/h (55 m/s). Kiam paraŝuto estas malfermita, okazas malakcelo egala al ĉirkaŭ 50 m/s<sup>2</sup>. Tio signifas, ke dum ĉirkaŭ unu sekundo la rapido atingas finan falrapidon de 4 m/s, je kiu paraŝutisto alteriĝas.



Fig. 58: Paraŝutisto en kutima falpozicio

#### Ekzemplo 19 - Paraŝutado 1

Fig. 59 montras t-v diagramon de paraŝutisto, kiu malfermas paraŝuton 15 s post la eksalto (en ĉi tiu kazo tre malfrue!!) kaj atingas teron post entute 30 s.

Kiom grandas la alto, de kie li eksaltis?

**Solve**

Ni jam vidis, ke la areo sub la kurbo en t-v diagramo prezentas la distancon trairata dum la movo.

La tuta areo konsistas el kvar grize koloritaj, facile kalkuleblaj partoj kaj el malgranda parto inter la kurbo kaj la unua triangulo. Ĉilasta estas nur proksimume kalkulebla.

a) distanco dum akcelata movo (0s -10s)

Dum la unuaj 10 sekundoj la rapido *Fig. 59*

plialtiĝas de 0 m/s al 55 m/s. Tio signifas, ke la meza akcelo egalas al 5,5 m/s<sup>2</sup>. El diagramo rezultas, ke la akcelo malpliĝas de la komencaj 9,8 m/s<sup>2</sup> al nul. Post 5 sekundoj la reala rapido superas je 10 m/s la rapidon, kiu estus atingata kun konstanta akcelo. Pro tio la meza rapido dum la akcelo de paraŝutisto proksimume kalkuleblas sekvamaniere.

$$\bar{v}_a = \frac{v_1}{2} + \frac{10 \text{ m/s}}{2} = 32,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \rightarrow \quad h_a = \bar{v}_a \cdot t_a = 32,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 10 \text{ s} = 325 \text{ m}$$

b) distanco dum falo kun fina rapido  $\bar{v}_b = v_1 = 55 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \rightarrow \quad h_b = \bar{v}_b \cdot t_b = 55 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5 \text{ s} = 275 \text{ m}$

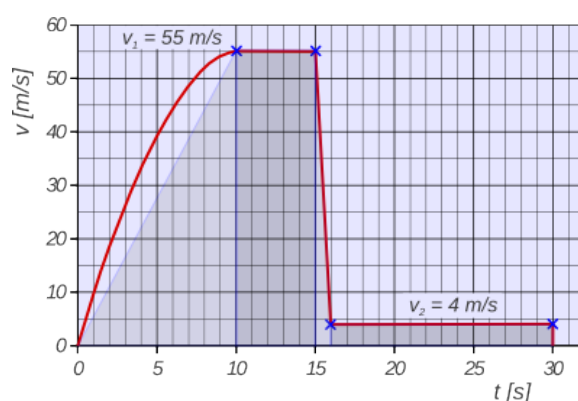
c) distanco dum malfermo de paraŝuto (15s – 16s)

$$\bar{v}_c = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{55 \text{ m/s} + 4 \text{ m/s}}{2} = 29,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \rightarrow \quad h_c = \bar{v}_c \cdot t_c = 29,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1 \text{ s} = 29,5 \text{ m}$$

d) distanco dum descendo kun malfermita paraŝuto (16s – 30s)

$$\bar{v}_d = v_2 = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \rightarrow \quad h_d = \bar{v}_d \cdot t_d = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 14 \text{ s} = 56 \text{ m}$$

Entute la faldistanco rezultas  $h = h_a + h_b + h_c + h_d = 325 \text{ m} + 275 \text{ m} + 29,5 \text{ m} + 56 \text{ m} = 686 \text{ m}$





### 2.2.4 Akcelo sur klinita ebena

#### Eksperimento 4 - Akcelo sur klinita ebena

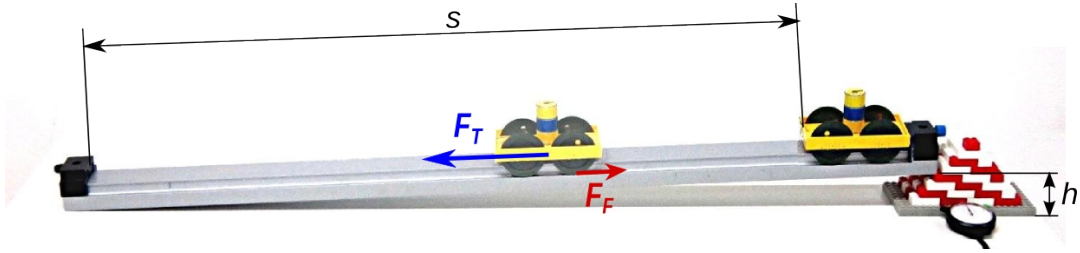


Fig. 60: Akcelado laŭlonge de klinita ebena

La figuro 60 montras simplan eksperimenton. Veturileto kun maso de 207 g <sup>(7)</sup> akceliĝas laŭlonge de klinita ebena. La longo egalas al  $s = 82,5 \text{ cm}$ . Por la diversaj niveldiferencoj  $h$  estas mezurata la tempo necesa por trairi la tutan distancon  $s$ . El la mezuritaj valoroj eblas kalkuli la forton  $F_T$ , kiu tiras malsupren la eksperimentan veturileton, kaj la akcelon  $a$ .

$$F_T = \frac{m \cdot g \cdot h}{s} \quad a = \frac{2 \cdot s}{t^2}$$

La rezultoj estas kolektitaj en la sekva tabelo.

	$h$ [mm]	$t$ [s]	$F_T$ [mN]	$a$ [m/s <sup>2</sup> ]
1	9,6	7,7	24	0,03
2	19,2	3,6	47	0,13
3	28,8	2,7	71	0,23
4	38,4	2,2	95	0,34
5	48,0	1,9	118	0,46
6	57,6	1,7	142	0,57

Tab. 5

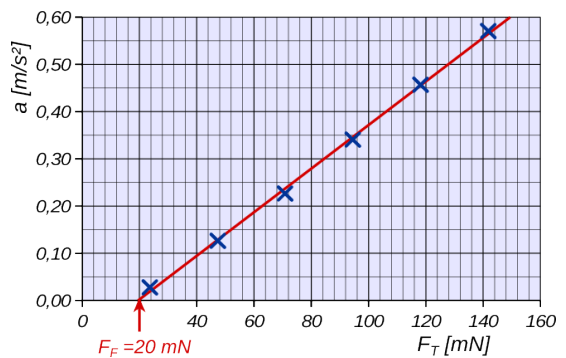


Fig. 61

El la valoroj de Tab. 5 rezultas la diagramo de Fig. 61. Videblas, ke rekto bone proksimiĝas al la mezurpunktoj. Sed la rekto ne trairas originon de la koordinatsistemo, ĉar la movo ne estas senfrota. Pro tio, se la tirforto ne superas la frotoforton, la korpo tute ne akceliĝas.

La akcelanta forto egalas al  $F = F_T - F_F$  kaj la akcelo  $a = \frac{F_T - F_F}{m} = \frac{g \cdot h}{s} - \frac{F_F}{m}$ .

El diagramo de Fig. 61 rezultas, ke la frotoforto egalas proksimume al  $F_F = 20 \text{ mN}$ .

Uzante tiun valoron por kalkuli akcelon, ekzemple kun niveldiferenco  $h = 48 \text{ mm}$ , rezultas

$$a = \frac{g \cdot h}{s} - \frac{F_F}{m} = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 0,048 \text{ m}}{0,825 \text{ m}} - \frac{20 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{207 \cdot 10^{-3} \text{ kg}} = 0,47 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

sufiĉe proksima al la eksperimenta rezulto.

La kalkuloj de eksperimento 4 ĝenerale validas. Kiam oni konsideras la frotoforton, akcelo sur klinita ebena egalas al

$$a = \frac{F_T - F_F}{m} = \frac{g \cdot h}{s} - \frac{F_F}{m}$$

Kiam la froto estas nula aŭ neglektebla rezultas  $a = \frac{g \cdot h}{s}$ . Sekvas, ke la maksimuma rapido atingebla sur klinita ebena kun niveldiferenco  $h$  egalas al

$$v = a \cdot t = a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s}{a}} = \sqrt{2 \cdot s \cdot a} = \sqrt{2 \cdot s \cdot \frac{g \cdot h}{s}} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \text{sama kiel por libera falo el alto } h!$$

<sup>7</sup> Gravas uzi sufiĉe pezan veturileton kun relative malpezaj radoj, ĉar alifoje la rotacia energio de la turniĝantaj radoj influas la rezultojn!

### 2.3 Movenergio

En ĉap. 5 de unua volumo jam estis dirite, ke ju pli granda estas la rapido de difinita korpo, des pli granda estas ĝia movenergio (aŭ kineta energio). Nun eblas eltrovi precizan formulon por kalkuli tiun energion. Fig. 62 montras energitransformĉenon por libere falanta pilko. Sen froto la tuta komenca nivelenergio estas utiligata por akcellaboro kaj fine transformiĝas en movenergion

$$\Delta E_N = W_a = F_G \cdot h = \Delta E_M$$

Ĉar la komenca movenergio egalas al nul, por la libere falanta pilko la fina movenergio egalas al  $E_M = F_G \cdot h$

Ĝenerale, por libere falantaj korpoj validas :

$$h = \frac{g \cdot t^2}{2} \quad v = g \cdot t$$

$$E_M = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot \frac{g \cdot t^2}{2} = \frac{m \cdot g^2 \cdot t^2}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \text{Tiu ĉi lasta rezulto **ĝenerale validas**.$$

Kiam korpo kun maso  $m$  havas rapidon  $v$ , ĝia **movenergio** aŭ **kineta energio** egalas al

$$E_M = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

La rezulto estas atingebla ankaŭ per alia vojo. Por pliiĝi movenergion necesas akcellaboro, kiu estas farata per la akcelanta forto  $F$  laŭlonge de la distanco  $s$   $E_M = W_a = F \cdot s$

Ni jam vidis ke

$$F = m \cdot a \quad v = a \cdot t \quad s = \frac{a \cdot t^2}{2} \quad \rightarrow \quad E_M = F \cdot s = \frac{m \cdot a \cdot a \cdot t^2}{2} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

La rezulto egalas al la supra formulo.

#### 2.3.1 Ekzemploj

##### Ekzemplo 20 Akcelado de avio

Malgranda avio havas mason de 1400 kg. Dum ekflugo, ĝia motoro kapablas tiri per forto de 3000 N.

Kiom grandas la rapido post 250 metroj da akcelado, ne konsiderante la froton?

Solve  $m = 1400 \text{ kg} \quad s = 250 \text{ m} \quad F = 3000 \text{ N}$

$$W_a = F \cdot s = 3000 \text{ N} \cdot 250 \text{ m} = 750 \text{ kJ}$$

$$E_M = W_a = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot W_a}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 750000 \text{ J}}{1400 \text{ kg}}} = 32,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 118 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Por malgranda avio, tiu rapido sufiĉas por ekflugi.

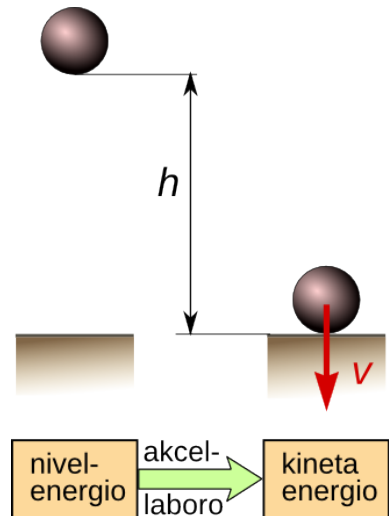


Fig. 62: Energitransformĉeno de libere falanta korpo



Fig. 63 Akcelado de avio

## 2 Movo kaj forto

### Ekzemplo 21 Akcelado laŭlonge de klinita vojo kun froto

Eksperimenta veturilo kun maso de 207 g akceliĝas sur klinita vojo, longa 82,5 cm, kun niveldiferenco de 4,8 cm (vidu Fig. 60 en paĝ. 22). La tuta frotforto egalas al 20 mN.

a) Kiom grandas ĝia fina rapido ?

b) Kiom da tempo necesas por trairi la tutan distancon?

**Solvo**  $m = 207 \text{ g}$   $s = 0,825 \text{ m}$   $h = 4,8 \text{ cm}$   $F_F = 20 \text{ mN}$

a) La tasko solveblas kiel en eksperimento 4, kalkulante unue la akcelantan forton. Per tiu kalkuleblas akcelo kaj poste fina rapido.

Sed en ĉi tiu kazo konvenas uzi la leĝon pri konservado de energio, por atingi la rezultojn pli rapide. Fig. 64 montras energitransformĉenon de la okazintaĵo. La tuta komenca nivelenergio estas utiligata por akcellaboro kaj frotlaboro, kaj transformiĝas en fina movenergio kaj interna energio <sup>(8)</sup>

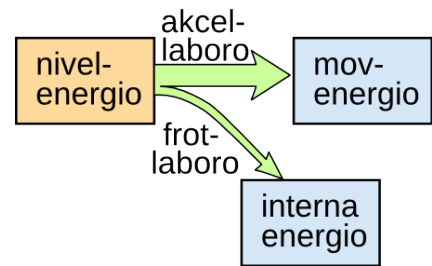


Fig. 64

$E_N = E_M + W_F$  La nivelenergio estas  $E_N = m \cdot g \cdot h$  kaj la frotlaboro  $W_F = F_F \cdot s$

$$E_M = E_N - W_F = m \cdot g \cdot h - F_F \cdot s = 207 \text{ g} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 0,048 \text{ m} - 20 \text{ mN} \cdot 0,825 \text{ m} = 81 \text{ mJ}$$

$$E_M = \frac{m \cdot v^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_M}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 80 \text{ mJ}}{207 \text{ g}}} = 0,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b)  $t = \frac{s}{v} = \frac{2 \cdot s}{v} = \frac{2 \cdot 0,825 \text{ m}}{0,88 \text{ m/s}} = 1,9 \text{ s}$  rezulto egala al tiu de punkto 5 en Tab. 5.

### Ekzemplo 22 Sledado

Sledisto, kiu kune kun sia sledo havas mason de 80 kg, ekveturas sur deklivo kun konstanta kliniĝo de 22° kaj konstante akceliĝas. Post transveturado de 25 m la rapido egalas al 36 km/h.

Kiom grandas la meza frotforto dum la veturado?

**Solvo**  $m = 80 \text{ kg}$   $s = 25 \text{ m}$   $\alpha = 22^\circ$

$$v = 36 \text{ km/h} = 10 \text{ m/s}$$

La forto, kiu tiras malsupren egalas al <sup>(9)</sup>

$$F_T = F_G \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 80 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \sin 22^\circ = 294 \text{ N}$$

La akcelanta forto estas  $F_a = F_T - F_F$

La energitransformĉeno egalas al tiu de Fig. 64, kaj la akcellaboro egalas al atingita movenergio.

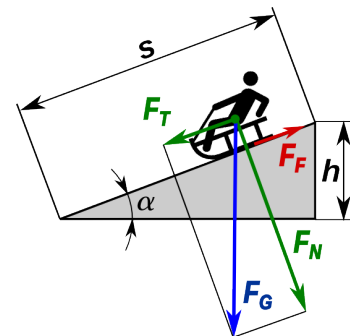


Fig. 65

$$W_a = F_a \cdot s = E_M = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{80 \text{ kg} \cdot (10 \text{ m/s})^2}{2} = 4000 \text{ J} \rightarrow F_a = \frac{W_a}{s} = \frac{4000 \text{ J}}{25 \text{ m}} = 160 \text{ N}$$

Rezultas por la meza frotforto  $F_F = F_T - F_a = 294 \text{ N} - 160 \text{ N} = 134 \text{ N}$

8 Verdire la fina movenergio komponiĝas el translacia kaj rotacia parto, ĉar la radoj turniĝas. Sed la maso de radoj (kaj ilia inercimomanto) estas sufiĉe malgranda por permesi neglekton de la rotacia parto, sen troa malprecizeco.

9 Se la trigonometriaj funkcioj ne estas konataj, eblas determini  $F_T$  ankaŭ per malkompono de  $F_G$ .

## 2 Movo kaj forto

### Ekzemplo 23 Bremsado de konkursaŭto

Konkursaŭto kun maso de 620 kg estas bremsata de la komenca rapido de 320 km/h al rapido de 90 km/h.

Je kiom plialtiĝas la temperaturo de la kvar bremsdiskoj kun maso de po 1,5 kg faritaj el karbonfibroj, se oni supozas, ke 80% de la perdita kineta energio restas en la bremsdiskoj.

La specifa varmo de karboniaj fibroj egalas al 710 J/(kgK)



Fig. 66: Konkursaŭto kun ardantaj bremsdiskoj

Solve  $m_A = 620 \text{ kg}$      $v_1 = 320 \text{ km/h} = 88,9 \text{ m/s}$      $v_2 = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$

$$m_D = 4 \cdot 1,5 \text{ kg} = 6 \text{ kg} \quad c = 710 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Kiam veturilo estas bremsata sur horizontala vojo, validas la energitransformĉeno de Fig. 67

La ŝanĝiĝo de movenergio estas parte utiligata por plialtiĝi **internan energion** de la bremsdiskoj.



Fig. 67: Energitransformĉeno de bremsado

$$E_{M1} = \frac{m \cdot v_1^2}{2} \quad E_{M2} = \frac{m \cdot v_2^2}{2}$$

$$\Delta E_M = \frac{m}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{620 \text{ kg}}{2} \cdot \left( (88,9 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (25 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \right) = 2260 \text{ kJ}$$

$$0,8 \cdot \Delta E_M = \Delta E_i = W_Q = c \cdot m_D \cdot \Delta T \quad \Delta T = \frac{0,8 \cdot \Delta E_M}{c \cdot m_D} = \frac{0,8 \cdot 2260 \text{ kJ}}{0,71 \text{ kJ/kgK} \cdot 6 \text{ kg}} = 424 \text{ K}$$

### Respondo

La temperaturo de la diskoj plialtiĝas je 424 K. Tiu valoro estas tute normala. Bremsdiskoj el karboniaj fibroj bone laboras ĉe temperaturoj inter 400 °C kaj 700 °C.

### Ekzemplo 24 Bremsado de motorciklo

Motorciklisto bremsas sur malseka horizontala vojo, kie la frotkoeficiento inter asfalto kaj la pneŭoj egalas al  $\mu = 0,4$ .

Kiom longas la minimuma bremsdistanco, se la komenca rapido egalas al 36 km/h respektive 72 km/h ?

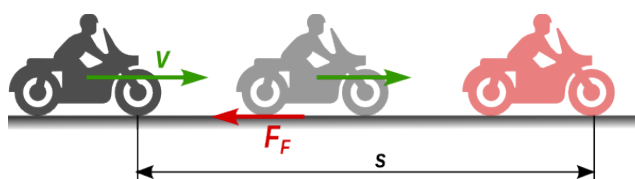


Fig. 68: Motorciklisto bremsas

Solve  $m_A = 620 \text{ kg}$      $v_1 = 320 \text{ km/h} = 88,9 \text{ m/s}$      $v_2 = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$

La maksimuma bremsforto egalas al frotforto.  $F_F = \mu \cdot F_G = \mu \cdot m \cdot g$

La bremslaboro egalas al la komenca movenergio.  $F_F \cdot s = E_M \rightarrow \mu \cdot m \cdot g \cdot s = \frac{m \cdot v^2}{2}$

La minimuma bremsdistanco estas  $s = \frac{v^2}{2 \cdot \mu \cdot g}$  Sekvas por la rapidoj de la ekzemplo:

$$v = 36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow s = 12,7 \text{ m} \quad v = 72 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow s = 51 \text{ m}$$

Videblas, ke kiam la rapido duobliĝas, la minimuma bremsdistanco kvarobliĝas!

## 2.4 Unuforma cirkla movo

Cirkla movo estas movo de objekto laŭ cirkla irejo. Ĝi povas esti unuforma, t.e. kun konstanta granda de la rapido, aŭ ne unuforma. En ĉi tiu ĉapitro ni konsideros nur **unuforman cirklan movon**.

Por la cirkla movo estas difinitaj la sekvaj grandoj :

$r \Rightarrow$  **radiuso** de la cirklo, laŭ kiu la objekto moviĝas

$\vec{v} \Rightarrow$  **rapido** laŭlonge de la cirkla irejo

$T \Rightarrow$  **periodo** = tempo-daŭro de unu kompleta rondiro

$f \Rightarrow$  **frekvenco** de rondiro

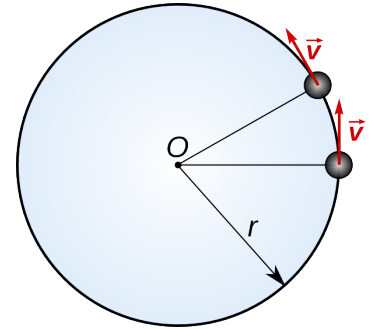


Fig. 69

La frekvenco egalas al reciproko de la periodo  $f = \frac{1}{T}$

La baza mezurunuo de la frekvenco estas  $[f] = \frac{1}{s} = \text{Hz}$  (herco)

La unuo estis nomita honore al la fizikisto Heinrich Rudolf **Hertz**.<sup>(10)</sup>

La distanco trairita dum unu rotacio egalas al perimetro de cirklo

$s = 2 \cdot r \cdot \pi$  . Sekvas por la granda de la rapido  $v = \frac{2 \cdot r \cdot \pi}{T} = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot f = d \cdot \pi \cdot f$  kie

$d = 2 \cdot r$  estas la diametro de la cirklo.

### Ekzemplo 25 Tornilo

Tornilo turnas pecon je 240 rotaciojn en minuto.

a) Kiom grandas la tranĉrapido, se la diametro de peco egalas al 45 mm.

b) Kiom da rotacioj en minuto necesas, por atingi tranĉrapidon de 220 metroj en minuto. <sup>(11)</sup>

Solve

$$d = 45 \text{ mm} = 0,045 \text{ m}$$

$$a) \quad f = 240 \frac{1}{\text{min}} = 4 \frac{1}{s}$$

$$v = d \cdot \pi \cdot f = 0,045 \text{ m} \cdot \pi \cdot 240 \frac{1}{\text{min}} = 33,9 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$b) \quad v = 220 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$v = d \cdot \pi \cdot f \quad \rightarrow \quad f = \frac{v}{d \cdot \pi} = \frac{220 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{0,045 \text{ m} \cdot \pi} = 1556 \frac{1}{\text{min}} = 25,9 \frac{1}{s} = 25,9 \text{ Hz}$$

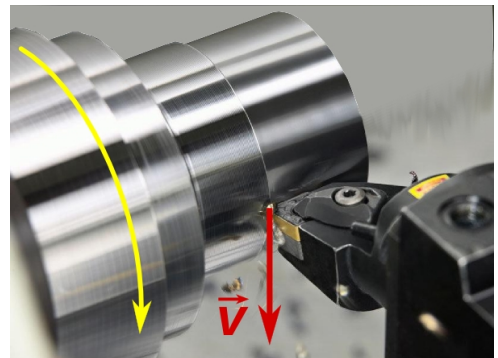


Fig. 70: Tornado

10 Heinrich Rudolf **Hertz** (1857-1894) estis germana fizikisto. Lia ĉefa merito estis la eksperimenta pruvo de la elektromagneta teorio. Li pruvis, ke elektromagnetaj ondoj propagiĝas je la sama rapido kiel lumo. Liaj esploroj liveris la bazon por la evoluigo de la sendrata telegrafado kaj de la telefonado.

11 En tekniko, oni indikas la turnfrekvencon kutime kiel nombro da rotacioj en minuto, kaj la tranĉrapido de tranĉiloj plejofte estas indikita en metroj en minuto.

## 2.5 Centra forto

Kiam korpo moviĝas laŭ cirkla irejo, ĝia movdirekto daŭre ŝanĝiĝas. Sekve la vektora rapido ŝanĝiĝas, ankaŭ se la movo estas unuforma.

Ŝanĝiĝo de vektora rapido signifas akcelo, kaj akcelo bezonas forton. Pro inercio, ĉiu movanta korpo klopodas daŭrigi kaj la grandon kaj la direkton de sia rapido. Ni konstatas, ke dum ĉiu cirkla movo de korpo, necesas forto, kiu malebligas la korpon forlasi la cirklan irejon.

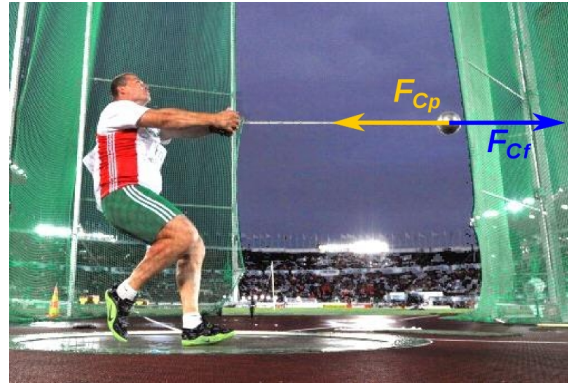


Fig. 71: Martelĵetisto dum konkurso

Ekzemple, se la atleto de Fig. 71 delasas la martelon, ĝi tuj daŭrigas sian movon en la direkto, kiun havis la rapido dum la delasmomento. El vidpunkto de ekstera observanto, la atleto tiras martelon direkte al centro de cirklo por daŭre ŝanĝi la vektoran rapidon. La forto direktita al centro de cirklo nomiĝas **alcentra forto**  $F_{Cp}$ .

El vidpunkto de atleto mem kaj de ĉiu turniĝanta observanto agas ankaŭ alia forto, kiu ekvilibrigas la alcentran forton kaj evitas alproksimiĝon de la martelo al centro. Ĝi nomiĝas **decentra forto**  $F_{Cf}$ . decentra forto kaj alcentra forto havas saman grandon. Ili estas tiel nomataj **centraj fortoj**, t.e. fortoj, direktitaj laŭlonge de la rekto, kiu kunligas la movantan korpon kun fiksa centro  $O$ .

### 2.5.1 Kalkulado de la centra forto

Dum cirkla movo la vektora rapido de korpo daŭre ŝanĝiĝas. Se la korpo dum tempodaŭro  $\Delta t$  moviĝas de pozicio 1 al pozicio 2 (vidu Fig. 72), ĝia akcelo egalas al

$$\vec{a}_C = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$$

Ĉar rapido estas vektoro, necesas fari vektoran diferencon, kiel montras Fig. 73.

Kiam  $\Delta t$  estas sufiĉe malgranda, la griza sektoro de Fig. 72 proksimiĝas al triangulo, kiu similas al griza triangulo de Fig. 73.

Pro la simileco de trianguloj validas:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{r} = \frac{v \cdot \Delta t}{r} \quad \hat{\text{car}} \quad \Delta s = v \cdot \Delta t$$

Por la tiel nomata **alcentra akcelo** sekvas  $\vec{a}_C = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$

Pro la baza ekvacio de mekaniko la centra forto rezultas

$$F_C = a_C \cdot m = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad [F_C] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N}$$

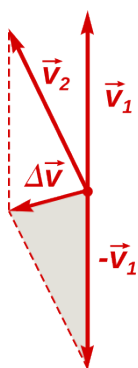


Fig. 73

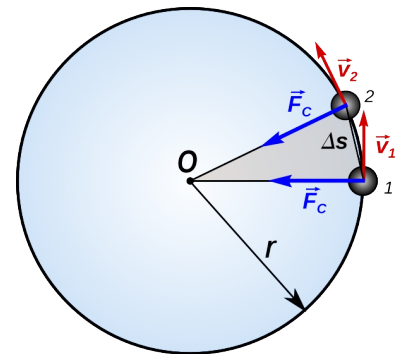


Fig. 72

## 2 Movo kaj forto

### 2.5.2 Ekzemploj

#### Ekzemplo 26

Sitelo enhavanta akvon estas svingata laŭ vertikala cirklo (vidu Fig. 74) kun radiuso de 65 cm.

Kiom grandas la necesa turnfrekvenco, por ke en la supra punkto de la cirklo akvo ne elfalu?

#### Solvo

En la supra punkto akvo ne forfalas, se la decentra forto superas aŭ almenaŭ egalas la pezoforton de akvo.

$$\text{decentra forto } F_C = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \text{pezoforto } F_G = m \cdot g$$

$$\text{ekvilibra situacio } F_C = F_G \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot g \rightarrow v = \sqrt{g \cdot r} = \sqrt{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,65 m} = 2,53 \frac{m}{s}$$

$$\text{La necesa turnfrekvenco rezultas } f = \frac{v}{2 \cdot r \cdot \pi} = \frac{2,53 m/s}{2 \cdot 0,65 m \cdot \pi} = 0,62 \frac{1}{s}$$

kaj ĉiu rotacio devas plenumiĝi en tempo de maksimume  $T = 1/f = 1,62 s$ .

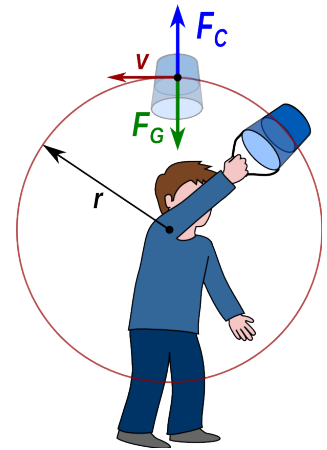


Fig. 74

#### Ekzemplo 27

Metala disko kun truoj estas turnata ĉirkaŭ vertikala akso per elektra motoro. En unu truo, kiu distancas de la rotacia centro  $O$  je 13,5 cm kaj havas diametron egala al 6 mm, kuŝas ŝtala sfero kun diametro de 15 mm (vidu Fig. 75).

La turnfrekvenco estas daŭre pligrandigata. Kiom grandas ĝia valoro en la momento, en kiu la sfero forfalas de la disko?

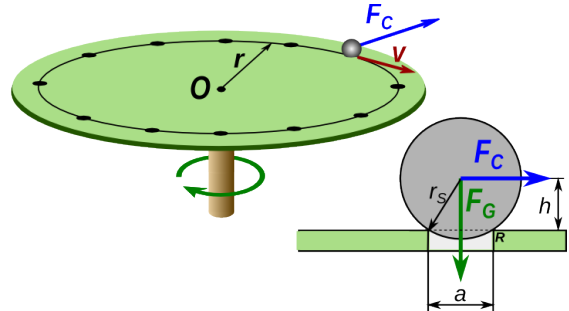


Fig. 75

#### Solvo

$$r = 13,5 \text{ cm} \quad a = 6 \text{ mm} \quad r_s = 7,5 \text{ mm}$$

La sfero forfalas, kiam, rilate al renverspunkton R, la renversanta momento estigita per la decentra forto, superas la stabiligantan momenton de la pezoforto.

$$\text{ekvilibra situacio } F_C \cdot h = \frac{F_G \cdot a}{2} \rightarrow \frac{m \cdot v^2 \cdot h}{r} = \frac{m \cdot g \cdot a}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{g \cdot a \cdot r}{2 \cdot h}}$$

$$\text{Pro la leĝo de Pitagoro } h = \sqrt{r_s^2 - \frac{a^2}{2}} = \sqrt{(7,5 \text{ mm})^2 - (3 \text{ mm})^2} = 6,87 \text{ mm}$$

$$\text{Sekvas } v = \sqrt{\frac{g \cdot a \cdot r}{2 \cdot h}} = \sqrt{\frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 6 \text{ mm} \cdot 0,135 m}{2 \cdot 6,87 \text{ mm}}} = 0,76 \frac{m}{s}$$

$$\text{La rilata turnfrekvenco estas } f = \frac{v}{2 \cdot r \cdot \pi} = \frac{0,76 m/s}{2 \cdot 0,135 m \cdot \pi} = 0,897 \frac{1}{s} = 53,8 \frac{1}{\text{min}}$$

## 2 Movo kaj forto

### Ekzemplo 28

Sur disko turnata ĉirkaŭ vertikala akso, kuŝas ligna bloketo en distanco  $r$  de la rotacia centro (vidu Fig. 76).

Ĉu la bloketo renversiĝos aŭ forglitos, se la turnfrekvenco daŭre pligrandiĝas?

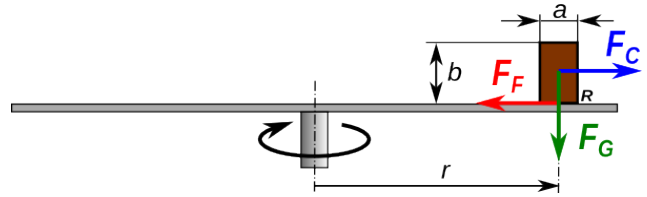


Fig. 76

### Solvo

La frotforto inter la disko kaj la ligna bloketo funkcias kiel alcentra forto. Kiam la decentra forto egalas al frotforto, la bloketo forglitas.

$$\text{decentra forto } F_C = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad \text{frotforto } F_F = m \cdot g \cdot \mu$$

$$\text{ekvilibra situacio } F_C = F_F \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot g \cdot \mu \rightarrow v = \sqrt{g \cdot \mu \cdot r}$$

Kiam  $v > \sqrt{g \cdot \mu \cdot r}$  la bloketo forglitas.

Se la frotforto sufiĉas por eviti gliton, la turnfrekvenco povas pligrandiĝi, ĝis la renversmomento estigata de la decentra forto egalas la stabiligantan momenton de la pezoforto.

$$\text{ekvilibra situacio } F_C \cdot \frac{b}{2} = F_G \cdot \frac{a}{2} \rightarrow \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \frac{b}{2} = m \cdot g \cdot \frac{a}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{g \cdot a \cdot r}{b}}$$

Kiam  $v > \sqrt{\frac{g \cdot a \cdot r}{b}}$  la bloketo renversiĝas.

Ĝenerale, el la supra formuloj sekvas, ke, kiam  $\mu > \frac{a}{b}$  la bloketo renversiĝas, aliffoje ĝi forglitas.

### Ekzemplo 29

Ŝarĝaŭto veturas kun rapido de  $60 \text{ km/h}$  en ebena kurbiĝo. La radiuso de la kurbiĝo egalas al  $40 \text{ m}$  kaj la frotkoefficiento inter la malseka asfalto kaj la radoj egalas al  $0,6$  (vidu Fig. 77).

Ĉu la kamiono sukcesos veturi sen problemoj tra la kurbiĝo, se la distanco inter la radoj egalas al  $a = 1,8 \text{ m}$ ?

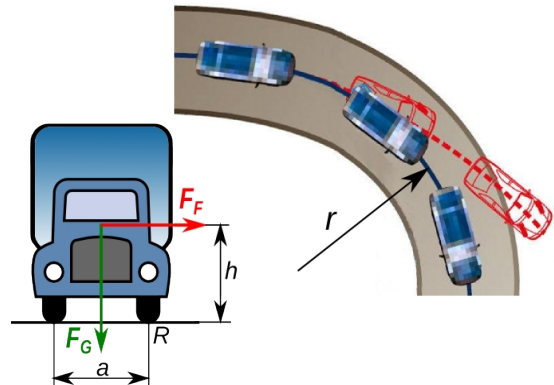


Fig. 77

### Solvo

Fakte la problemoj estas egala al tiu de ekzemplo 28. Sufiĉas laŭigi la levbrakon de la decentra forto, kiu nun egalas al  $h$ .

$$\text{La kamiono ne forglitas se } v < \sqrt{g \cdot \mu \cdot r} = \sqrt{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,6 \cdot 50 \text{ m}} = 17,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 62 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{Ĝi ne renversiĝas se } v < \sqrt{\frac{g \cdot a \cdot r}{2 \cdot h}} = \sqrt{\frac{9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 1,8 \text{ m} \cdot 40 \text{ m}}{2 \cdot 1,4 \text{ m}}} = 15,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 57 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Fine en la kondiĉoj de la ekzemplo la kamiono kun rapido de  $60 \text{ km/h}$  renversiĝas.



## 2.6 Solvendaj problemoj

1. Aŭtomobilo kun maso egala al  $1450\text{ kg}$  akceliĝas de  $0$  al  $50\text{ km/h}$  en  $3,6\text{ s}$ .  
Kiom grandas la povumo necesa por tiu akcelado?
2. Motorbiciklo kun stiristo havas tutan mason de  $280\text{ kg}$  kaj veturas kun rapido de  $80\text{ km/h}$ .  
La diametro de la radoj egalas al  $60\text{ cm}$ .
  - a) Kiom grandas la turnfrekvenco de la radoj?
  - b) Kiom devas grandi la bremsanta forto, por ke la motorciklo povas halti post distanco egala al  $40\text{ m}$ ?

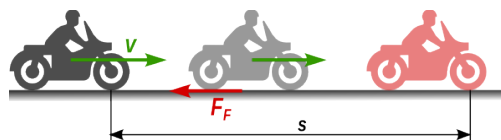


Fig. 78: Martelo en ekvilibro sur la tablo

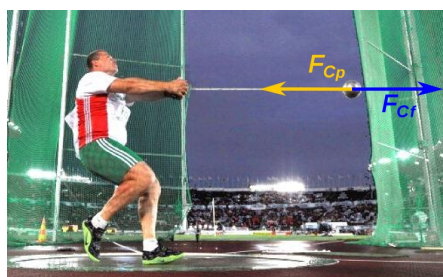


Fig. 79

3. La maso de sporta martelo egalas al  $7,26\text{ kg}$ .  
La atleto svingas ĝin en cirklo kun radiuso de  $1,9\text{ m}$  kaj fine ĝi atingas rapidon egala al  $24\text{ m/s}$ .
  - a) Kiom grandas la periodo de la lasta turniĝo?
  - b) Kiom grandas la forto necesa por teni la martelon dum lasta turniĝo?

4. Metala disko kun truoj estas turnata ĉirkaŭ vertikala akso per elektra motoro. En unu truo, kiu havas diametron egala al  $8\text{ mm}$ , kuŝas ŝtala sfero kun diametro de  $16\text{ mm}$  (vidu Fig. 80).  
La turnfrekvenco estas daŭre pligrandigata. Kiam ĝi atingas la valoron de  $45$  rotacioj en minuto, la sfero forfalas de la disko.  
Kiom longas la radiuso de la cirkla movo?

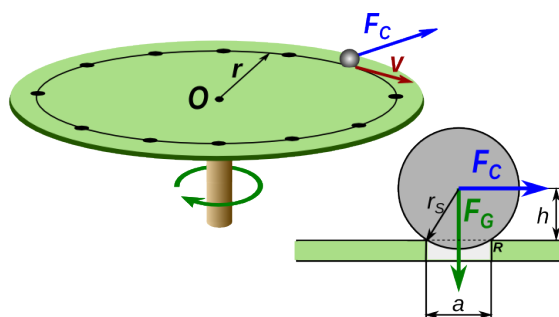


Fig. 80

### Respondoj

1. La necesa povumo egalas al  $38,8\text{ kW}$ .
2. a) La frekvenco egalas al  $11,8\text{ 1/s}$ .  
b) Por haltigi la motorciklon post  $40\text{ m}$  necesas forto egala al  $1730\text{ N}$ .
3. a) La periodo de la lasta turniĝo egalas al  $0,5\text{ s}$ .  
b) La forto, kiu necesas por teni la martelon, egalas al  $2200\text{ N}$ .
4. La radiuso de la cirklo egalas al  $25,5\text{ cm}$

## 3 Elektromagneta forto

### 3.1 Fundamento de magnetismo

#### 3.1.1 Bazaj magnetaj fenomenoj

##### Eksperimento 5 - Magneto

Eksperimento de Fig. 81 montras, ke magneto altiras kelkajn monerojn, aliaj ne estas altirataj. Kiuj estas la necesaj ecoj, por ke monero estu altirata de magneto?

Montriĝas, ke estas altirataj nur tiuj moneroj, kiuj enhavas feron, kobalton aŭ nikelon. Moneroj faritaj el aliaj metaloj, kiel aluminio, kupro, arĝento, latuno, ktp., ne estas altirataj.

Ĝenerale rezultas, ke magnetoj altiras korpojn, kiuj estas faritaj, almenaŭ parte, el fero, kobalto aŭ nikelo. Tiuj metaloj estas **feromagnetaj** <sup>(12)</sup>.

Ne necesas, ke la feromagnetaj materialoj estas puraj, ankaŭ iuj el iliaj kombinaĵoj kaj alojoj estas altirataj. Same iuj mineraloj de fero estas altirataj de magnetoj, sed la forto estas pli malgranda.

El la eksperimentoj ilustritaj en Fig. 82 kaj Fig. 84 evidentas, ke ĉiu magneto havas du **polusojn**, t.e. lokoj kie la magneta forto ŝajnas esti koncentrata. Videblas, ke kiam oni proksimigas unu al la alia du magnetojn, ties polusoj aŭ altiras aŭ forpuŝas unu la alian. Do la polusoj estas malsamaj.

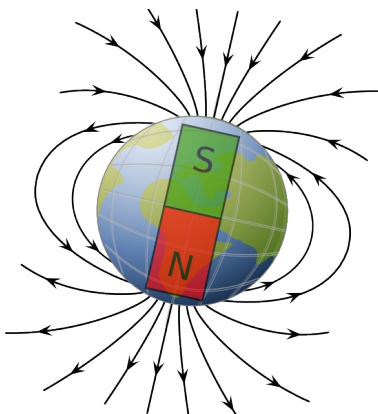


Fig. 83: La Tero kiel magneto

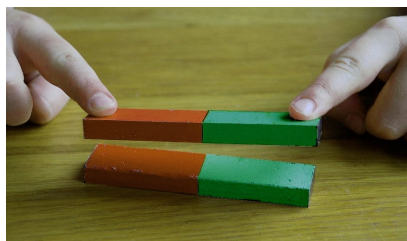


Fig. 84: Samnomaj polusoj forpuŝiĝas



Fig. 81 Kelkaj el la

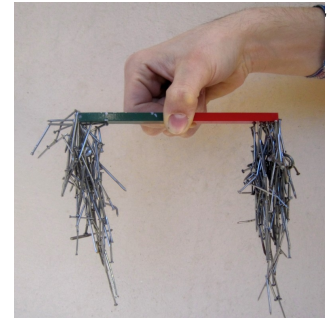


Fig. 82: Najloj koncentriĝas ĉe polusoj

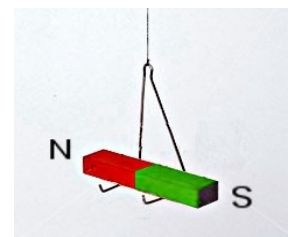


Fig. 85

Se magneto estas pendigita tiel, ke ĝi povas libere turniĝi (vidu Fig. 85), videblas, ke ĝi turniĝas, ĝis ĝi estas orientata en nord-suda direkto. La kialo estas, ke la Tero mem estas granda magneto, kies polusoj staras tre proksime al la geografiaj polusoj (vidu Fig. 83). La poluso de magneto, kiu turnas sin norden nomiĝas nord- poluso, tiu kiu turnas sin suden nomiĝas sudpoluso. Kiam oni proksimigas du samnomajn polusojn, ili forpuŝas unu la alian (vidu Fig. 84).

Por Tero la geografia nordpoluso estas fakte magneta sudpoluso, kaj la geografia sudpoluso estas magneta nordpoluso.

<sup>12</sup> Ĝenerale, por ke materialoj estu feromagnetaj ne sufiĉas, ke ili enhavas la nomitajn metalojn. Necesas, ke ties temperaturo ne superas la tiel nomatan *Curie-temperaturo*n (768 °C por fero), kaj ke la atomoj troviĝas en taŭga kristala strukturo (rustorezista ŝtalo kutime ne estas feromagnetaj).

### 3 Elektromagneta forto

La eksperimentoj de Fig. 81, Fig. 82 kaj Fig. 86 montras alian interesan econ de feromagnetaj materialoj. Videblas, ke kiam ili troviĝas en ĉirkaŭaĵo de magneto ili fariĝas magnetoj, t.e. ili estas magnetataj. Por ke tio okazu, tute ne necesas, ke la feromagnetaj korpoj kuntuŝiĝas kun la magneto.

La fakto estas klare videbla helpe de eksperimento de Fig. 86. Sen magneto la du najloj, pendigitaj al fadenoj, intertuŝiĝas. Kiam oni proksimigas la magneton, ili forpuŝas unu la alian. Tio okazas, ĉar ili estas magnetataj kaj havas nordan respektive sudan poluson je la sama flanko. Sekve, kiel jam dirite, la samnomaj polusoj de la najloj forpuŝas unu la alian.

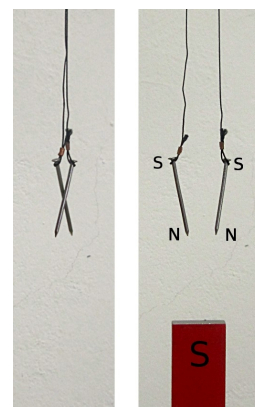


Fig. 86:

#### 3.1.2 Klarigo de magnetado – elementaj magnetoj

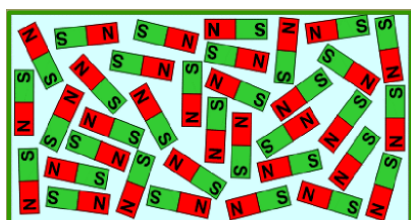
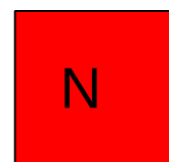


Fig. 87: Elementaj magnetoj en malordo

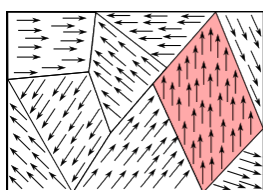


Fig. 88: elementaj magnetoj ordigitaj per ekstera magneto



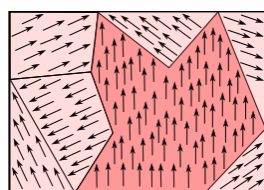
La propreco de feromagnetaj materialoj klarigeblas per simpla modelo. Oni povas imagi, ke feromagnetaj materialoj konsistas el malgrandegaj magnetoj, tiel nomataj elementaj magnetoj, kiuj en ne magnetata stato estas en malordo, kaj pro tio eksteren ne efikas kiel magnetoj (vidu Fig. 87).

Kiam magneto estas proksimigata al feromagnetata korpo, la elementaj magnetoj ordiĝas, ilia efiko sumiĝas kaj fariĝas perceptebla ekster la korpo (vidu Fig. 88).

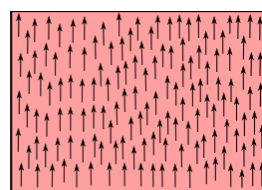


sen ekstera magnetata kampo

Fig. 90



kun malforta ekstera magnetata kampo



kun forta ekstera magnetata kampo

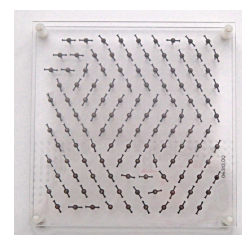


Fig. 89

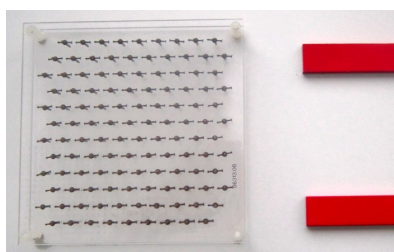


Fig. 91

Kompreneble en realo la feromagnetaj materialoj ne vere konsistas el elementaj magnetoj. Iliaj kristaloj estas subdividitaj en malgrandaj regionoj, kie la t.n. magnetaj momantoj de la atomoj estas samdirektaj (Fig. 90). Kiam la materialo troviĝas proksime al ekstera magneto unue la limoj inter la regionoj ŝanĝiĝas kaj la regionoj, en kiuj la magnetaj momantoj havas direkton egalan, al tiu de la ekstera magneto, pligrandiĝas. Se la ekstera magneto estas

sufiĉe forta, la ordo disvastiĝas al la tuta kristalo (lasta bildo de Fig. 90). Eksperimentilo de Fig. 89 kaj Fig. 91, farita el multaj malgrandaj magnetaj nadloj, bone taŭgas por modele montri kio okazas.

### 3.1.3 Magneta kampo

Oni spertas la ĉeeston de magneta kampo pro la forto, kiu agas en ĝi sur ĉiu korpo el feromagnetaj materialoj. Kie feromagnetaj materialoj, kaj moviĝantaj elektraj ŝarĝoj (<sup>13</sup>), spertas forton, ekzistas *magneta kampo*.

Por esplori magnetan kampon, bone taŭgas magnetaj nadloj. Se en iu punkto de la spaco, magneta nadlo spertas forton, tie ekzistas magneta kampo. La nadlo indikas la direkton de la kampo. Por figure prezenti magnetan kampon oni uzas *kampolinioj*.

En ĉiu spaca punkto, la direkto de la kampolinio egalas precize al tiu de la forto, kiu efikas al la magneta nordpoluso de elementa magneto, kiu troviĝas en tiu punkto. Pro tio, kampolinioj neniam disbranĉiĝas aŭ intersekcas unu la alian. Ĉe magnetoj la kampolinioj eliras de la nordpoluso kaj aliras al la sudpoluso. Se oni desegnas kelkajn kampoliniojn, la loko, kie ili estas pli proksimaj unu al la alia, estas loko, kie la forto sur elementa magneto estas pli granda.

Fig. 92 montras, kiel konstrui kampoliniojn. Se en iu punkto en ĉirkaŭaĵo de magneto troviĝas nordpoluso de elementa magneto, ĝi estas respektive altirata per la sudpoluso, kaj forpuŝata per la nordpoluso de magneto. En Fig. 95 estas desegnitaj la rezultantaj kampolinioj por magneta stango. Ili estas prezentablaj ankaŭ helpe de ferfaĵaĵo (Fig. 93).

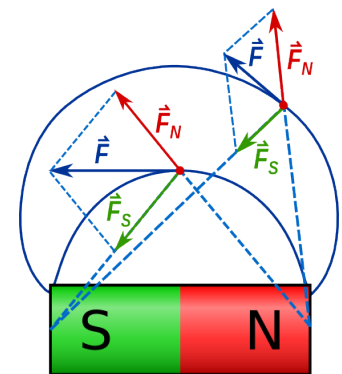


Fig. 92

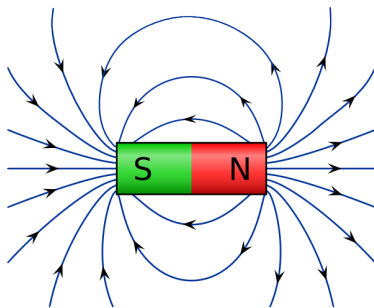


Fig. 95

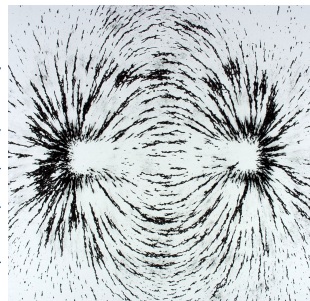


Fig. 93

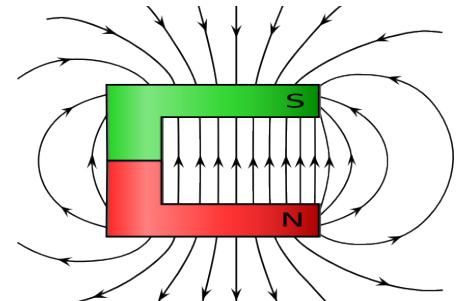


Fig. 94

Kiam en iu regiono, troviĝas pluraj magnetoj, iliaj magnetaj kampoj interferas. La rezultantaj kampolinioj por kelkaj simplaj situacioj estas ilustritaj en la sekvaj figuroj.

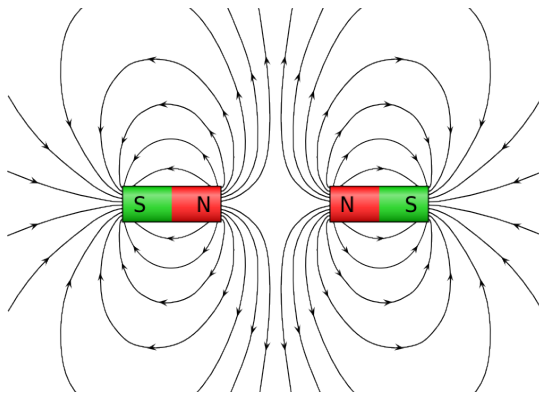


Fig. 96

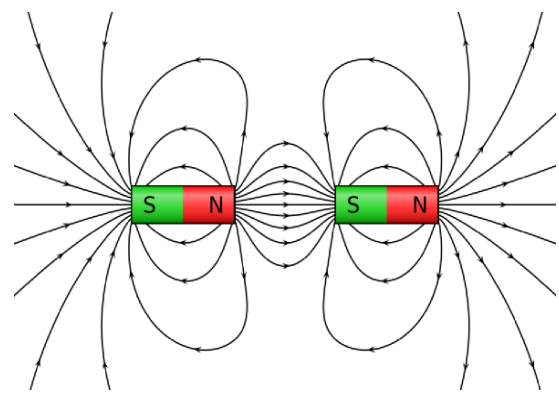


Fig. 97

13 Tiu fakto estos klarigata en la sekvaj paragrafoj, kie estos pritraktata la t. n. forto de Lorentz.

## 3.2 Elektra kurento en magneta kampo

### 3.2.1 Magneta kampo de elektra kurento

En la jaro 1820 la dana fizikisto H.C. **Oersted** (<sup>14</sup>) malkovris la interrilaton inter elektra kurento kaj magnetismo. Dum eksperimento, per kiu li intencis montri la varmfikon de elektra kurento, tute hazarde proksime de la konduktanto troviĝis magneta nadlo. Oersted rimarkis, ke kiam li enŝaltis kurenton, la nadlo ekturniĝis kaj forlasis sian nord-sudan direkton.

#### Eksperimento 6 - Eksperimento de Oersted

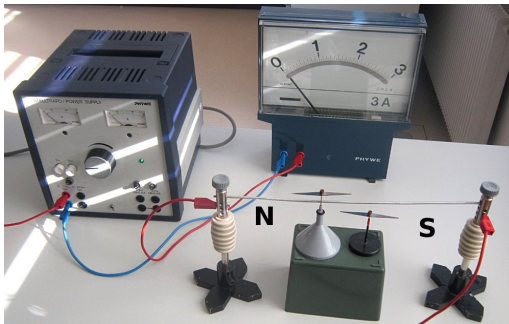


Fig. 98: Tra la drato ne fluas kurento

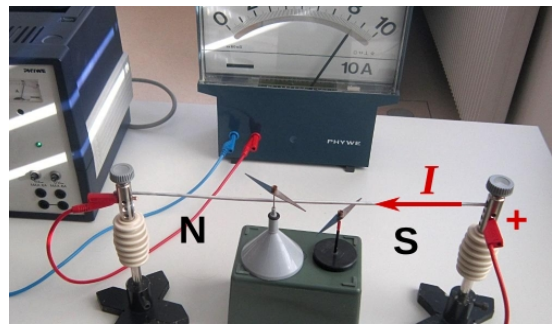


Fig. 99: Tra la drato fluas relative granda kurento

La Fig. 98 kaj 99 montras eksperimenton similan al tiu farita de Oersted. Kiam tra la drato ne fluas kurento, la nadlo estas direktitaj paralele al la drato, kies direkto estas nord-suda.

Kiam oni enŝaltas la kurenton, la nadloj ekturniĝas. Rimarkeblas, ke la nadlo, kiu staras supre de drato turniĝas dekstren, la nadlo kiu staras malsupre turniĝas maldekstren.

Libere moveblaj magnetaj nadloj ĉiam orientas sin laŭlonge de la direkto de magnetaj kampolinioj. Sen kurento, la magneta forto direktas la nordan poluson de la nadlo al geografia nordpoluso (Fig. 100). Kiam fluas kurento la supra nadlo de eksp. 6 turniĝas dekstren. Tio signifas, ke la kurento estigas magnetan forton direktatan dekstren (Fig. 101).



Fig. 100: Sen kurento la nadlo direktas sin norden

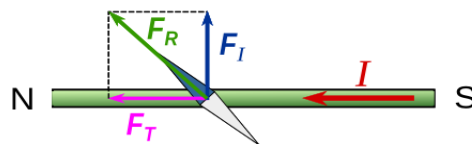


Fig. 101: Kun kurento la nadlo turniĝas

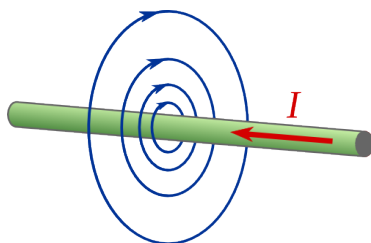


Fig. 103

Fine, el serio da eksperimentoj rezultas, ke ĉirkaŭ iu konduktilo, trafluita per elektra kurento, kreiĝas magneta kampo, kies kampolinioj estas cirkloj (Fig. 103).

Por determini la direkton de la kampolinioj eblas uzi la tiel nomatan regulon de la dekstra mano.

Se la dikfingro de la dekstra mano estas direktata kiel la kurento, la kurbigitaj fingroj montras la direkton de la magnetaj kampolinioj (Fig. 102).

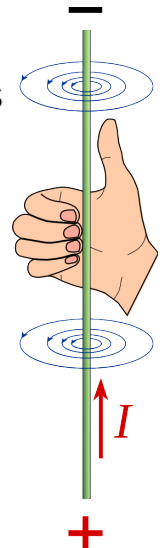


Fig. 102

<sup>14</sup> Hans Christian **Oersted** (1785 – 1850) estis dana fizikisto kaj kemiisto. Kiel fizikisto li malkovris la magnetan efikon de elektra kurento. Kiel kemiisto li estis la unua, kiu sukcesis produkti aluminion el alumina oksido.

### 3 Elektromagneta forto

Eblas montri la kampoliniojn de magneta kampo, produktita per elektra kurento, ankaŭ helpe de ferfajlaĵo, kiel montras Fig. 104.

Komprenoble, la magneta kampo en ĉirkaŭaĵo de konduktilo estas rezulto de la kunago de la kampoj produktataj laŭlonge de la tuta konduktilo. Se la konduktilo, en kiu fluas kurento, ne estas rekta, la rezultantaj kampolinioj ne estas cirkloj.

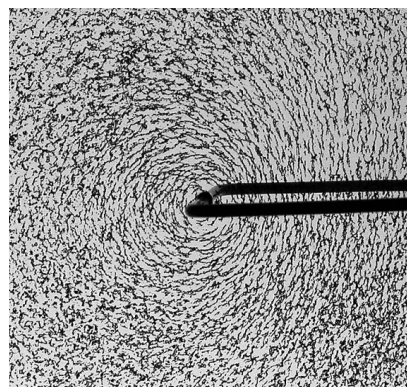


Fig. 104: Ferfajlaĵo montras kampojn

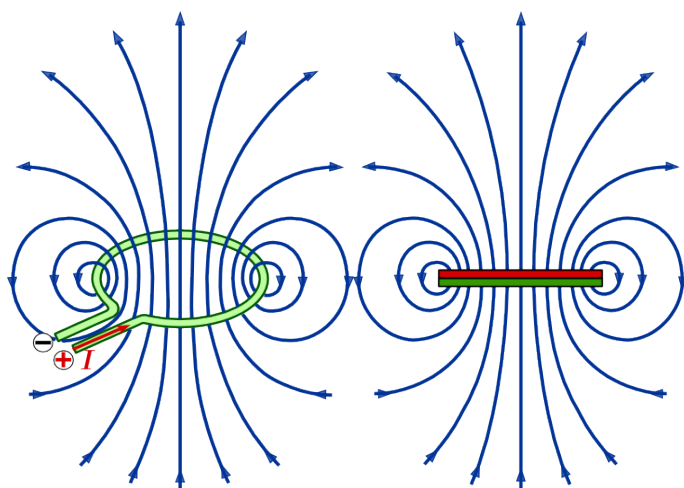


Fig. 105

Fig. 106

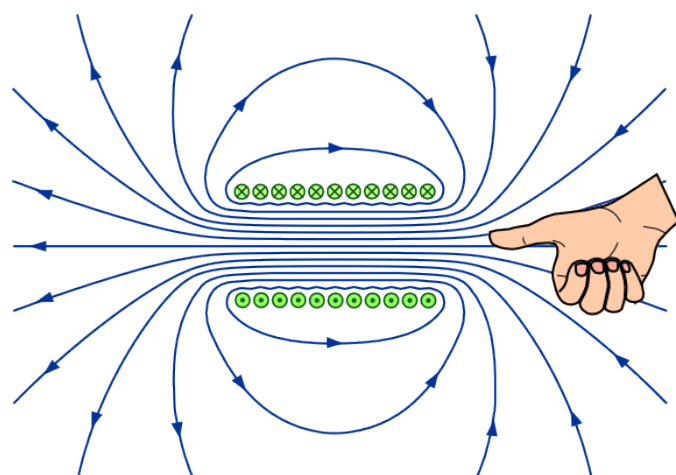


Fig. 107



Fig. 108



de la leganto, oni desegnas ikson X. Tiu simbolaro estos uzata en la venontaj paĝoj ankaŭ por aliaj vektoraj grandoj.

Kiel montras Fig. 107, ankaŭ por eltrovi la direkton de kampo interne al la bobeno, eblas uzi regulon de dekstra mano.

Se la kurbigitaj fingroj montras la direkton de la kurento en la bobeno, la dikfingro de la dekstra mano montras direkton de magneta kampo ene de la bobeno. La Fig. 109 montras ferfajlaĵojn orientitajn laŭlonge de la kampolinioj de bobena kampo.



Fig. 109

Ekzemple, la kampo produktita per cirkla konduktilo (volvo), en kiu fluas kurento, estas prezentita en Fig. 105. Ĝi similas al tiu de tre mallonga daŭra magneto Fig. 106.

En Fig. 107 videblas magnetaj kampolinioj, kiuj estiĝas ene kaj ekstere de bobeno. Ene de la bobeno la kampolinioj estas proksimume paralelaj kaj egaldistancaj. Tio signifas, ke ene de la bobeno la kampo havas ĉie la saman intenson kaj direkton. La kampo ene de bobeno estas **homogena**. Ekstere ĝi similas al tiu de stangoforma daŭra magneto.

En Fig. 107 estas desegnita sekcio de la bobeno. Por montri la direkton de la kurento estas uzata la simbolaro de Fig. 108. Kiam la kurento (prezentita kiel sago), direktiĝas al la rigardanto, kiu do vidas la sagan pinton, oni desegnas punkton •, kiam ĝi direktiĝas for

### 3.2.2 Magneta forto aganta al elektra kurento

Se en ĉirkaŭaĵo de konduktilo trafluata de kurento, magneto spertas forton, pro la leĝo de reciproka agado, ankaŭ konduktilo trafluata de kurento spertas forton en ĉirkaŭaĵo de magneto. Tio estas praktike observebla en la sekva eksperimento.

#### Eksperimento 7 - Konduktanta pendolo

Pendolo farita el du konduktantaj bendoj, kiuj kunligas aluminian tubeton, estas konektita al fonto de unudirekta kurento. La tubeto troviĝas inter la brakoj de U-forma magneto.

Kiel montras Fig. 110, sen kurento la pendolo pendas vertikale. Kiam kurento trafluas la pendolon en prezentita direkto (vidu Fig. 111), ĝi forlasas sian ekvilibran pozicion kaj moviĝas dekstren.

Se oni inversigas la direkton de kurento, la pendolo moviĝas maldekstren.

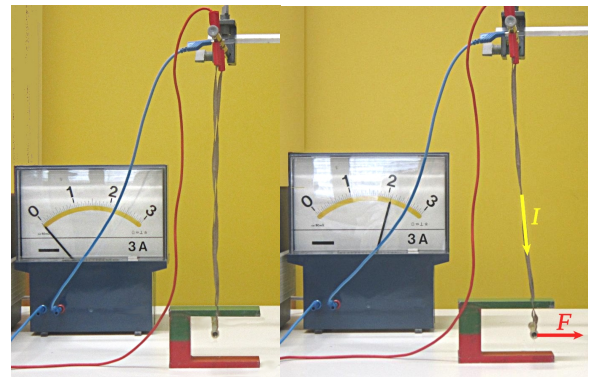


Fig. 110

Fig. 111

Kiel estis montrita en par. 3.1.3, la kampolinioj de magneto direktiĝas de nordpoluso al sudpoluso. Kiam tra la alumina tubeto fluas kurento, ĉirkaŭ ĝi formiĝas magneta kampo, kies kampolinioj estas cirkloj (vidu Fig. 112).

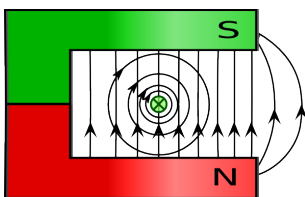


Fig. 112

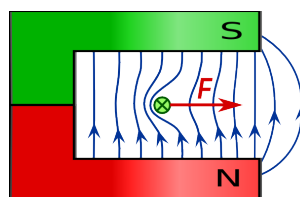


Fig. 113

La magnetaj kampoj de magneto kaj de tubeto interagis. Maldekstre de la tubeto ili estas samdirektaj. Pro tio la intenso de rezultanta kampo pligrandiĝas kaj la kampolinioj estas pli proksimaj. Dekstre de la tubeto la direktoj de la du kampoj estas kontraŭaj, la

intenso de rezultanta kampo malpliĝas kaj la kampolinioj estas malpli proksimaj. La rezultantaj kampolinioj estas prezentitaj en Fig. 113.

El eksperimento 7 evidentiĝas ke, kiam tra la pendolo fluas kurento, al la alumina tubeto efikas forto, kiu puŝas ĝin dekstren, t.e. de la pli forta al la pli malforta parto de rezultanta kampo. Ĉi lasta rezulto estas konfirmata de la fakto ke, kiam oni inversigas la direkton de kurento, la forto agas maldekstren, t.e. ankaŭ ĉi foje de la pli forta al la pli malforta parto de rezultanta kampo, kiel montras Fig. 114.

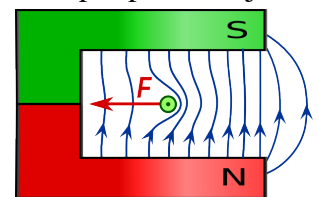


Fig. 114

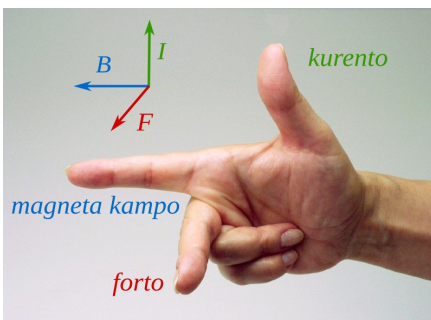


Fig. 115: Unua regulo de la tri fingroj

El eksperimento 7 rezultas ankaŭ la unua regulo de la tri fingroj de la dekstra mano, kiu helpas trovi la direkton de la forto aganta al la kurento en magneta kampo.

Se la dikfingro de la dekstra mano estas direktata kiel la kurento kaj la montrofingro indikas direkton de la magneta kampo, tiam la disetendata meza fingro montras la direkton de la forto aganta al la kurento (vidu Fig. 115).

### 3.2.3 Mezuro de magneta kampo

La forto aganta al kurento en magneta kampo bone taŭgas kiel ilo por difini kaj mezuri la intenson de la magneta kampo mem. Por tio sufiĉas iomete ŝanĝi eksperimenton 3 tiamaniere, ke eblas mezuri la forton.

#### Eksperimento 8 - Mezuro de magneta forto aganta al elektra kurento

En ĉi tiu eksperimento la alumina tubeto trafluita de kurento estas pendigita al fortomezurilo. Tiamaniere eblas mezuri la forton agantan depende de la kurento mem. Per la eltrovitaj valoroj, kiuj troviĝas en la sekva tabelo, eblas desegni diagramon de Fig. 117.

MP	I [A]	F[mN]
1	1,0	1,5
2	2,2	3,5
3	3,1	5,0
4	4,0	6,5
5	5,3	8,5

Tab. 6

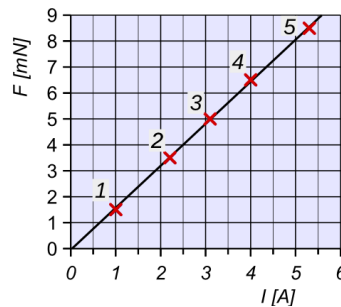


Fig. 117

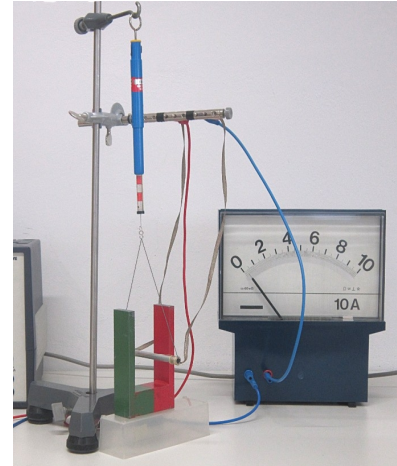


Fig. 116

El diagramo de Fig. 117 evidentiĝas, ke kompensorekto bone proksimiĝas al la mezurpunktoj. Sekve, en difinita magneta kampo, la forto estas proporcia al la kurento  $F \propto I$

El aliaj eksperimentoj, kie la longo de konduktilo  $s$ , kiu troviĝas ene de la kampo (vidu Fig. 118), estas ŝanĝita, rezultas, ke por difinita kurento, la forto estas proporcia al la longo  $F \propto s$

El ĉi ĉio rezultas, ke la forto, kiu efikas al konduktilo, trafluita de kurento en difinita magneta kampo, estas proporcia al kurento kaj al la longo de la konduktilo

$$F \propto I \cdot s$$

El tio rezultas, ke por difinita magneta kampo  $\frac{F}{I \cdot s} = \text{konstanto}$

Tiu konstanto estas taŭga valoro por mezuri la intenson de magneta kampo. Ĝi nomiĝas **magneta kampo B**, kie B estas ĝia formulo simbolo <sup>(15)</sup>.

$$B = \frac{F}{I \cdot s} \quad \text{Por la mezurunuo rezultas} \quad [B] = \frac{1N}{1A \cdot 1m} = 1T \text{ (teslo)}$$

La **teslo** estis nomata honore al serba inĝeniero Nikola Tesla.<sup>(16)</sup>

<sup>15</sup> Foje la magneta kampo B estas nomata **magneta fluksdenso**. La kialo de tiu nomo estos klarigata poste.

<sup>16</sup> Nikola **Tesla** (1856–1943) estis elektroinĝeniero kaj inventisto. Li naskiĝis en Kroatio, tiam parto de Aŭstra imperio, kaj studis inĝenierarton en Graz. En 1884 li elmigris al Usono. Interalie li propagandis utiligon de alterna kurento kaj inventis efikan motoron por ĝi.



### 3 Elektromagneta forto

En eksperimento 8 la longo de la alumina tubeto egalas al  $s = 11 \text{ cm}$ . Mezurpunkto al kiu tre bone proksimiĝas la kompensorekto estas punkto 3, kun  $I = 3,1 \text{ A}$  kaj  $F = 5,0 \text{ mN}$ .

Por la meza magneta kampo <sup>(17)</sup> rezultas  $B = \frac{F}{I \cdot s} = \frac{5,0 \text{ N}}{3,1 \text{ A} \cdot 0,11 \text{ m}} = 15 \text{ mT}$

Videblas, ke kvankam la magneto de eksperimento 8 estas relative forta, ĝia magneta kampo egalas al "nur"  $15 \text{ mT}$ .

Fakte *unu teslo* estas tre granda valoro por magneta kampo. La kampo de la pli fortaj daŭraj magnetoj (NdFeB-magnetoj) egalas al proksimume  $1,5 \text{ T}$ . La tera kampo ĉe ekvatoro egalas al  $3,1 \times 10^{-5} \text{ T}$ .

#### 3.2.4 Kalkulado de elektromagneta forto

Kiam la konduktilo ortas al la kampolinioj de magneta kampo, tiam la forto aganta al la konduktilo trafluita de kurento  $I$ , rezultas el supra formulo:

$$F = B \cdot I \cdot s$$

Kiam la konduktilo ne ortas, necesas determini aŭ la komponanton de la kampo orta al konduktilo, aŭ la komponanton de la longo de konduktilo orta al la kampo. Tiam la forto rezultas:  $F = B \cdot I \cdot s \cdot \sin \alpha$

Kiam  $\alpha = 0^\circ$  la konduktilo estas paralela al la kampo kaj la forto estas nulo.

Kiam  $\alpha = 90^\circ \rightarrow \sin \alpha = 1$  la konduktilo ortas kaj la formulo estas kiel supre.

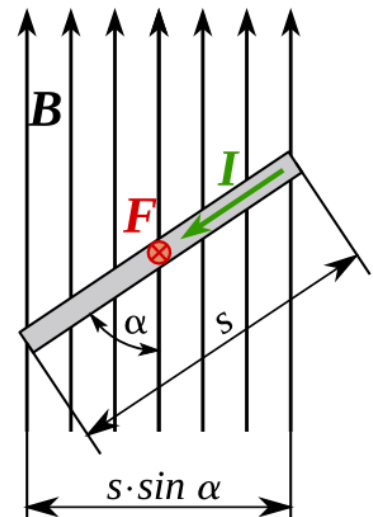


Fig. 119

#### Ekzemplo 30

Proksime de la ekvatoro la tera magneta kampo egalas al cirkaŭ  $30 \mu\text{T}$ .

Kiom grandas tie la forto, kiu efikas al elektra konduktilo longa unu kilometron, en kiu la konstanta kurento egalas al  $1500 \text{ A}$

- kiam la konduktilo direktiĝas laŭlonge la ekvatoro de oriento al okcidento?
- kiam la konduktilo direktiĝas nordorienten kun angulo egala al  $30^\circ$ ?

Solvo

$$B = 30 \mu\text{T} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ T} \quad I = 1500 \text{ A} \quad s = 1000 \text{ m}$$

- $\alpha = 90^\circ \quad F = B \cdot I \cdot s = 3 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot 1500 \text{ A} \cdot 1000 \text{ m} = 45 \text{ N}$  direktita malsupren
- $\alpha = 30^\circ \quad F = B \cdot I \cdot s \cdot \sin \alpha = 3 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot 1500 \text{ A} \cdot 1000 \text{ m} \cdot \sin 30^\circ = 22,5 \text{ N}$  direktita supren

Videblas, ke ankaŭ por grandaj kurentintensoj la forto aganta al konduktiloj troviĝantaj en tera magneta kampo estas malgranda kompare kun la pezoforto. Sed kiam, kiel okazas en konduktiloj de alterna kurento, la direkto de la kurento daŭre ŝanĝiĝas, la elektromagneta forto sufiĉas por produkti osciladon, kiu aŭdeblas kiel zumado.

<sup>17</sup> Ĉar en la regiono, kie troviĝas la konduktilo, la kampo ne estas homogena, la rezulto de la kalkulado estas meza valoro de magneta kampo en tiu regiono.

### 3 Elektromagneta forto

#### Eksperimento 9 - Determino de magneta kampo helpe de konduktanta pendolo

En ĉi tiu eksperimento konduktanta pendolo, farita el dika alumina drato, estas uzata por determini unue la forton agantan en magneta kampo de U-forma magneto, kaj poste la magnetan kampon mem.

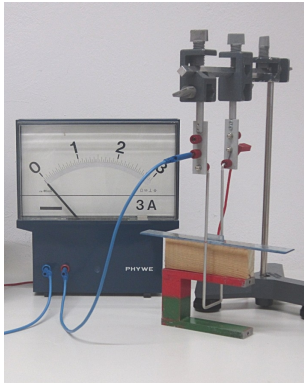


Fig. 121

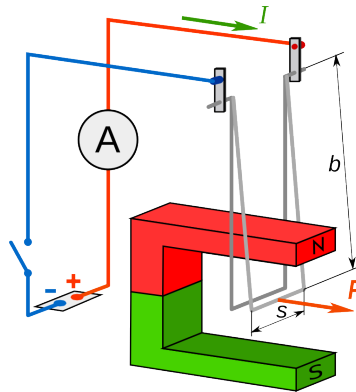


Fig. 122

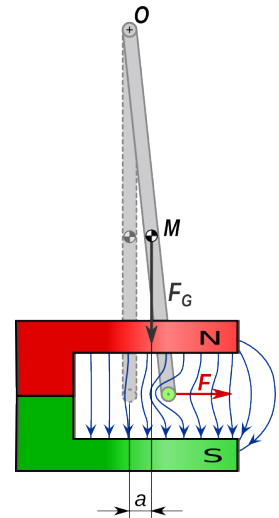


Fig. 120

La maso de la pendolo egalas al  $m = 15 \text{ g}$  kaj la pozicio de la masocentro estas konata.

La parto de pendolo, kiu ortas rilate al la kampolinioj de magneto longas  $s = 4,8 \text{ cm}$  kaj ĝia distanco de la turnopunkto egalas al  $b = 19,5 \text{ cm}$ .

Kiam tra la pendolo fluas kurento kun la direkto desegnita en la figuroj, tiam la pendolo turniĝas kaj la masocentro moviĝas dekstren. Rezultas ke, kiam la kurento egalas al  $I = 2,8 \text{ A}$ , tiam la delokado de masocentro egalas al  $a = 5 \text{ mm}$ .

Rilate al turnopunkto  $O$  la elektromagneta forto produktas tordomomanton  $M_F$  kiu estas ekvilibrigata per la momanto  $M_G$  produktita de la pezoforto.

En ekvilibra pozicio  $M_F = M_G \rightarrow F \cdot b = F_G \cdot a$  <sup>(18)</sup>

La elektromagneta forto egalas al  $F = \frac{F_G \cdot a}{b} = \frac{m \cdot g \cdot a}{b} = \frac{15 \text{ g} \cdot 9,81 \frac{\text{mN}}{\text{g}} \cdot 5 \text{ mm}}{195 \text{ mm}} = 3,8 \text{ mN}$

La meza valoro de la magneta kampo estas  $B = \frac{F}{I \cdot s} = \frac{3,8 \text{ mN}}{2,8 \text{ A} \cdot 0,048 \text{ m}} = 28 \text{ mT}$

La rezulto eltrovita por la meza magneta kampo estas pli granda ol tiu de eksperimento 8, ĉar la parto de pendolo kiu ortas, estas pli mallonga ( $4,8 \text{ cm}$  anstataŭ  $11 \text{ cm}$ ). Pro tio ĝi entute troviĝas en regiono de kampo kun pli granda intenso (vidu Fig. 118).

#### Eksperimento 10 - Bobeno sur poluso de U-forma magneto

Bobeno troviĝas sur unu poluso de U-forma magneto, kiel montras Fig. 123. Kiam oni enŝaltas kurenton, la bobeno estas forpuŝita de magneto kun relative granda forto.

La kialo estas, ke ankaŭ en ĉi tiu okazo, en kelkaj partoj de la bobeno, kurento fluas ordo al la magnetaj kampolinioj. Sekve estiĝas forto orta al la kampo, kaj al la kurento. Tiu forto agas al ĉiu volvo de la bobeno. Ju pli da volvoj la bobeno havas, des pli granda estas la forto.

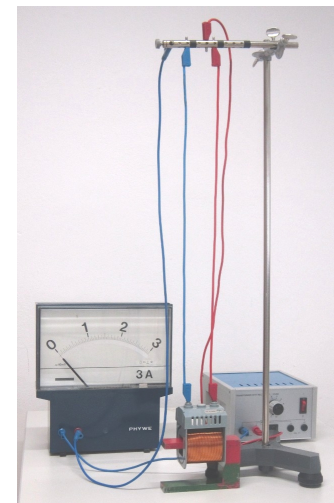


Fig. 123

18 Precize oni devus uzi  $b \cdot \cos \alpha$  kiel levbrako de la forto  $F$  rilate al turnopunkto  $O$ . Sed ĉar la angulo de la rotacio estas tre malgranda,  $\cos \alpha$  estas preskaŭ unu kaj la eraro farita estas neglektebla.

### 3.2.5 Unuopa volvo kaj volvaĵo en magneta kampo

Kurento trafluas la ortangulan volvon kiel montras Fig. 124. La maldekstra latero A-B kaj la dekstra latero C-D estas direktitaj orte al la kampolinioj kaj pro tio estiĝas forto. Kompreneble, ĉar la kurento en la du lateroj havas kon- traŭan direkton, tio validas ankaŭ por la fortoj, kiuj efikas kiel bone videblas en Fig. 125. La supra kaj la suba latero, respektive B-C kaj A-D estas preskaŭ paralelaj al la kampolinioj kaj la forto estas neglektebla.

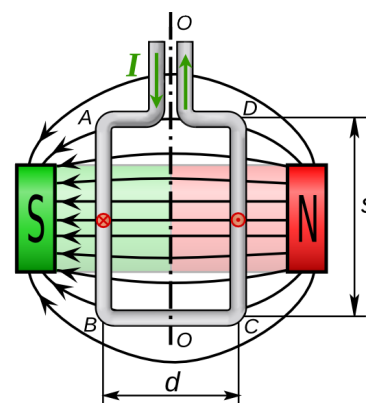


Fig. 124

La du fortoj  $F = B \cdot I \cdot s$  produktas tordomomanton, kiu komence, kiam la volvo troviĝas en la desegnita pozicio de Fig. 125, egalas al  $M_{90} = 2 \cdot F \cdot \frac{d}{2} = F \cdot d = B \cdot I \cdot s \cdot d$

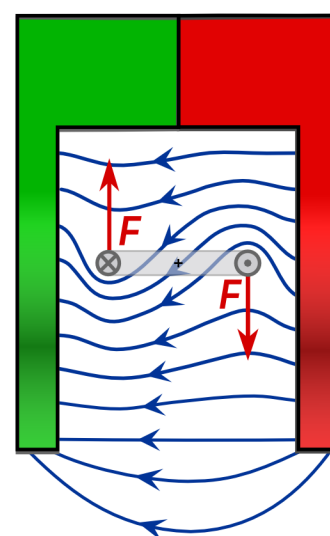


Fig. 125: Vidaĵo de supre

Pro la tordomomanto la maŝo turniĝas ĉirkaŭ la akso O-O (Fig. 124) kaj tio ŝanĝas la levbrakon de la fortoj F, kiu malpliĝas kaj, kiel montras Fig. 126, fariĝas egala al  $d \cdot \sin \alpha$ . Sekve la tordomomanto por iu angulo  $\alpha$  egalas al

$$M_{\alpha} = B \cdot I \cdot s \cdot d \cdot \sin \alpha$$

Rezultas, ke en la prezentita situacio, la maksimume ebla turnangulo egalas al iom malpli ol  $90^{\circ}$ , ĉar kiam  $\alpha = 90^{\circ}$  la levbrako fariĝas nula kaj nedepende de la forto ankaŭ la tordomomanto fariĝas nula.

Kiam en la magneta kampo troviĝas volvaĵo (Fig. 127), tiam la tordomomanto efikas al ĉiuj volvoj de la volvaĵo, kaj sekve por volvaĵo kun N volvoj la maksimuma tordomomanto rezultas

$$M_{\alpha} = N \cdot B \cdot I \cdot s \cdot d \cdot \sin \alpha$$

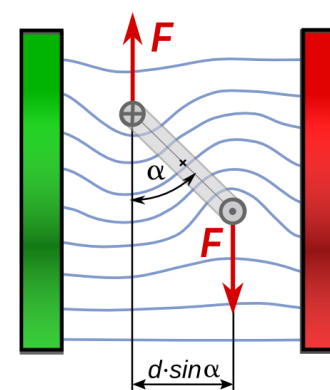


Fig. 126

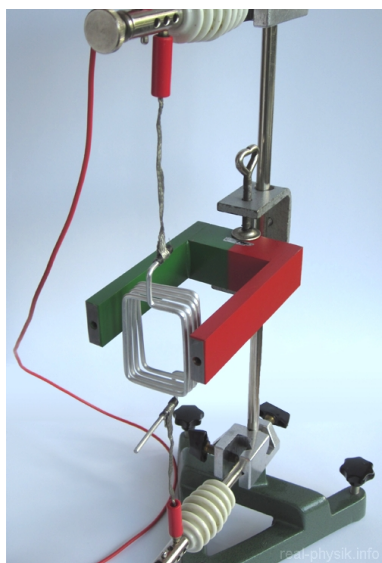


Fig. 127

#### Eksperimento 11

#### Volvaĵo en magneta kampo

Kiam volvaĵo troviĝas en magneta kampo, kiel montras Fig. 127, bone videblas, ke ju pli granda estas la kurento, kiu fluas tra la volvaĵo, des pli ĝi turniĝas.

Sed kiam la turniĝo proksimiĝas al  $90^{\circ}$ , plia altigo de la kurento ne pligrandigas la turnangulon. Fakte, tiam la levbrako de la fortoj fariĝas ĉiam pli malgranda kaj pro tio ankaŭ se la fortoj pligrandiĝas, tio ne eblas por ilia tordomomanto.

### 3.2.6 Forto inter paralelaj konduktiloj trafluataj de kurento

#### Ekspferimento 12 - Forto inter paralelaj konduktiloj

En eksperimento de Fig. 128 la du paralelaj konduktiloj estas konektitaj tiamaniere, ke kiam ili estas konektataj por mallonga tempo (<sup>19</sup>) al baterio, la kurento trafluas ilin en sama direkto. Dum konektado videblas, ke la konduktiloj altiras unu la alian.

Kiam oni ŝanĝas la konektadon en maniero, ke kurento trafluas la du geometrie paralelajn, sed elektre seriajn konduktilojn en kontraŭa direkto, tiam ili forpuŝas unu la alian dum konektado.

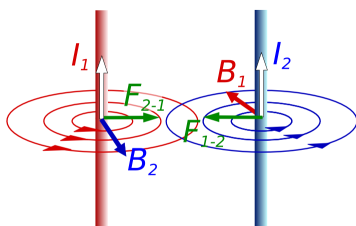


Fig. 130: Unuopaj kampoj de la du konduktiloj

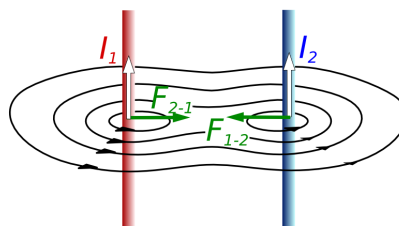


Fig. 129: Rezultanta kampo de la du konduktiloj

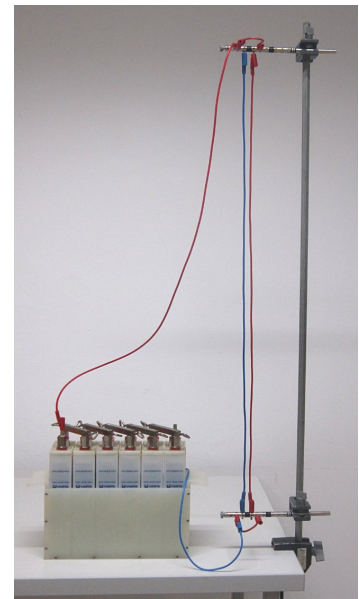


Fig. 128: Paralelaj konduktiloj

Kiam konduktilo troviĝas proksime al alia konduktilo, kaj ambaŭ estas trafluataj per kurento, tiam la unua konduktilo spertas la magnetan kampon de la dua kaj inverse.

Se la konduktiloj estas paralelaj kaj la kurentoj havas saman direkton, la situacio estas tiu prezentita en Fig. 130 kaj Fig. 129. Laŭ la leĝo de la dekstramanaj tri fingroj, la konduktiloj altiras unu la alian.

Se la kurentoj en la konduktiloj estas malsamdirektaj, la situacio prezentiĝas kiel montras Fig. 131 kaj Fig. 132. Laŭ la leĝo de la tri fingroj la konduktiloj forpuŝas unu la alian.

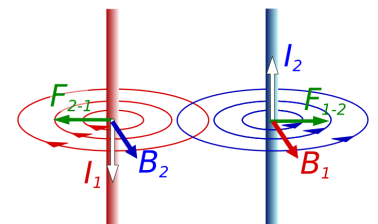


Fig. 131: Unuopaj kampoj de la konduktiloj

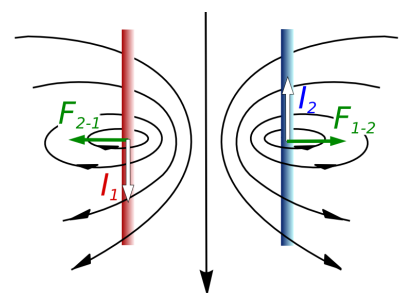


Fig. 132: Rezultanta kampo

### 3.2.7 Difino de la mezurunuo ampero

La forto aganta inter konduktiloj trafluataj de kurento donas eblecon, ligi la elektrajn mezurunuojn al la mekanikaj. Oficiala difino de la unuo ampero estas la sekva:

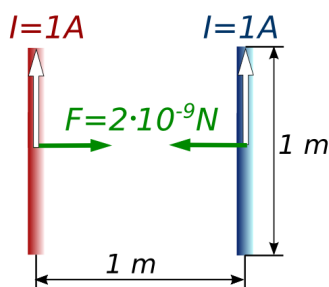


Fig. 133

La **ampero** egalas al tia konstanta elektra kurento, kiu, trafluante du paralelajn, senfine longajn rektajn konduktilojn, kun distanco de 1 metro kaj neglektebla transversa areo, en vakuo, kaŭzas inter tiuj konduktiloj elektromagnetan forton de  $2 \cdot 10^{-9} \text{ N je metro}$ . (Fig. 133)

<sup>19</sup> Necesas konekti la konduktilojn al baterio nur dum tre mallonga tempo, ĉar fakte tio estas kurta cirkvito kaj daŭra alta kurento damaĝas la baterion.

### 3.3 Analogaj kurentmezuriloj

Analogaj kurentmezuriloj (ampermezuriloj) estas tiuj, kiuj indikas la mezuratan valoron helpe de montrilo kaj skalo.

Ekzistas pliaj fizikaj funkcioprincipoj, sur kiuj baziĝas analogaj ampermezuriloj. La plej gravaj nuntempe uzataj estas bazitaj sur la elektromagneta eco de kurento. Ili estas la

- *mezurilo kun turniĝanta bobeno*
- *mezurilo kun moviĝanta fero*

#### 3.3.1 Mezurilo kun turniĝanta bobeno



Fig. 135: Ampermezurilo kun turniĝanta bobeno

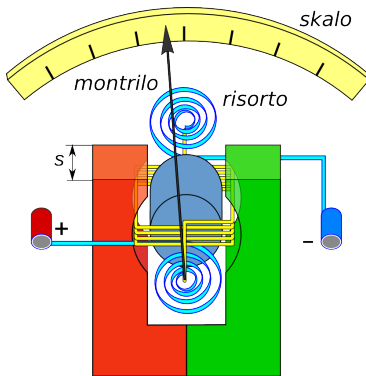


Fig. 137: Ampermetro kun turniĝanta bobeno

En par. 3.2.5 estis priskribita la tordomomanto, kiu efikas al kurento-trafluata bobeno en homogena magneta kampo. La momanto, kaj kun tiu la turnangulo, dependas de la kurent-intenso. Pro tio la principo prezentita estas taŭga por konstrui kurentmezurilon.

Por ebligi al montrilo turniĝi pli ol 90° kaj precipe por eviti la dependecon de la tordomomanto de turnangulo, la bobeno troviĝas sur fera cilindro kaj la polusvostoj estas prilaboritaj kiel montras Fig. 135 kaj Fig. 137.

Tiamaniere la parto de magneta kampo, en kiu troviĝas la bobeno, estas laŭradiusa, la magneta forto agas ĉiam orte al levbrako egala al duona diametro  $d$  (vidu Fig. 136). La tordomomanto fariĝas proporcia al la kurent-intenso, kiu trafluas la bobenon. Tio ebligas linearan skalon. Ĉar la direkto de la forto, kaj sekve de la momanto, dependas de la direkto de la kurento, mezuriloj kun turniĝanta bobeno funkcias nur kun unudirekta kurento. Necesas ankaŭ, ke ili estu ĝuste konektitaj.

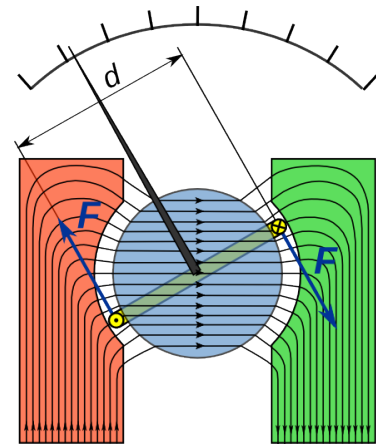


Fig. 136 Bobeno en magnetkampo

#### Ekzemplo 31

La bobeno de ampermetro havas 60 volvojn. Por turni ĝin je 90° necesas momanto egala al  $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}$ . La karakterizaj mezuroj de la mezurilo egalas al  $s = 2 \text{ cm}$  kaj  $d = 2,5 \text{ cm}$ .

Kiom devas grandi la magneta kampo en kiu turniĝas la bobeno, se la kurento egalas al  $0,5 \text{ mA}$ ?

Solvo  $M = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}$      $I = 0,5 \text{ mA}$      $N = 60$      $s = 0,02 \text{ m}$      $d = 0,025 \text{ m}$

$$M = N \cdot B \cdot I \cdot s \cdot d \quad \rightarrow \quad B = \frac{M}{N \cdot I \cdot s \cdot d} = \frac{4,5 \cdot 10^{-6} \text{ Nm}}{60 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot 0,02 \text{ m} \cdot 0,025 \text{ m}} = 0,3 \text{ T}$$



Fig. 134: Analoga mezurilo

### 3.3.2 Mezurilo kun moviĝanta fero

#### Eksperimento 13 - Du feraj stangetoj en bobeno

Du feraj stangetoj troviĝas en kvadrata bobeno iomete klinita. Sen kurento la du stangetoj pro gravito tuŝas unu la alian. Kiam kurento trafluas la bobenon, la supra stangeto estas puŝata supren des pli, ju pli granda estas la kurento (vidu Fig. 138).

Se oni ŝanĝas la nombron de la volvoj de la bobeno videblas ankaŭ, ke la forto pligrandiĝas kiam, kun sama kurento, la nombro da volvoj pligrandiĝas.

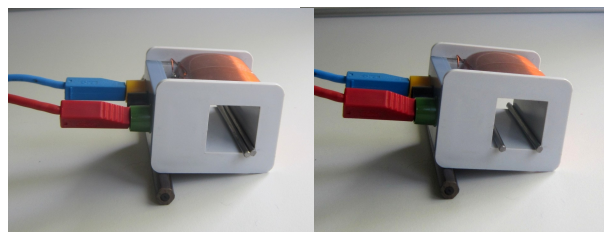


Fig. 138 Bobeno: sen kurento – trafluita per kurento

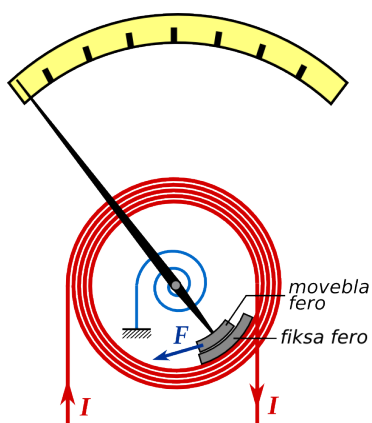


Fig. 139: Principo de ampermetro kun moviĝanta fero

La principo prezentita en eksperimento 13 estas uzata en la ampermezuriloj kun moviĝanta fero. Du pecoj da fero troviĝas ene de fiksa bobeno, tra kiu fluas la mezurenda kurento. Unu el la pecoj estas fiksita al la bobeno, la alia estas fiksita al montrilo (Fig. 139).

Kiel jam estis montrita en par. 3.2.1, kurento tra la bobeno produktas magnetan kampon, per kiu la fero-pecoj estas magnetataj en sama direkto. Sekve la samnomaj polusoj de la fero-pecoj troviĝas unu proksime al la alia, kaj pro tio ili forpuŝas unu la alian.

Ĉi tiu tipo de mezurilo funkcias kaj por unudirekta kurento kaj por alterna kurento (kontraste al la mezurilo

kun moviĝanta bobeno). Nedepe de la direkto de la kurento, la magnetado de la fero-pecoj estas ĉiam samdirekta, kaj la pecoj forpuŝas unu la alian. Je alterna kurento la direkto de magnetado daŭre ŝanĝiĝas kaj pro tio la efiko estas malpli granda ol por unudirekta kurento. Sekve por la du tipoj de kurento ne- cesas aparta skalo.

La forpuŝanta forto inter la feroj dependas ne nur de la kurento, sed ankaŭ de la distanco inter la feroj mem. Kiam la distanco pligrandiĝas, la forto malgrandiĝas. Pro tio ne eblas

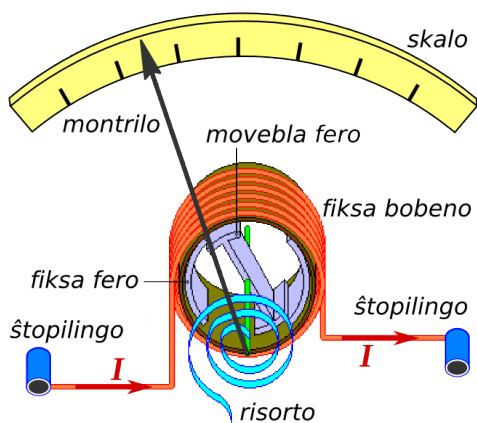


Fig. 141

konstrui tiujn mezurilojn kun lineara skalo. Ili havas difinitan intervalon, ene de kiu ili precize mezuras.

Ekzemple la mezurilo de Fig. 140, precize mezuras alternan kurenton inter 5 A kaj 25 A. La mezurilo de Fig. 142 relative precize mezuras inter 2 A kaj 10 A.

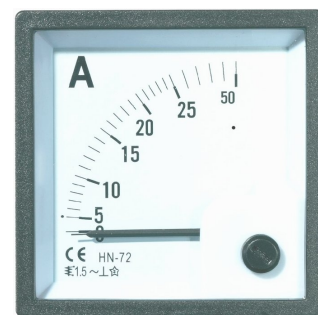


Fig. 140

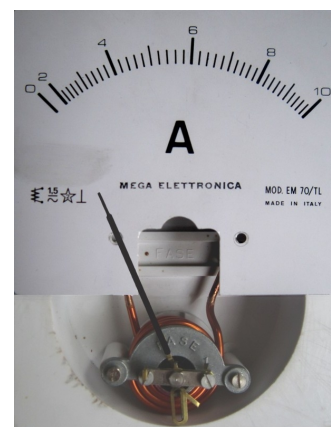


Fig. 142

### 3.4 Elektraĵaj motoroj

#### 3.4.1 Motoroj por unudirekta kurento

La principo ilustrita en paragrafo 3.2.5 tute taŭgas por konstrui elektran motoron. Sufiĉas trovi ilon, kiu inversigas la direkton de la kurento en la volvo ĝuste dum tiu momento, en kiu la ebena de la volvo estas orta al la kampolinioj, kaj la torda momento estas nula. Se tio sukcesas, la momento efikas daŭre al la sama direkto kaj la volvo turniĝas (vidu Fig. 143).

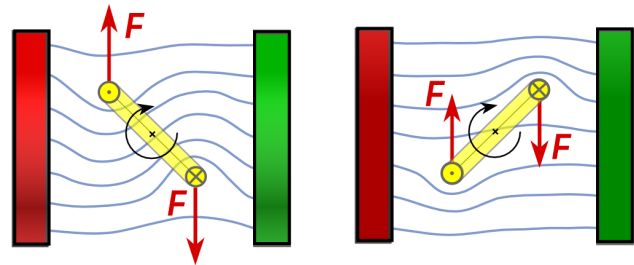


Fig. 143

Oni realigas la aferon helpe de fendita kolekta ringo kies duonoj estas izolitaj unu de la alia (Fig. 144). Kiam la volvo troviĝas en orta pozicio, tiam la kontakt-brosoj pasas de unu duono de la kolekta ringo al alia (Fig. 145). Tiamaniere la kurento en la volvo estas inversigata kaj sekve la torda momento daŭras en sama direkto.

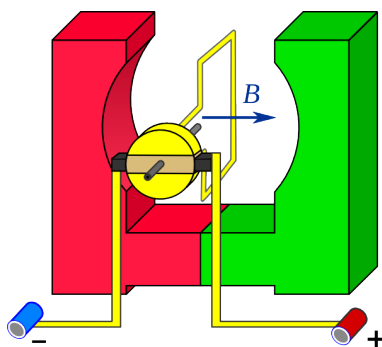


Fig. 145

La torda momento, kiu efikas al la volvo, ne estas konstanta. Ĝia valoro estas maksimuma, kiam la ebena de la volvo estas paralela al la kampolinioj (Fig. 146) kaj nula, kiam ĝi estas orta al la kampolinioj.

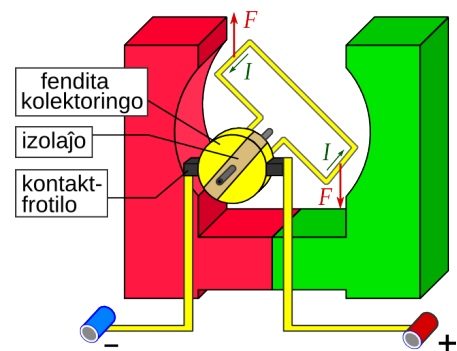


Fig. 144

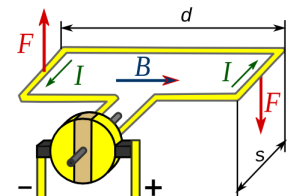


Fig. 146

La maksimuma momento egalas al  $M_{maks} = 2 \cdot F \cdot \frac{d}{2} = F \cdot d = B \cdot I \cdot s \cdot d$

Por pliiĝi la momanton necesas uzi volvaĵon kun sufiĉe da volvoj. Tiam la formulo por la maksimuma momento rezultas  $M_{maks} = N \cdot B \cdot I \cdot s \cdot d$  kie  $N$  estas la nombro da volvoj de la volvaĵo. Praktike en kazo de volvaĵo la formulo ne precize validas, ĉar la volvoj de la volvaĵo ne ĉiuj troviĝas super la rotacia akso.

Por pligrandigi la magnetan kampon ene de la volvaĵo, ĝi estas volvita sur feran kernon. La tuto nomiĝas rotor.

Fig. 147 montras alian klarigadon pri la kialo de la movo kaj la neceso de inversigilo. Kiam kurento trafluas la volvaĵon, la fera kerno fariĝas magnetata. Kiam la kerno estas paralela al la kampolinioj (horizontala) necesas inversigi la kurenton, ĉar nur tiam samnombraj polusoj troviĝas malproksime unu al alia kaj do forpuŝas unu la alian.

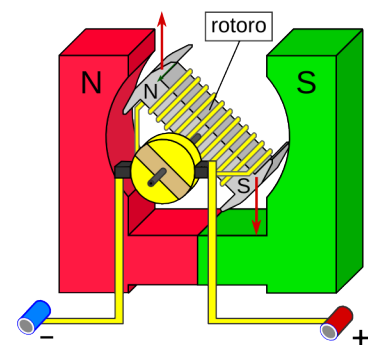


Fig. 147

### 3.5 Magneta kampo de bobeno - magneta permeablo

#### 3.5.1 Kampo de bobeno

##### Eksperimento 14 - Magneta kampo de bobeno

Malgranda daŭra magneto estas pendigita al fortmezurilo super bobeno (vidu Fig. 148 ). Kiam la kurento tra la bobeno estas nula, tiam la fortmezurilo indikas la pezo-forton de la magneto, kiu egalas al 0,195 N.

Kiam oni enŝaltas kurenton, tiam estiĝas magneta kampo kaj la bobeno, depende de la kurentodirekto, altiras aŭ forpuŝas la magneton. Por faciligi la mezuradon prefereblas direkti la kurenton tiamaniere, ke la bobeno altiras la magneton.

Per la fortmezurilo eblas mezuri la forton, per kiu la bobeno altiras la magneton. La eksperimento estas ripetata por diversaj valoroj de kurento. Por preciza mezuro, oni devas kontroli, ĉu la magneto estas ĉiufoje en la sama pozicio.

La valoroj, trovitaj per bobeno, kiu havas 1200 volvojn, estas notitaj en Tab. 7. Eblas desegni diagramon de Fig. 149. El diagramo rezultas, ke kompensorekto bone proksimiĝas al la mezurpunktoj.

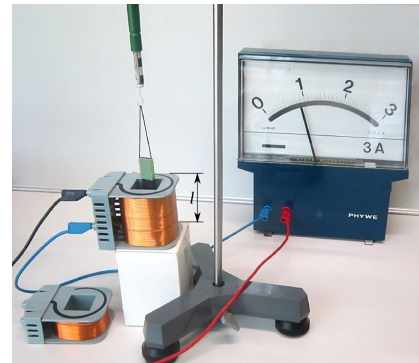


Fig. 148: Bobeno altiras magneton

MP	$I$ [A]	$F_T$ [N]	$F_B$ [mN]
0	0	0,195	0,0
1	0,3	0,240	45,0
2	0,6	0,280	85,0
3	0,9	0,330	135,0
4	1,2	0,375	180,0
5	1,5	0,420	225,0

Tab. 7

El eksperimento 14 rezultas, ke la forto, kiu efikas al la magneto, estas proporcia al kurento  $F \propto I$

El aliaj similaj eksperimentoj, kie la nombro de volvoj de la bobeno  $N$  kaj la longo de la bobeno  $l$ , estas ŝanĝitaj, rezultas, ke por difinita kurento, la forto estas proporcia al la nombro da volvoj kaj inverse proporcia al la longo de la bobeno  $F \propto \frac{N}{l}$

Ĉar, kiel jam estis montrita en par. 3.2.3, la magneta kampo estas proporcia al la forto efektivigata per ĝi, validas ankaŭ por la kampo de la bobeno  $B \propto F$  kaj fine  $B \propto I \cdot \frac{N}{l}$

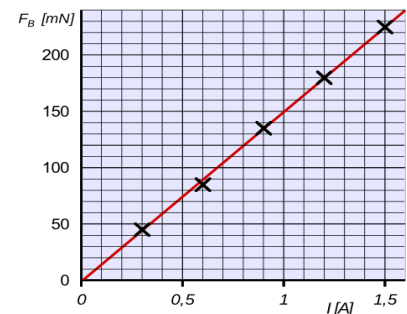


Fig. 149

Se oni enmetas feran bloketon en la bobenon de eksperimento 14, videblas, ke la forto fariĝas ege pli granda. Tio klare montras, ke la medio, kiu troviĝas en kaj ĉirkaŭ la bobeno influas la intenson de magneta kampo. La fakto estas konsiderata per taŭga koeficiento, kiu nomiĝas magneta **permeablo**  $\mu$ .

La fina formulo por la magneta kampo  $B$  interne de bobeno trafluita de la kurento  $I$ , kun  $N$  volvoj kaj longo egala al  $l$  estas:  $B = \mu \cdot I \cdot \frac{N}{l}$

La formulo precize validas nur, se la longo de la bobeno estas multe pli granda ol ĝia diametro. Aliffoje necesas korekto-faktoro.

La signifo de la permeablo  $\mu$  estos klarigata en la sekva paragrafo.



### 3.5.2 Magneta permeablo

La magneta permeablo  $\mu$  estas koeficiento, kiu priskribas, kiel materio influas la magnetan kampon.

La **absoluta permeablo**  $\mu$  konsistas el du koeficientoj  $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$

$\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ Tm/A} = 1,2566 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$  estas la **magneta konstanto**. Ĝi egalas al absoluta permeablo de vakuo.

$\mu_r$  estas la **relativa permeablo**. Ĝi indikas kiom grandas la magneta kampo en iu difinita medio rilate al vakuo. La relativa permeablo estas pura nombro sen unuo. Por kelkaj materialoj ĝia valoro troviĝas en Tab. 8.

Materialoj estas klasifikeblaj laŭ sia magneta permeablo. Ili estas *diamagnetaj*, kiam la permeablo estas iomete malpli granda ol unu kaj *paramagnetaj* kiam ĝi estas iomete pli granda ol unu. Por diamagnetaj kaj paramagnetaj materialoj la permeablo estas konstanto.

Por *feromagnetaj* materialoj la valoro de la permeablo estas tre granda kaj fakte nur tiuj materialoj signife influas la magnetan kampon. Sed kontraŭe al la aliaj, ĉe ili la permeablo varias, depende de la intenso de magneta kampo kaj de ĝia frekvenco.

relativa permeablo $\mu_r$		
materialo	speco	$\mu_r$
akvo	diamagneta	0,9999920
kupro	diamagneta	0,9999936
hidrogeno	diamagneta	1,0000000
vakuo	neutra	1
aero	paramagneta	1,0000004
aluminio	paramagneta	1,0000022
kobalto	feromagnetaj	80....200
fero	feromagnetaj	300....10.000
ferito	feromagnetaj	4....15.000
Permalloy	feromagnetaj	8....100.000
Mu-metallo	feromagnetaj	20.000....140.000

Tab. 8

#### Ekzemplo 32

La cilindra bobeno de Fig. 150 longas 11 cm kaj havas 440 volvojn. Ĝi estas trafluata de kurento  $I = 1,5 \text{ A}$ . La ortangula volvaĵo pendas tra la volvoj de la cilindra bobeno. Ĝi havas 20 volvojn kaj ĝia mallonga latero longas 6 cm.

- Kiom grandas la magneta kampo interne de la cilindra bobeno kiu troviĝas en aero?
- Kiom da kurento necesas en la ortangula volvaĵo, por ke la forto aganta al ĝi egalas al 4 mN?

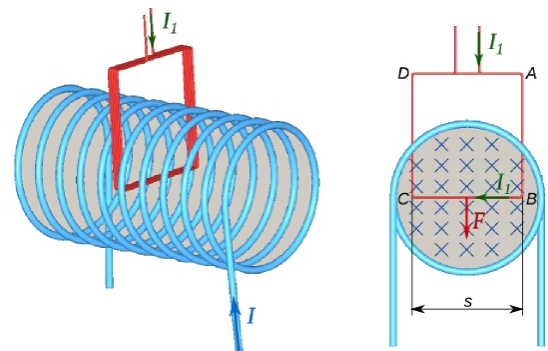


Fig. 150

Solve  $N = 440$   $\mu_r = 1$   $l = 11 \text{ cm}$   $I = 1,5 \text{ A}$   $N_1 = 20$   $s = 6 \text{ cm}$   $F = 4 \text{ mN}$

$$a) \quad B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{N}{l} = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 1 \cdot 1,5 \text{ A} \cdot \frac{440}{0,11 \text{ m}} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ T} = 7,6 \text{ mT}$$

$$b) \quad I_1 = \frac{F}{N_1 \cdot B \cdot s} = \frac{4 \text{ mN}}{20 \cdot 7,6 \text{ mT} \cdot 0,06 \text{ m}} = 0,44 \text{ A} = 440 \text{ mA}$$

### 3.6 Forto aganta al moviĝanta ŝargo - Lorenc a forto

En paragrafo 3.2.4 estis montrita, ke al konduktanto, trafluita per elektra kurento, kiu troviĝas en magneta kampo efikas la forto  $F = B \cdot I \cdot s$  kiam la konduktanto estas direktita orte al la kampolinioj.

La kurento dependas de la kvanto da elektra ŝargo  $Q$ , kiu trafluas ĉiun sekcion de la konduktanto.

$$I = \frac{Q}{t}$$

Se la ŝargoj moviĝas kun rapido  $v$ , la tempo bezonata por trairi la distancon  $s$  egalas al  $t = \frac{s}{v}$  kaj la kvanto da

ŝargo kiu troviĝas ene de la kampo egalas al  $Q = I \cdot t = \frac{I \cdot s}{v}$

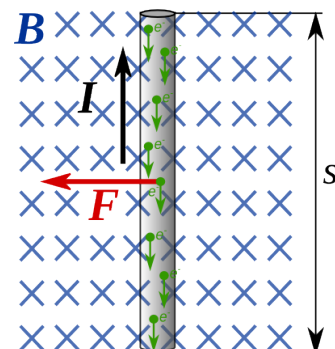


Fig. 151

$$\rightarrow I = \frac{Q \cdot v}{s}$$

Sekvas por la forto  $F = B \cdot \frac{Q \cdot v}{s} \cdot s \rightarrow F = B \cdot Q \cdot v$

La formulo validas kiam la rapido estas direktita orte al la kampolinioj.

La forto estas nomata **lorenca forto** aŭ forto de **Lorentz** honore al fizikisto H. Lorentz <sup>(20)</sup>

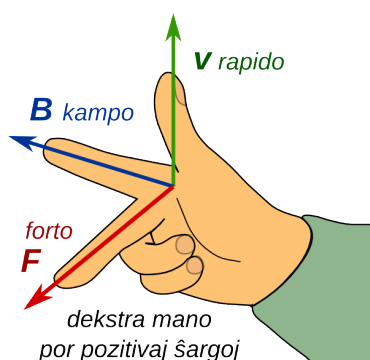


Fig. 153

Gravas observi, ke kiam la moviĝantaj ŝargoj estas pozitivaj, validas la regulo de la tri fingroj de la dekstra mano kiel montrita en Fig. 153.

Se la moviĝantaj ŝargoj estas negativaj (ekzemple elektronoj), necesas uzi la maldekstran manon (Fig. 152) aŭ inversigi la direkton de la rapido.

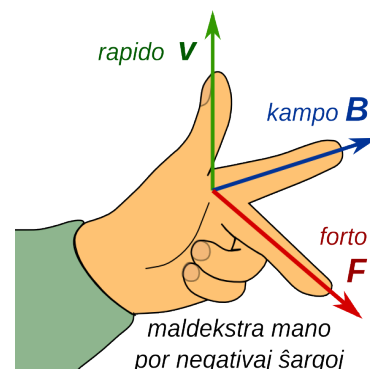


Fig. 152

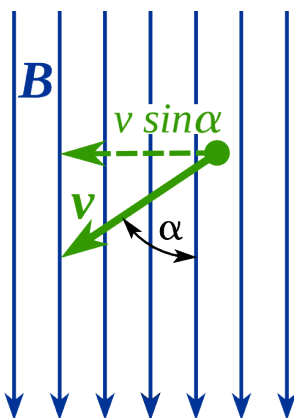


Fig. 154

Se la direkto de la rapido ne estas orta al la kampolinioj, necesas konsideri nur la ortan komponanton.

$$F = B \cdot Q \cdot v \cdot \sin \alpha$$

Kiam la ŝargo moviĝas paralele al la kampolinioj ( $\alpha = 0^\circ$  aŭ  $\alpha = 180^\circ$ ) la forto estas nul kaj la ŝargo daŭrigas sian movon sen akcelo.

Kiam la rapido de la ŝargo estas tute orta al la kampolinioj, tiam ĝia irejo fariĝas arka; kiam ĝi estas klinita, tiam la ŝargo moviĝas spirale ĉirkaŭ la kampolinioj.

<sup>20</sup> Hendrik Antoon **Lorentz** (1853-1928) estis nederlanda teoria fizikisto, kiu, kune kun Pieter Zeeman, ricevis Nobel-premion pri fiziko pro la elektrona teorio, kiu iĝis elira punkto de la speciala relativeca teorio de Albert Einstein.

### 3.6.1 Defleksado de moviĝanta ŝargo en magneta kampo

Kiam elektra ŝargo moviĝas en magneta kampo orte al la kampolinioj, tiam al la ŝargo efikas la lorencan forton, kiu estas direktita orte kaj al la rapido, kaj al la kampo mem. En ĉapitro pri centra forto, estis klarigita ke, kiam forto agas orte al la rapido, ĝi produktas alcentran akcelon kaj la irejo fariĝas arkoforma.

Fig. 155 montras la situacion por elektrono, kiu eniras magnetan kampon  $B$  kun rapido  $v$  orta al la kampolinioj. La ŝargo egalas al elektrona ŝargo.

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

La lorencan forton fariĝas alcentra forto.

$$F_L = F_c \quad \rightarrow \quad B \cdot e \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

Sekvas, ke ene de la kampo la irejo de la elektrono estas arko, kies radiuso egalas al:

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot e} \quad \hat{\text{Generale por iu partiklo kun ŝargo } Q \text{ la radiuso estas } r = \frac{m \cdot v}{B \cdot Q}$$

La direkto de kurbiĝo obteneblas per la reguloj de la tri fingroj priskribitaj supre.

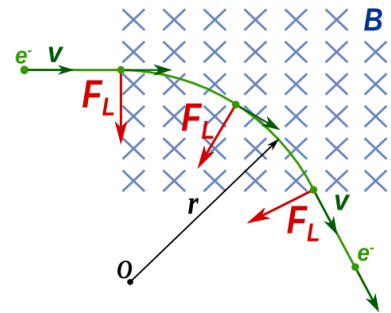


Fig. 155: Elektrono en magneta kampo

### 3.6.2 Katodradia tubo

Katodradia aŭ elektronfaska tubo estas vakua vitra vazo, en kiu estas generata fasko da elektronoj, kiujn eblas deviigi helpe de elektra kaj magneta kampo.

Ĝis la enkonduko de plataj ekranoj (LCD aŭ LED) elektronfaskaj tuboj estis uzataj en mezuriloj (ekz. osciloskopo kaj radaro) kaj en televidiloj.

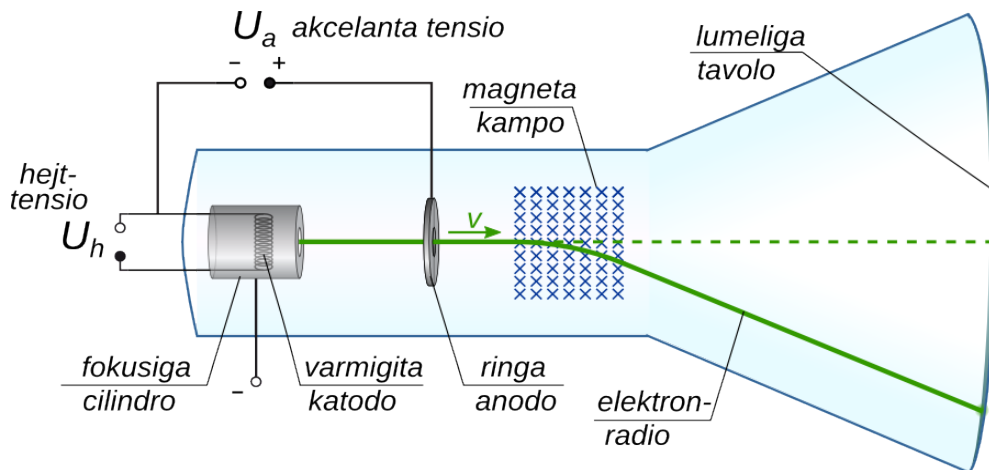


Fig. 156: Simpla skemo de katodradia tubo

Simpligita funkcioprincipo estas la prezentita en Fig. 156. Per la konektita hejttensio  $U_h$  la fadeno de la katodo (negativa elektra poluso) estas ardigata. Pro tio sufiĉe da elektronoj forlasis la metalon kaj estas akcelataj per la elektra kampo kreita de akcelanta tensio  $U_a$  inter la katodo kaj la ringa anodo (pozitiva elektra poluso). Por faskigi la elektronojn en mallarĝan elektronradion, la katodo estas ĉirkaŭita per cilindroforma negativa elektrodo (Wehnelt-cilindro).

Inter la katodo kaj la ringa anodo elektronoj estas akcelataj per elektra kampo. La tuta elektra energio transformiĝas en kineta energio de la elektronoj.

### 3 Elektromagneta forto

Ĝenerale validas  $U = \frac{E_{el}}{Q}$ . Por elektronoj akcelataj per tensio  $U_a$  rezultas  $E_{el} = U_a \cdot e$

$$E_{kin} = E_{el} \quad \rightarrow \quad \frac{m_e \cdot v^2}{2} = U_a \cdot e \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot U_a \cdot e}{m_e}}$$

Ekzemple, se la akcelanta tensio egalas al  $U_a = 400 \text{ V}$  la rapido, kiun atingas la elektronoj ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ) egalas al  $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \text{ V} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 11,9 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

La rapido de la elektronoj fariĝas tiel granda, ke ili trapasas la truon en la centro de la anodo kaj atingas la ekranon kie ili eligas lumon.

En la katodradia tubo de Fig. 157 inter la anodo kaj la ekranon, flanke de la tubo troviĝas bobenoj, kiuj produktas magnetan kampon, kiu devias la elektronfaskon.

La tuta devio de la elektronfasko videbla sur la ekranon dependas de la rapido de la elektronoj, de la magnetika kampo kaj de la dimensioj de la tubo.

Dum movo ene de la kampo al elektrono efektiva la lorenci forto, kiu funkcias kiel alcentra forto. Pro tio la irejo de la elektronoj fariĝas arkoforma. Kun rilato al la mezuroj indikitaj en Fig. 158 rezultas:

$$F_C = F_L \quad \rightarrow \quad \frac{m \cdot v^2}{r} = B \cdot e \cdot v$$

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot e} = \frac{m}{B \cdot e} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot e}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m}{e \cdot B^2}}$$

$$\sin \alpha = \frac{x_1}{r} \quad \rightarrow \quad \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{x_1}{r}\right)$$

$$y_1 = r \cdot (1 - \cos \alpha) \quad y_2 = x_2 \cdot \tan \alpha$$

Fine, la tuta devio egalas al  $y = y_1 + y_2$

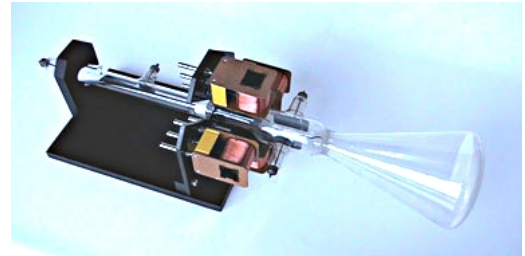


Fig. 157 Eksperimenta katodradia tubo

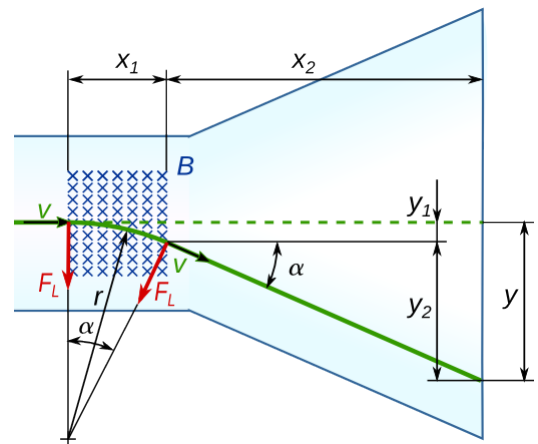


Fig. 158

#### Ekzemplo 33

La mezuroj de la eksperimenta tubo de Fig. 157 egalas al  $x_1 = 3,0 \text{ cm}$  kaj  $x_2 = 35,0 \text{ cm}$ . La bobenoj flanke, supre kaj malsupre de la tubo longas  $6,0 \text{ cm}$  havas po 600 volvojn.

Kiom grandas la tuta devio, se la akcelanta tensio egalas al  $320 \text{ V}$  kaj la kurento tra la bobenoj egalas al  $30 \text{ mA}$ .

**Solvo**  $N = 600$   $l = 6 \text{ cm}$   $I = 0,03 \text{ A}$   $U = 320 \text{ V}$   $x_1 = 3,0 \text{ cm}$   $x_2 = 35,0 \text{ cm}$

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot \frac{N}{l} = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 1 \cdot 0,03 \text{ A} \cdot \frac{600}{0,06 \text{ m}} = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 0,38 \text{ mT}$$

$$r = \sqrt{\frac{2 \cdot U \cdot m}{e \cdot B^2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 320 \text{ V} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot (0,38 \cdot 10^{-3} \text{ T})^2}} = 0,159 \text{ m} \quad \alpha = \sin^{-1}\left(\frac{x_1}{r}\right) = 10,8^\circ$$

$$y_1 = r \cdot (1 - \cos \alpha) = 0,28 \text{ cm} \quad y_2 = x_2 \cdot \tan \alpha = 6,68 \text{ cm} \quad y = y_1 + y_2 = 6,96 \text{ cm}$$

### 3.7 Ekzemploj

#### Ekzemplo 34

Ene de magneta kampo egala al  $3,2 \text{ mT}$  estas generata elektronfasko, kies direkto estas orta al la kampolinioj. La irejo de la fasko fariĝas cirkla, kun radiuso egala al  $2 \text{ cm}$  (Fig. 159).

- Kiom grandas la rapido de la elektronoj?
- Kiom grandas la tensio, kiu akcelas la elektronojn?

Solve  $Q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$       $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$   
 $B = 3,2 \text{ mT}$       $r = 2 \text{ cm}$

- Lorenca forto fariĝas centra forto

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = e \cdot B \cdot v \quad \rightarrow \quad v = \frac{r \cdot e \cdot B}{m} = \frac{0,02 \text{ m} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ T}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 1,13 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Elektra energio fariĝas kineta energio

$$U_a \cdot e = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad \rightarrow \quad U = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot e} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (1,13 \cdot 10^7 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 360 \text{ V}$$

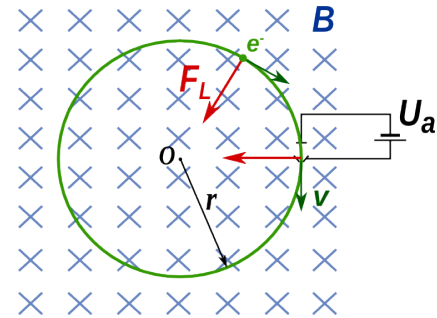


Fig. 159

#### 3.7.1 Solvendaj problemoj

- Rektangula volvaĵo simila al tiu de Fig. 127 ( $d = 10 \text{ cm}$ ,  $s = 12 \text{ cm}$ ) kun 40 volvoj troviĝas en magneta kampo de  $0,25 \text{ T}$ .

Kiom grandas la kurento en la volvaĵo, se oni mezuras tordomomanton egala al  $0,24 \text{ Nm}$ , kiam la akso de la volvaĵo orta al la kampolinioj?

- En regiono proksima al ekvatoro, kie la tera magneta kampo egalas al  $30 \mu\text{T}$ , kompasso troviĝas en bobeno longa  $6 \text{ mm}$  kun 7 volvoj (vidu Fig. 160). Sen kurento la nadlo estas orta al la bobena akso.

Kiom devas grandi la kurento en la bobeno, por ke la nadlo de la kompasso estu deturnata je  $45^\circ$ ?

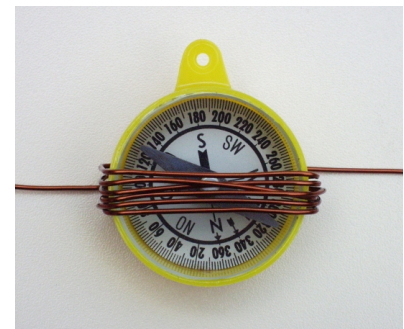


Fig. 160

- Alfa partiklo ( jono  $\text{He}^{2+}$   $Q = 2e = +3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   $m = 6,6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ) eniras homogenan magnetan kampon egala al  $50 \text{ mT}$  . Ene de la kampo la partiklo sekvas arkoforman irejon kun radiuso egala al  $12 \text{ cm}$ .

Kiom grandas ĝia rapido?

#### Respondoj

- La kurento egalas al  $2 \text{ A}$ .
- Kiam la nadlo estas deturnata je  $45^\circ$  la magneta kampo kreita per la volvaĵo devas egali al la tera magneta kampo. Por tio necesas kurento egala al  $0,20 \text{ A}$  en la volvaĵo.
- La rapido egalas al  $291 \text{ km/s}$ .

## 4 Elektromagneta indukto

### 4.1 Indukto en movataj konduktantoj

#### Eksperimento 15 - Movata balancilo

Al la konduktanta balancilo de eksperimento 5 de ĉapitro 3 anstataŭ tensiofonto kaj ampermezurilo estas konektita tre sentema voltmezurilo (Fig. 161).

Kiam oni movas la aluminian tubeton dekstren aŭ maldekstren, videblas, ke la mezurilo indikas tension.

La kialo de la tensio produktita en eksperimento 15 estas klarigebla helpe de la lorencan forto (vidu par. 3.6).

Kiam konduktanto moviĝas en magneta kampo, tiam moviĝas ankaŭ la ŝarĝoj en la konduktanto. Se la movo de la ŝarĝoj estas orta al la kampolinioj, tiam al la ŝarĝoj efikas la lorencan forto egala al  $F_L = B \cdot Q \cdot v$ .

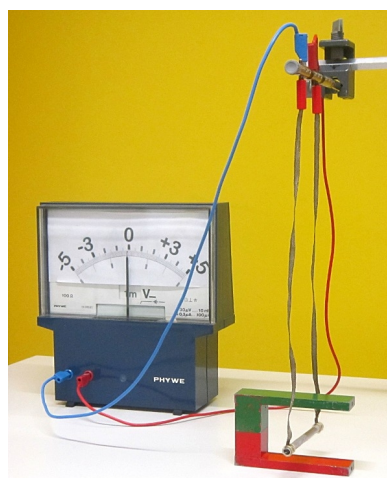


Fig. 161 Konduktanta balancilo

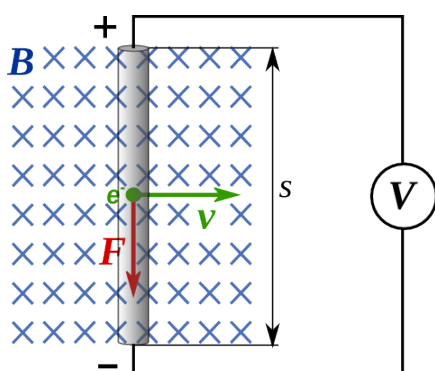


Fig. 162

La situacio estas prezentata en Fig. 162. Se oni rigardas elektronojn, tiam necesas uzi la regulon de la tri fingroj kun la maldekstra mano. Kiam la tubeto estas movata dekstren, la elektronoj estas puŝataj malsupren per la lorencan forto. Sekve la malsupra vosto fariĝas elektre negativa, kaj pro manko de elektronoj la supra vosto fariĝas elektre pozitiva.

Por forŝovi la elektronojn de la supra al la malsupra ekstremaĵo estas farata laboro, kiu por la tuta ŝarĝo  $Q$  egalas al  $W = F_L \cdot s = E_{el} = B \cdot Q \cdot v \cdot s$ . Tiu laboro fariĝas elektra energio enhavata en la ŝarĝo.

Por la elektra tensio validas ĝenerale  $U = \frac{E_{el}}{Q}$

Por la moviĝanta tubeto sekvas  $U = \frac{B \cdot Q \cdot v \cdot s}{Q} = B \cdot v \cdot s$

Ĝenerale rezultas, ke, kiam konduktanto kun longo egala al  $s$  moviĝas ofte al la kampolinioj de magneta kampo  $B$ , inter la du ekstremaĵoj de la konduktanto estiĝas tensio egala al

$$U = B \cdot v \cdot s .$$

Se la movo de konduktanto okazas laŭ direkto, kiu inkludas anglon  $\alpha$  kun la kampolinioj (Fig. 163), la tensio induktata egalas al  $U = B \cdot v \cdot s \cdot \sin \alpha$ .

Rezultas, ke tensio estas induktata nur, se la konduktanto dum sia movo, "tranĉas" kampoliniojn.

Se anstataŭ ununura konduktanto moviĝas bobeno kun  $N$  volvo, tiam la tensio, kiu estiĝas en la apartaj pecoj de konduktanto sumiĝas, kaj la tuta induktata tensio, kiam la movo estas orta al la kampolinioj, fariĝas  $U = N \cdot B \cdot v \cdot s$ .

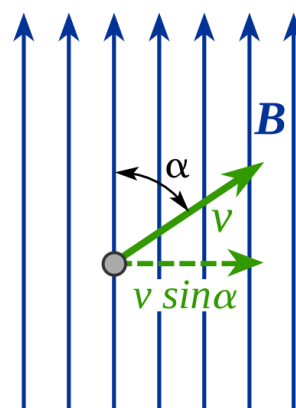


Fig. 163

4.1.1 Indukto en rotacianta volvo

Kiam ortangula konduktilvolvo turniĝas en magneta kampo, kun la turnakso orta al la kampolinioj (vidu Fig. 164), tiam la lateroj AB kaj CD tranĉas kampoliniojn. Se la turnofrekvenco estas  $f$ , la rapido, kun kiu la lateroj moviĝas, egalas al  $v = d \cdot \pi \cdot f$ .

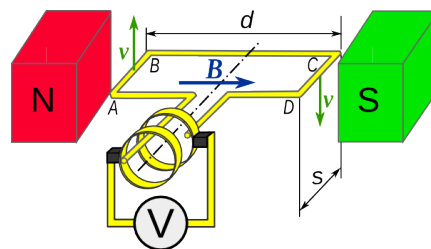


Fig. 164

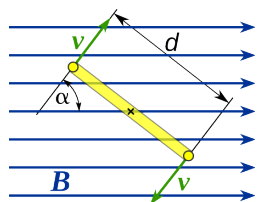


Fig. 165

Dum la movo la angulo  $\alpha$  inter la direkto de la rapido kaj la kampolinioj ŝanĝiĝas (vidu Fig. 165).

En la lateroj AB kaj CD estas induktata tensio, kiu sumiĝas. Fakte la rapidoj de AB kaj CD havas kontraŭan direkton kaj pro tio, la ŝarĝoj ene de la volvo estas puŝataj en sama vojdirekto. La induktata tensio en ĉiu momento egalas al

$$U = 2 \cdot B \cdot v \cdot s \cdot \sin \alpha = 2 \cdot B \cdot d \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot \sin \alpha$$

En ortangula konduktilvolvo, rotacianta en homogena magneta kampo, estas induktata alterna tensio, kies valoro daŭre ŝanĝiĝas. La maksimuma valoro egalas al

$$U_{maks} = 2 \cdot B \cdot d \cdot \pi \cdot f \cdot s$$

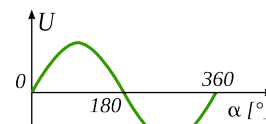


Fig. 166

Ekzemplo 35

Konduktanta volvo simila al tiu de Fig. 164 kun  $d = 4,5 \text{ cm}$  kaj  $s = 5,0 \text{ cm}$  rotacias en magneta kampo kun intenso egala al  $30 \text{ mT}$ .

Kiom devas grandi la turnofrekvenco, por ke la maksimuma induktata tensio egalu al  $5 \text{ mV}$ ?

Solve  $B = 30 \text{ mT} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ T}$      $d = 4,5 \text{ cm}$      $s = 5,0 \text{ cm}$      $U_{maks} = 5 \text{ mV} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

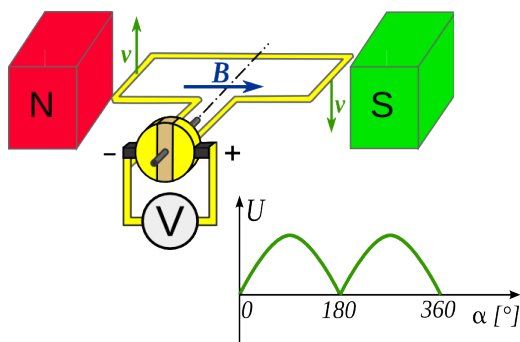


Fig. 167

Tiamaniere la produktata tensio estas unudirekta kvankam ne konstanta sed pulsanta (Fig. 167).

Por produkti pli konstantan unudirektan tension oni fendas la kolektoringon plurfoje, kiel montras Fig. 168. Tiamaniere la tensio fariĝas des pli glata, ju pli granda estas la nombro da fendoj.

Supre estas montrita, ke la tensio induktata en rotacianta volvo estas alterna, ĝia direkto ŝanĝiĝas post ĉiu duona rotacio (Fig. 166).

Se oni celas produkti unudirektan tension, tio eblas, uzante, anstataŭ la du apartaj kolektoringoj, ununuran fenditan kolektoringon, egala al tiu uzata por la elektra motoro.

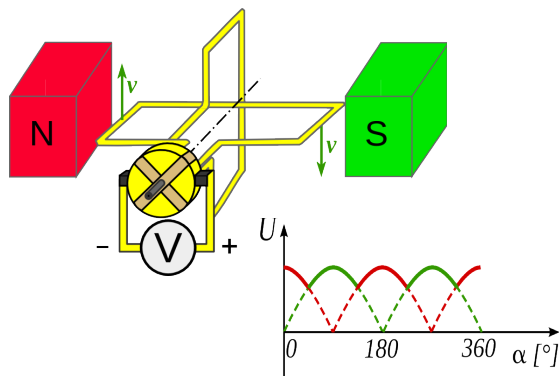


Fig. 168

## 4.2 Elektromagneta indukto kaj magnetaj flukso

### Eksperto 16 - Ekzemploj de elektromagneta indukto

En Fig. 169 estas prezentitaj kvar eksperimentoj, en kiuj okazas elektromagneta indukto en bobeno, helpe de daŭra U-forma magneto. En eksperimento a) magneto estas proksimigata al la bobeno forigata de la bobeno, en eksperimento b) la bobeno estas proksimigata al la bobeno forigata de la magneto. En eksperimento c) la magneto rotacias antaŭ la bobeno kaj en eksperimento d) la bobeno estas turnata super la magneto. En ĉiuj tiuj eksperimentoj la kaŭzo de indukto estas movo.

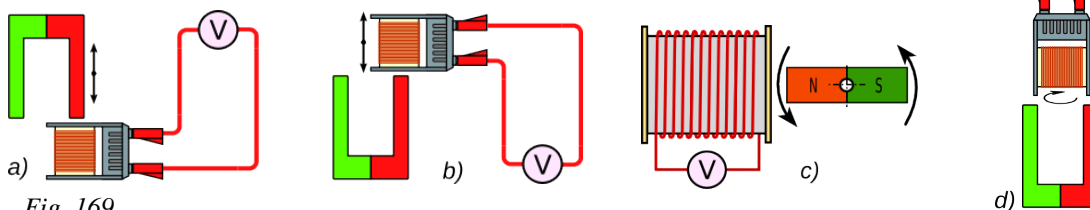


Fig. 169

Aliaj eksperimentoj estas prezentataj en Fig. 170 kaj

Fig. 171. Sur komuna ferkerno troviĝas du bobenoj. La maldekstra bobeno (kampo-bobeno) estas konektita al variigebla tensiofonto, kiu estigas kurenton, kiu siavice estigas magnetan kampon. Al la dekstra bobeno (indukto-bobeno) estas konektita voltmetro, kiu mezuras la produktatan tension. Videblas ke indukto okazas a) kiam la kurento en la kampo-bobeno estas ŝanĝata kaj pro tio ŝanĝas la kampo en la ferkerno, kaj b) kiam oni malproksimigas kaj proksimigas la ferkernon.

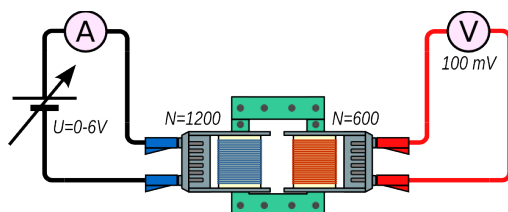


Fig. 171

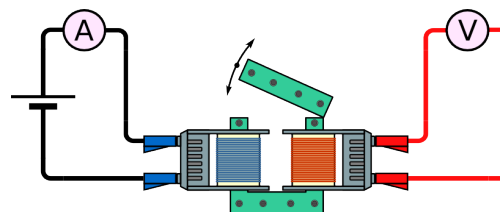


Fig. 170

El la supraj eksperimentoj rezultas, ke indukto en bobeno okazas kiam

- magneto kaj bobeno proksimiĝas aŭ malproksimiĝas
- bobeno rotacias en magnetan kampo aŭ magneto rotacias antaŭ bobeno
- bobeno staras sur ferkerno, en kiu ŝanĝiĝas la magnetan kampo

Oni povas dedukti, ke en bobeno, eĉ kun nur unu volvo, estas induktata tensio, kiam la nombro da kampolinioj kiuj trapasas la volvojn ŝanĝiĝas (vidu Fig. 172). Tio okazas, kiam ŝanĝiĝas aŭ la intenso de la magnetan kampo  $B$ , aŭ la areo  $A_0$  de la volvo kiu troviĝas ordo al la kampolinioj.

La fizika grando, kiu difinas la nombron da kampolinioj, kiuj trafluas areon  $A_0$ , orta al la kampolinioj, nomiĝas **magnetan flukso** kaj havas formul-simbolon  $\phi$ .

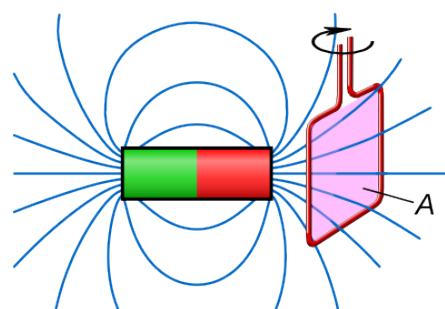


Fig. 172



## 4 Elektromagneta indukto

### 4.2.1 Magneta flukso – leĝo pri elektromagneta indukto

La magneta flukso  $\Phi$ , kiu trapasas areon  $A_o$  estas proporcia al intenso de magneta kampo kaj al areo trafluata. Validas  $\Phi = B \cdot A_o$ , kie  $A_o$  estas areo orta al la kampolinioj.

La rilata mezurunuo estas  $[\Phi] = 1 T \cdot 1 m^2 = 1 Wb$  (vebero)

La nomo estis donita honore al fizikisto W. E. Weber <sup>(21)</sup>

El la supra formulo rezultas por la intenso de magneta kampo  $B = \frac{\Phi}{A_o}$ .

Tio klarigas, kial en multaj libroj pri elektrotekniko la intenso de magneta kampo  $B$  estas nomata magneta fluksdenso.

Uzante la nove enkondukitan grandon, eblas difini ĝeneralan leĝon pri elektromagneta indukto.

Kiam la magneta flukso en konduktanta volvo en tempo  $\Delta t$  ŝanĝiĝas je  $\Delta\phi$ , tiam en la volvo estas induktata tensio egala al  $U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  Se la ŝanĝiĝo de flukso okazas en

bobeno kun  $N$  volvoj, tiam la tensio egalas al  $U = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

La leĝo estas ankaŭ nomata **leĝo de Faraday** honore al sciencisto M. Faraday <sup>(22)</sup> kiu malkovris elektromagnetan indukton helpe de eksperimento simila al la sekva.

#### Eksperimento 17 - Eksperimento de Faraday

Post la malkovro de Oersted pri la produktado de magnetismo per elektra kurento (vidu par. 3.2.1) Faraday provis inverti la aferon produktante elektran kurenton helpe de magnetismo. Li sukcesis kun eksperimento simila al tiu de Fig. 173.

Sur unu flanko de cirkla ferkerno estas volvita drato, kiu formas bobenon 1. Ĝi estas konektita per ŝaltilo al elektra baterio. Sur alia flanko de la ferkerno estas volvita alia drato, formanta bobenon 2. Ĝiaj ekstremaĵoj estas konektitaj por formi fermitan cirkviton. Parto de la drato estas volvita ĉirkaŭ kompas kun la volvaĵo paralela al la magnetnadlo.

Kiam oni enŝaltas kurenton en la bobeno 1, ĝi fakte fariĝas kampo-bobeno, kaj la magneta kampo en la ferkerno unue pligrandiĝas. Sekve ankaŭ en la bobeno 2, la indukto-bobeno, la kampo pligrandiĝas kaj estas induktata tensio, kiu generas kurenton. La kurento siavice produktas magnetan kampon ene de la volvoj ĉirkaŭ la kompas, kies nadlo sekve moviĝas.

Kiam poste oni malfermas la ŝaltilon, la kurento en bobeno 1 kaj sekve la kampo en la ferkerno malgrandiĝas. Tio produktas indukton de tensio kaj sekve kurenton en bobeno 2. Videblas, ke ĉifoje la nadlo moviĝas en kontraŭa direkto rilate al tiu, kiu rezultis dum enŝalto.

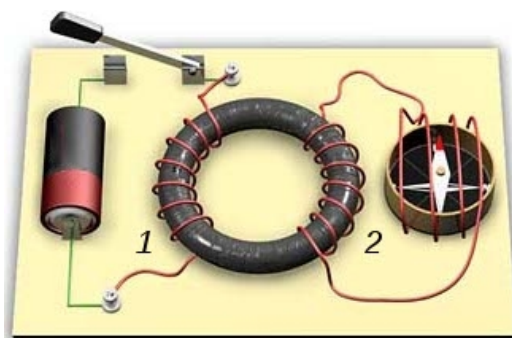


Fig. 173: Eksperimento de Faraday

21 Wilhelm Eduard **Weber** (1804-1891) estis germana fizikisto, kiu interalie laboris pri akustiko kaj elektromagnetismo. Kune kun C. F. Gauss li inventis novan tipon de telegrafo.

22 Michael **Faraday** (1791-1867) estis angla eksperimentanta sciencisto, kiu ege kontribuis al progreso de elektrokemio kaj elektromagnetismo. Interalie en la jaro 1831 li malkovris elektromagnetan indukton.

## 4 Elektromagneta indukto

### Ekzemplo 36

Konduktanta volvo simila al tiu de Fig. 174 kun  $a = 4,5$  cm kaj  $b = 5,0$  cm estas enŝovata en magnetan kampon kun intenso de  $20$  mT dum tempo egala al  $0,5$  s.

Kiom grandas la induktata tensio dum la enŝovo?

**Solvo**

$$B = 20 \text{ mT} \quad a = 4,5 \text{ cm} \quad b = 5,0 \text{ cm} \quad t = 0,5 \text{ s}$$

$$A = a \cdot b = 4,5 \text{ cm} \cdot 5,0 \text{ cm} = 22,5 \text{ cm}^2$$

Dum la enŝovo la areo de la volvo trapasata per kampolinioj ŝanĝiĝas de  $0$  al la valoro de la tuta areo  $A$ .

$$\rightarrow \Delta A_0 = A = 22,5 \text{ cm}^2$$

La valoro de la kampintenso estas konstanta, kaj pro tio

$$\rightarrow \Delta \Phi = B \cdot \Delta A_0 = 20 \text{ mT} \cdot 22,5 \text{ cm}^2 = 0,45 \text{ T} \cdot \text{cm}^2 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

La rezultanta tensio egalas al  $U = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{4,5 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m}^2}{0,5 \text{ s}} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ V} = 90 \mu\text{V}$

La rezulto estas atingebla ankaŭ rigardante la indukton en la malsupra horizontala parto de la volvo. Fakte ĝi estas la sola parto, en kiu estas induktata tensio, ĉar nur ĝi tranĉas kampoliniojn dum la movo. Por peco de konduktanto longa  $a$ , kiu moviĝas ordo al la kampolinioj kun rapido  $v$  validas:

$$U = B \cdot b \cdot v = B \cdot b \cdot \frac{a}{\Delta t} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ T} \cdot 0,05 \text{ m} \cdot \frac{0,045 \text{ m}}{0,5 \text{ s}} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ V} = 90 \mu\text{V}$$

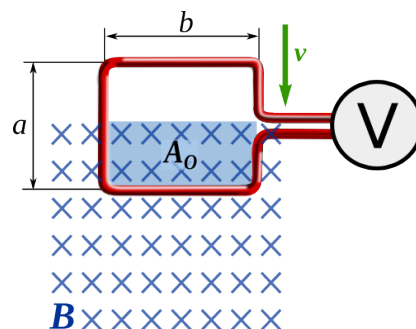


Fig. 174

### Ekzemplo 37

Du bobenoj longaj  $6,0$  cm troviĝas sur sama fermita kerno, kies sekcio estas ĉie egala al  $9$  cm<sup>2</sup>. La relativa permeablo egalas al  $75$ .

La unua bobeno havas  $1200$  volvojn kaj estas konektita al tensiofonto kun variigebla tensio. La dua bobeno estas konektita al voltmetro. Oni pligrandigas la kurenton en la unua bobeno de  $0,6$  A al  $1,2$  A dum tempo egala al  $0,5$  s.

Kiom da volvoj necesas en la dua bobeno, por ke en ĝi estu induktata tensio egala al  $100$  mV?

**Solvo**

$$l = 6 \text{ cm} \quad \mu_r = 1200 \quad N_1 = 900 \quad \Delta I = 1,2 \text{ A} - 0,4 \text{ A} = 0,8 \text{ A} \quad t = 0,5 \text{ s} \quad V = 100 \text{ mV}$$

Dum la tempo  $\Delta t$  la unua bobeno produktas ŝanĝiĝon de kampo egala al

$$\Delta B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \Delta I \cdot \frac{N_1}{l} = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Tm}}{\text{A}} \cdot 75 \cdot 0,8 \text{ A} \cdot \frac{1200}{0,06 \text{ m}} = 1,5 \text{ T}$$

$$\Delta \Phi = \Delta B \cdot A_0 = 1,5 \text{ T} \cdot 9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ Tm}^2 \quad U = N_2 \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

$$N_2 = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta \Phi} = \frac{0,1 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ s}}{1,36 \cdot 10^{-3} \text{ Tm}^2} = 37 \text{ volvoj}$$

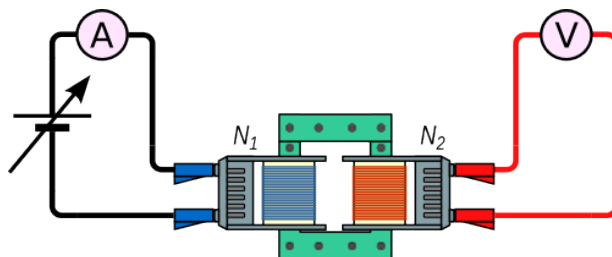


Fig. 175

### 4.3 Indukto kaj energio

#### Eksperimento 18 - Pendolanta magneto

U-magneto estas pendigita al du ŝnuroj, tiel ke ĝi povas pendoli en bobeno (vidu Fig. 176).

Unue al bobeno estas konektita la voltmezurilo. Kiam oni ekmovas la magneton, ĝi pendolas plurfoje kaj la voltmezurilo montras, ke estas induktata tensio.

Poste la ŝtopilingoj de la bobeno estas konektataj per mallonga konduktilo. Nun, kiam oni ekmovas la magneton, ĝi pendolas nur unufoje. Evidente, ĝi estas bremsata.

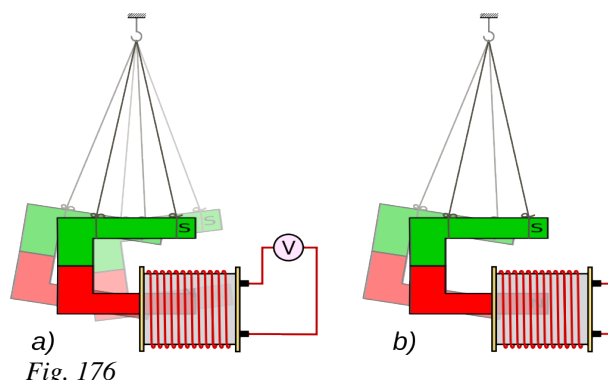


Fig. 176

La okazaĵoj de eksperimento 18 estas klarigeblaj helpe de la leĝo pri indukto en moviĝantaj konduktantoj kaj de la leĝo pri la forto, kiu efikas al kurento en magneta kampo.

Kiam la konduktanto moviĝas, tiam estas induktata la tensio  $U = B \cdot v \cdot s$

Se ĝi estas konektata al voltmezurilo (vidu Fig. 162 en paĝ. 51), ĉilasta montras la produktatan tension, sed ne okazas signifa kurento, ĉar voltmezuriloj havas grandegan rezistancon.

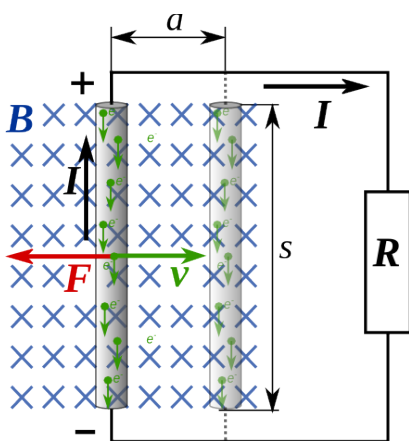


Fig. 177

Se la moviĝanta konduktanto estas konektata al rezistanco  $R$ , la cirkvito estas fermita kaj en ĝi fluas la kurento  $I = \frac{U}{R}$ . Al la kurento en magneta kampo efikas la forto  $F = B \cdot I \cdot s$ .

Pro la regulo de la tri fingroj (Fig. 178) la forto agas maldekstren, je direkto kontraŭa al la rapido. Sekve la forto bremsas la movon.

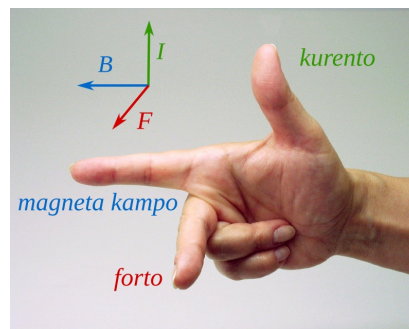


Fig. 178 Regulo de la tri fingroj

Por movi la konduktanton je la distanco  $a$ , necesas fari la laboron  $W = F \cdot a = B \cdot I \cdot s \cdot a$  kaj la tempo bezonata por la movo egalas al  $t = \frac{a}{v}$

La elektra energio uzata dum tio tempo egalas al  $E_{el} = U \cdot I \cdot t = B \cdot v \cdot s \cdot I \cdot \frac{a}{v} = B \cdot s \cdot I \cdot a$

Fine rezultas, ke la elektra energio uzata egalas al la farita mekanika laboro  $W = E_{el}$

Tio estas la rezulto, kion oni atendis pro la leĝo de konservado de energio. Fakte, ne konsiderante froton, necesas, ke la tuta farita laboro estas egala al elektra energio malŝparita en la cirkvito.

### 4.3.1 Leĝo de Lenz

Eblas klarigi la okazaĵojn de eksperimento 18 ankaŭ per alia rezonado.

Kiam poluso de la magneto proksimiĝas al bobeno, tiam estas produktata tensio, ĉar la fluksdenso en la bobeno ŝanĝiĝas. Se la bobena cirkvito estas fermita, la tensio estigas sufiĉe altan kurenton, kiu siavice estigas magnetan kampon en la bobeno. La bobeno fariĝas elektra magneto.

La movo de proksimiĝanta magneto estas bremsata nur, se ĉe la flanko kie troviĝas la magneto, la bobeno estigas saman poluson, kiel tiu de proksimiĝanta magneto. Tiam la samnomaj polusoj interpuŝiĝas kaj la movo estas bremsata.

Rezultas do, ke la kurento estigata de la induktita tensio produktas kampon, kiu provas malgrandigi la efikon de la kampo de proksimiĝanta magneto.

Kiam la magneto malproksimiĝas, tiam okazas kontraŭa efiko. La kurento produktas magnetan kampon, kiu estas samdirekta kiel tiu de la magneto por eviti, ke la kampo estigita antaŭe en la bobeno malgrandiĝu.

Ĝenerale oni povas konstati, ke *la kurento estigata per la induktita tensio estas tiel direkta, ke ĝia efiko kontraŭas la kialon de la indukto.*

Ĉi-lastata regulo nomiĝas *leĝo de Lenz* <sup>(23)</sup>

La sekva eksperimento konfirmas la validecon de la leĝo.

#### Eksperimento 19 - Leĝo de Lenz

Alumina ringo estas pendigita je du ŝnuroj, tiel ke ĝi povas libere pendoli. La ringo troviĝas super fera kerno ĉirkaŭita de bobeno. Per ŝaltilo eblas konekti la bobenon al unudirekta kurentofonto (vidu Fig. 180).

Kiam oni enŝaltas la kurenton, videblas, ke la ringo estas puŝata for de la bobeno, sed la forto ne daŭras. Kiam poste oni elŝaltas la kurenton, la ringo estas dum mallonga tempo, altirata de la bobeno.

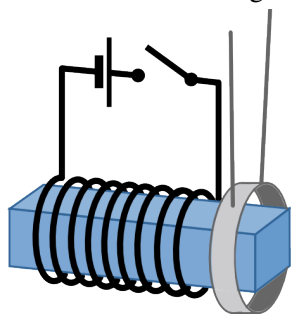


Fig. 180

La okazaĵoj klarigeblas per la leĝo de Lenz.

Kiam oni enŝaltas kurenton la magnetkampo en la ferkerno estas pli grandigata. La indukto igas efikon, kiu kontraŭas tion. Tial la direkto de la kurento induktata en la ringo devas esti kontraŭa al tiu de la kurento en la bobeno. Sed kiel estis montrata antaŭe, konduktiloj trafuataj per kurento kun kontraŭa direkto forpuŝas unu la alian.

Post mallonga tempo la kurento en la bobeno kaj sekve la magnetkampo en la kerno fariĝas konstanta. La indukto kaj la kurento en la ringo nuliĝas, same kiel la forto.

Kiam poste oni elŝaltas kurenton, la magnetkampo en la ferkerno malgrandiĝas. La indukto kontraŭas tion, produktante kurenton en la ringo kun sama direkto de la ĝisnuna kurento en la bobeno. Sekve la bobeno altiras la ringon dum la tempodaŭro ĝis la kurento en la bobeno nuliĝas.

Ankaŭ eksperimento 18 kaj la sekvantaj pripensoj de paĝo 56 konfirmas la leĝon de Lenz. Se la direkto de la induktata kurento estus kontraŭa, al tiu donita per la leĝo de la tri fingroj, tiam la forto produktata per la kurento agus en sama direkto kiel la movo, kaj helpus subteni la movon mem. Sed tio ebligus eternan movilon, kio ne povas ekzisti.

23 Emil **Lenz** (1804-1865) estis german-estona fizikisto. Li laboris precipe pri elektro kaj interalie en 1830 malkovris, ke elektra motoro por unudirekta kurento estas utiligebla ankaŭ kiel generatoro.

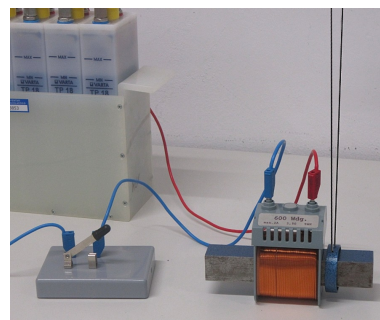


Fig. 179

## 4.4 Generatoroj

Generatoroj estas iloj por produkti elektran energion el mekanika energio. La principo estas tiu montrita en par. 4.1.1. Por produkti sufiĉe grandan tension oni uzas multvolvan bobenojn anstataŭ unu konduktilvolvo. Se la nombro de la volvoj egalas al  $N$ , la induktata tensio havas maksimumon egalan al  $U_{maks} = 2 \cdot N \cdot B \cdot d \cdot \pi \cdot f \cdot s$

En malgrandaj generatoroj la magneta kampo estas estigata per daŭra magneto. En grandaj generatoroj tio okazas helpe de bobenoj, nomataj ekscitaj bobenoj, per kiuj eblas produkti relative grandajn magnetkampojn. Malavantaĝo de tiu sistemo estas, ke necesas tensiofonto por estigi la kurenton en la ekscitaj bobenoj. Ĝi povas esti kemia tensiofonto, ekstera elektra reto aŭ la tensio produktata per la generatoro mem.

Se, dum la konstruado la fera kerno de la ekscitaj bobenoj estas magnetata, ĝi restas iomete magneta ankaŭ sen kurento. Sekvas ke, kiam la rotorbobeno komencas turniĝi, malgranda tensio estas induktata. Se la ekscitaj bobenoj estas konektitaj al tiu tensio, estiĝas kurento en la bobenoj, kiu pligrandigas la kampon, kiu siavice pligrandigas la induktatan tension. La ekscitaj bobenoj povas esti konektitaj en serio aŭ paralele al la rotacianta bobeno.

### 4.4.1 Generatoroj por unudirekta tensio

Por produkti unudirektan tension necesas taŭga komutilo. Fig. 181 montras generatoron, kies ekscita bobeno estas konektata serie al la rotacianta bobeno. Tio signifas, ke la tuta kurento produktata per la induktata tensio en rotoru, fluas tra la ekscita bobeno kaj al uzantoj. Kiam al generatoro ne estas konektata iu uzanto la produktata tensio estas minimuma, ĉar agas nur la resta magnetkampo en la ferkerno.

La magnetkampo iĝas des pli granda, ju pli granda fariĝas la kurento. Pro tio la produktata tensio pligrandiĝas kiam pli da uzantoj estas konektataj al la generatoro.

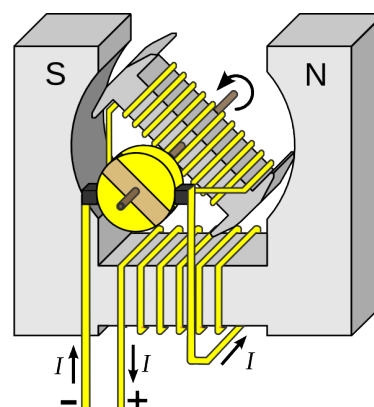


Fig. 181: Generatoro por unudirekta tensio kun ekscitanta bobeno en serio

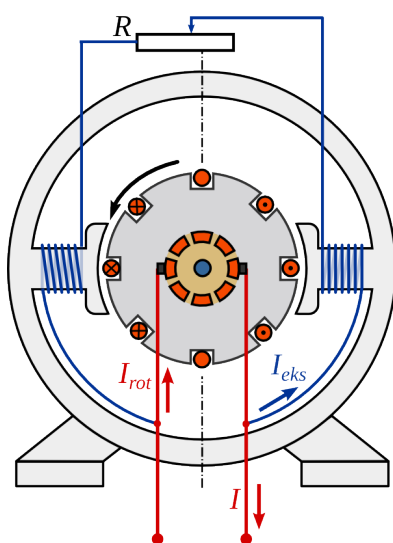


Fig. 182:

Fig. 182 montras generatoron, kies ekscitaj bobenoj estas konektitaj paralele al la rotaciantaj bobenoj. Tio signifas, ke la kurento produktata per la induktita tensio en rotoru, dividiĝas inter la uzanto kaj la ekscitaj bobenoj

$$I_{rot} = I + I_{eks}$$

La avantaĝo de tiu sistemo estas, ke eblas reguli la magnetkampon kaj kun tiu la tension, nedepende de la ŝarĝo de la generatoro.

En grandaj generatoroj ofte oni uzas ekscitajn bobenojn kaj serie kaj paralele konektitaj. Tiamaniere oni uzas kaj la memregulanta eco de seria konekto kaj la bona regulbleco de paralela konekto.

Ĉiuj generatoroj por unudirekta tensio povas funkcii ankaŭ kiel motoroj.

### 4.4.2 Generatoroj por alterna tensio

Estis montrita, ke en konduktil-volvo rotacianta en magneta kampo estas induktata alterna tensio. Por uzi la produktitan tension, necesas kolektilaj brosoj kaj kolektoringoj (Fig. 183). Kaj la brosoj kaj la ringoj eluziĝas dum la funkciado.

La Fig. 184 montras principon de generatoro, kie la indukto-bobeno estas stabila kaj la magneto rotacias. Tiamaniere la kampo en la bobeno ŝanĝiĝas de pozitiva maksimumo al negativa maksimumo kaj en la bobeno estas induktata alterna tensio, kies frekvenco egalas al la frekvenco de la rotacio.

Ordinare, en elektrejoj estas uzataj generatoroj kun nemoviĝantaj indukto-bobenoj. Ili havas la gravan avantaĝon, ke la relative altaj tensioj kaj kurentoj estas depreneblaj pli facile kaj sekure de la stabilaj bobenoj (statoro) ol per la kolektoringoj de rotaciantaj bobenoj (rotoro). Tiamaniere eviteblas perdoj pro sparkado de kolektila broso kaj eluzado de kolektoringo.

En la grandaj generatoroj de elektraj centraloj la rotoro ne estas daŭra magneto, sed elektromagneto (Fig. 185). Ĝi bezonas propran fonton de unudirekta tensio por produkti la magnetan kampon. Kutime tiu fonto estas malgranda generatoro de unudirekta tensio (ekscita maŝino) kiu estas movata de la sama ŝafto, kiu turnas la rotoron. (Fig. 186)



Fig. 186: 1) turbino - 2) generatoro - 3) ekscitanta generatoro

### 4.4.3 Trifaza elektro

Fig. 187 montras skemon de generatoro por trifaza elektro. En la bobenoj estas induktataj tri alternaj tensioj kies fazoj havas inter si egalajn distancojn de triona periodo ( $= 120^\circ$ ). Trifaza elektro estas uzata precipe por la transporto de elektra energio kaj por potencaj elektro-motoroj kaj generatoroj. La kialo estas, ke elektraj linioj, motoroj kaj transformiloj por trifaza sistemo bezonas malpli da materialo (konduktiloj, feraj magnetkernoj) ol unufaza sistemo kaj pli efike utiligas la elektran povumon.

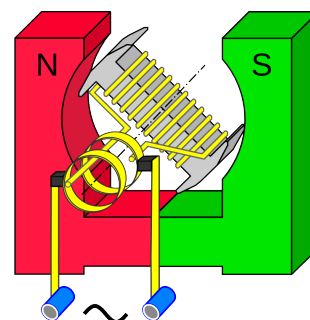


Fig. 183

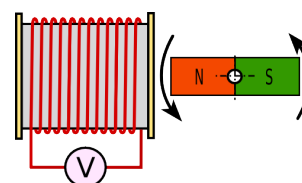


Fig. 184

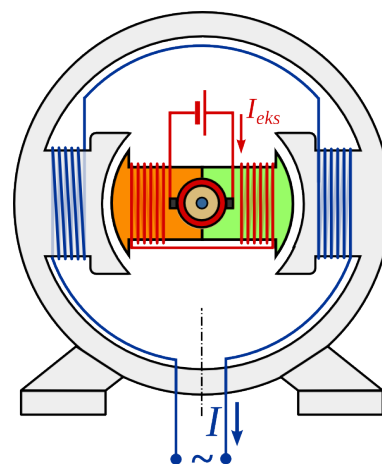


Fig. 185: Skemo de generatoro por alterna tensio

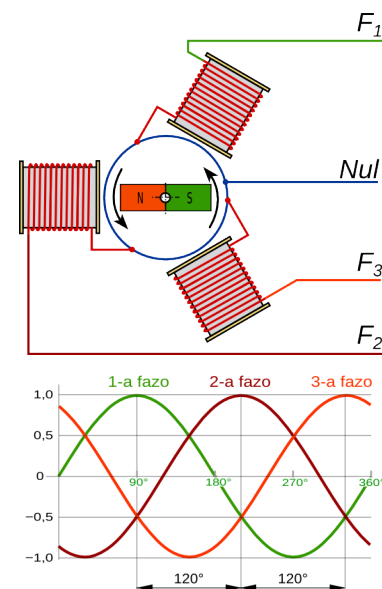


Fig. 187

## 4.5 Transformilo

Nuntempe plejparto de elektra energio estas disportata per alterna kurento, ĉar per tio eblas aliigi la tension helpe de *transformilo* aŭ *transformatoro*. Tio tre gravas ĉar unuflanke en la transmisia reto necesas alta tensio por malgrandigi la perdojn, kaj aliflanke, pro la danĝero, ne permeseblas tro alta tensio ĉe la uzantoj.



Fig. 189: Transformilo en elektrejo



Fig. 188: proksime al domo

Per transformilo oni plialtigas tension en la elektrejo ĝis valoroj de 220 kV kaj poste malgrandigas ĝin proksime al la domoj al la fina valoro de 400 V aŭ 230 V.

### 4.5.1 Funkciado de transformilo

Kiam alterna kurento trafluas bobenon, ĉirkaŭ la bobeno estiĝas alterna magnetkampo, kiu periode ŝanĝiĝas de pozitiva al negativa maksimumo.

Se proksimume al tiu bobeno (kampobobeno) troviĝas alia bobeno (induktobobeno), tiam parto de la magnetika flukso trafluas ankaŭ la induktobobenon (vidu Fig. 190). Ĉar la flukso ŝanĝiĝas, estas induktata alterna tensio. Oni diras, ke la du bobenoj estas indukte kuplitaj.

La indukta kuplado estas multe pli efika, se la du bobenoj troviĝas sur sama fermita ferkerno. Tiam la magnetika flukso en la du bobenoj estas preskaŭ la sama.

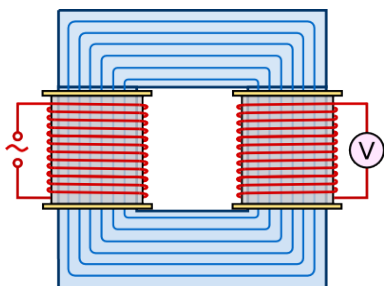


Fig. 191

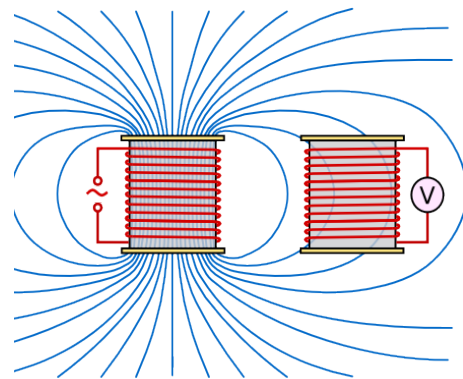


Fig. 190

La unua bobeno estas nomata primara. Al ĝi estas konektita la transformenda alterna tensio. La dua bobeno estas nomata sekundara, ĝi disponigas la transformatan tension. La transmisio de energio inter la primara kaj la sekundara bobeno okazas nur per la magnetika kampo, la bobenoj ne estas elektre interkonektitaj.

La transformilo ne akumulas energion. De la energio alportita al la primara bobeno, malgranda parto perdiĝas pro magnetaj kaj elektraj perdoj. La tuta cetero estas transmissiata al la sekundara bobeno.

### 4.5.2 Rilatumo inter la tensioj kaj kurentoj de transformilo

#### Eksperimento 20 Rilatumo inter tensioj

Celo de la eksperimento estas eltrovo de rilatumo inter la tensioj de transformilo kaj ĝiaj ecoj. La eksperimenta cirkvito estas prezentata en Fig. 192. Al la sekundara bobeno estas konektata nur voltmezurilo kaj sekve ne fluas kurento.

Unue oni rigardas kiel la sekundara tensio dependas de la primara tensio. Sekve estas esplorata la dependeco de la sekundara tensio de la volvonombro de la primara kaj la sekundara bobeno.

Uzante transformilon kun "bona"<sup>(24)</sup> fer-kerno la rezultoj estas tiuj de la tabelo 9.

Videblas ke 
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

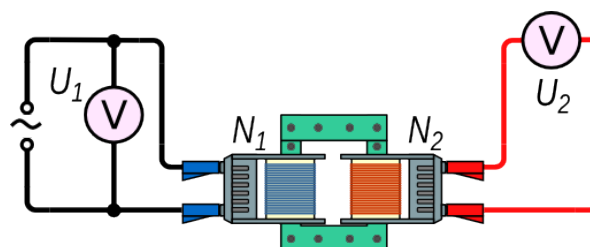


Fig. 192

N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	U <sub>1</sub> [V]	U <sub>2</sub> [V]	U <sub>1</sub> /U <sub>2</sub>	N <sub>1</sub> /N <sub>2</sub>
1200	600	9,6	4,9	2,0	2,0
1200	600	12,8	6,4	2,0	2,0
1200	900	12,8	10	1,3	1,3
1200	300	12,8	3,2	4,0	4,0
600	300	12,8	6,4	2,0	2,0

Tab. 9

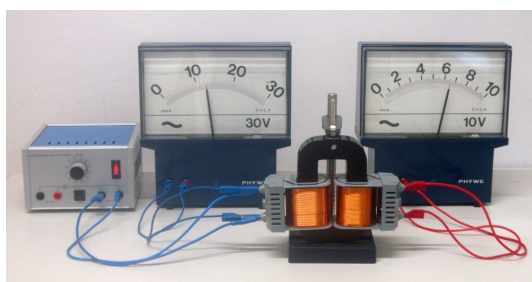


Fig. 193

La rezulto de eksperimento 20 validas ĝenerale. Por ne ŝarĝitaj transformiloj, t.e. transformiloj, en kies sekundara bobeno ne fluas kurento, la kvociento inter la tensioj ĉe la primara bobeno kaj la sekundara bobeno, egalas al kvociento de iliaj volvonombroj.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \rightarrow \quad U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

Se la sekundara bobeno estas konektita al iu konsumanto, estiĝas kurento kaj elektra povumo estas transmisiata de la unua al la dua bobeno.

Ideale, la transformilo estas perfekte efika, kaj la tuta energio kiu eniras la unuan bobenon, eliras el al dua. En tiaj kondiĉoj validas:  $E_{el1} = E_{el2}$

$$U_1 \cdot I_1 \cdot t = U_2 \cdot I_2 \cdot t \quad \rightarrow \quad U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

kio, kun la supra ekvacio kondukas al la ekvacioj de ideala transformilo

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Rezultas, ke se la tensio pliiĝas, la kurento malpliiĝas je la sama faktoro. Praktike la plejmulto de transformiloj laboras en laŭprojecktaj kondiĉoj, en kiuj ili estas tre efikaj kaj tial la formulo estas sufiĉe preciza. Sed, kiel montras la sekva eksperimento ĉiu transformilo havas neeviteblajn perdojn.

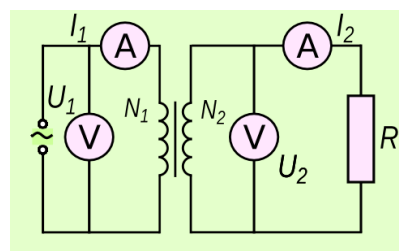


Fig. 194

<sup>24</sup> "Bonaj" ferkernoj estas tiuj, kiuj transmisiis la magnetan flukson de la primara bobeno al la sekundara bobeno kun malmulte da perdoj. Tio eblas pli facile, se la eĝoj de la ferkerno estas rondigitaj, kiel tiuj de la kerno de Fig. 193



### 4.5.3 Perdoj de transformilo

#### Eksperimento 21 Efikeco de transformilo

Fig. 195 montras skemon de eksperimento taŭga por determini la efikecon de la transformilo.

Dum tiu eksperimento la valoro de  $U_1$  estas konstanta same kiel la volvonombroj de la bobenoj. Helpe de la ŝovrezistilo, oni ŝanĝas la kurenton  $I_2$ . Kun la mezuritaj valoroj de tensio kaj kurento oni kalkulas la alportitan povumon kaj la utiligitan povumon kaj el tiuj la efikecon

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_1 \cdot I_1}$$

El la valoroj de Tab. 10 rezultas ke la efikeco de la transformilo ŝanĝiĝas depende de la ŝarĝo. Ĝi estas maksimuma por difinita zono de la ŝarĝo, por kiu ĝi estis projektita.

Pro la diversaj perdoj la transformiloj neniam estas idealaj, kvankam en grandaj transformiloj estas atingebla efikeco ĝis 99%, se ili laboras en laŭprojekta kondiĉoj.

La perdojn oni diferencigas en tiuj rilataj al la ferkerno kaj tiuj rilataj al la ne nula rezistanco de la drato, kiu konsistigas la bobenojn, la t.n. kuproperdoj.

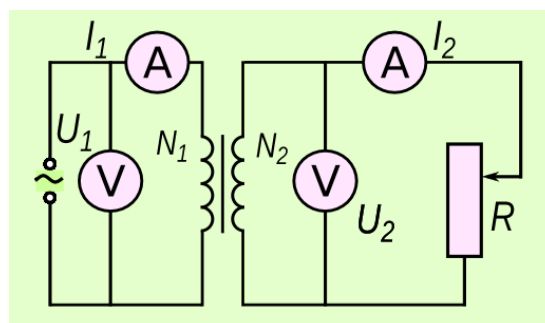


Fig. 195

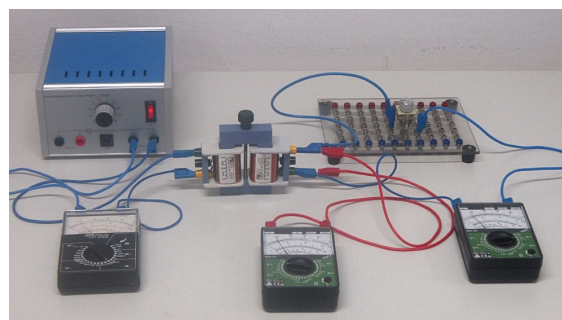


Fig. 196

R [Ω]	U <sub>2</sub> [V]	I <sub>1</sub> [V]	I <sub>2</sub> [V]	P <sub>1</sub> [W]	P <sub>2</sub> [W]	η
2	0,5	120	220	1,50	0,11	0,07
25	3,6	83	143	1,04	0,5148	0,50
50	4,9	60	97	0,75	0,4705	0,63
100	5,5	36	50	0,45	0,275	0,61
200	6,0	30	29	0,38	0,174	0,46
∞	6,2	12	0	0,15	0	0,00

Tab. 10

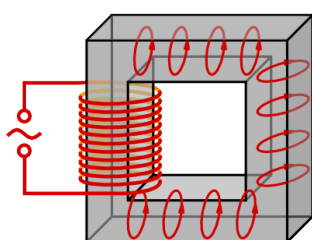


Fig. 198

La perdoj en la ferkerno estas kaŭzataj precipe per la kirkurentoj kaj per la ŝanĝo de magnetigo de la kerno.

La kirkurentoj estiĝas, ĉar la kerno konsistas el konduktanta materialo (fero) kaj pro tio eblas konduktantaj cirkvitoj, en kiuj la ŝanĝanta magnetkampo induktas kurenton (vidu Fig. 198). Oni malgrandigas tiujn perdojn uzante lamenstrukturajn ferkernojn, t.e. ferkernojn el izolitaj ladofolioj, kiuj malfaciligas la kirkurentojn (vidu Fig. 197).

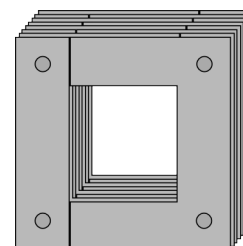


Fig. 197

La magnetkampo en la ferkerno daŭre ŝanĝiĝas de pozitiva maksimumo al negativa maksimumo. Por tio necesas energio, kiu dependas de la magnetaj ecoj de la kerno.

La magnetkampo en la ferkerno daŭre ŝanĝiĝas de pozitiva maksimumo al negativa maksimumo. Por tio necesas energio, kiu dependas de la magnetaj ecoj de la kerno.

Kiam tra la bobenoj fluas kurento, parto de la energio alportita al la primara bobeno necesas por superi la rezistancon de la bobeno. Same ankaŭ parto de la energio cedita al la sekundara bobeno perdiĝas por superi la rezistancon de la bobeno. Tiuj perdoj nomiĝas kuproperdoj, ĉar kutime la drato de la bobenoj estas el kupro. La kuproperdoj superregas kiam la transformilo estas plene ŝarĝata, dum malgranda ŝarĝo superregas perdoj en la kerno.

## 4.5.4 Transmisio de elektra energio

## Eksperimento 22 Perdoj depende de tensio

En tiu eksperimento estas komparata modele la transmisio de elektra energio per malalta tensio kun tiu per alta tensio.

Oni supozas, ke elektrejo transportas energion al uzanto en distanco de 6 km per kablo kun kupraĵ konduktiloj kies sekca areo egalas al  $10 \text{ mm}^2$ . Tiel la rezistanco de ĉiu konduktilo en la kablo egalas al

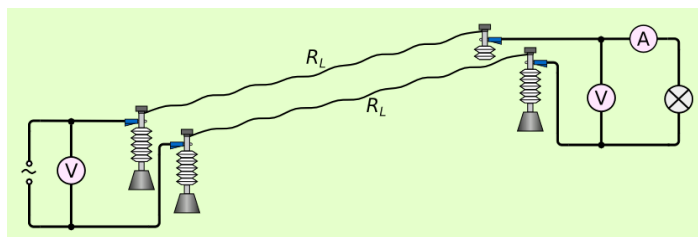


Fig. 199

egalas al  $R_K = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{A} = 0,017 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{m} \cdot \frac{6000 m}{10 \text{ mm}^2} = 10,2 \Omega$

En la modelo estas uzataj dratoj el konstantano kun diametro egala al  $0,2 \text{ mm}$  ( $A = 0,0314 \text{ mm}^2$ )

kaj longo egala al  $l = \frac{R_K \cdot A}{\rho_{Kn}} = \frac{10,2 \Omega \cdot 0,0314 \text{ mm}^2}{0,5 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{m}} = 0,64 m$

La tensiofonto liveras alternan tension, kiu estas egala al  $12 \text{ V}$ . La uzanto estas lampo kun nominalaj valoroj  $12 \text{ V} / 25 \text{ W}$ .

Unue oni transportas la elektran energion per malalta tensio sen transformilo (vidu Fig. 199). Videblas, ke la lampo ne lumas. Tio kompreneblas, se oni konsideras la cirkvitskemon. La lampo estas en serio kun la konduktiloj. La nominala kurento kaj la rilata rezistanco de la lampo estas

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{25 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 2,1 \text{ A} \quad \rightarrow \quad R_L = \frac{U_N}{I_N} = \frac{12 \text{ V}}{2,1 \text{ A}} = 5,8 \Omega$$

La kurento egalas al  $I = \frac{U}{R_L + 2 \cdot R_K} = \frac{12 \text{ V}}{5,8 \Omega + 20,4 \Omega} = 0,46 \text{ A}$  tute ne sufiĉa por ekbriligi la lampon.

La tensio aplikata al la lampo estas  $U_L = R_L \cdot I = 5,8 \Omega \cdot 0,46 \text{ A} = 2,6 \text{ V}$ . Plejparte de la tensio estas perdata dum la eksperimento laŭlonge de la konduktiloj.

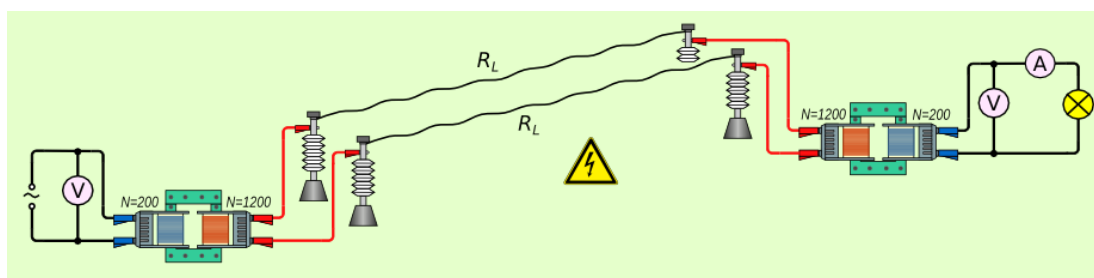


Fig. 200

Due oni transportas energion per alta tensio uzante transformilojn (vidu Fig. 200). Ĉifoje la lampo ekbrilas, evidente la tensio liverata de la dua transformilo sufiĉas.

La rezultoj de eksperimento 22 estas facile kompreneblaj, se oni konsideras la kurenton en la transmisiantaj konduktiloj. Pro la transformilo la tensio en la konduktiloj estas kvinoblo de la tensio de la tensiofonto. Sekvas ke, por transporti saman povumon, la kurento estas kvinono. Pro tio ankaŭ la perdoj de tensio estas nur kvinono de tiuj sen transformilo. Sekve plejparto de la komenca tensio disponeblas por la lampo kiu povas ekbrili, kvankam nun perdoj de energio okazas ankaŭ en la transformiloj.

Ekzemplo 38

La lampo de Fig. 201 havas nominalajn valorojn de 4 V / 40 mA.

La rezistanco de la konduktiloj egalas al 50 Ω .

Kiom grandas la necesa tensio de la tensiofonto, por ke la lampo plene lumu?

Oni supozas la transformilojn idealaj, t.e. senperdaj.

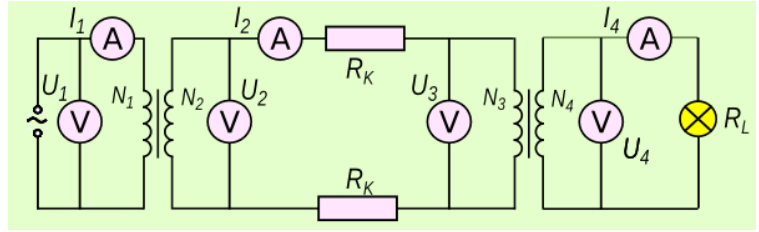


Fig. 201

Solvo

$$U_4 = 4 V \quad I_4 = 0,04 A \quad R_L = 50 \Omega \quad N_1 = 600 \quad N_2 = 12000 \quad N_3 = 12000 \quad N_4 = 600$$

Sen perdoj en la transformiloj rezultas

$$U_3 = \frac{N_3}{N_4} \cdot U_4 = \frac{12000}{600} \cdot 4 V = 80 V \quad I_2 = I_3 = \frac{N_4}{N_3} \cdot I_4 = \frac{600}{12000} \cdot 0,04 A = 0,002 A$$

$$U_2 = U_3 + 2 \cdot R_K \cdot I_2 = 80 V + 2 \cdot 50 \Omega \cdot 0,002 A = 80,2 V$$

$$U_1 = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 = \frac{600}{12000} \cdot 125 V = 4,01 V$$

Pro la perdoj la praktike bezonata tensio estas iomete pli alta.

Por malgrandigi la perdojn en la konduktiloj, elektra energio estas transportata kun tre alta tensio ĝis 380 kV.

Ĉar por la transmisiata elektra povumo validas  $P = U \cdot I$  sekvas, ke ju pli granda estas la tensio, des pli malgranda estas la kurento, kiu necesas por transporti la saman kvanton da energio dum tempo-unuo.

La povumo kiu perdiĝas en la konduktilo egalas al

$$P_K = U_K \cdot I = R_K \cdot I \cdot I = R_K \cdot I^2$$

Se oni centobligas la tension, la kurento iĝas centono kaj la perdoj iĝas dek-milono de la antaŭa valoro.

Pro tio la tensio estas pligrandigata tuj post la generatoroj de elektrejo, kaj malgrandigata proksime al uzanto (vidu Fig. 202)

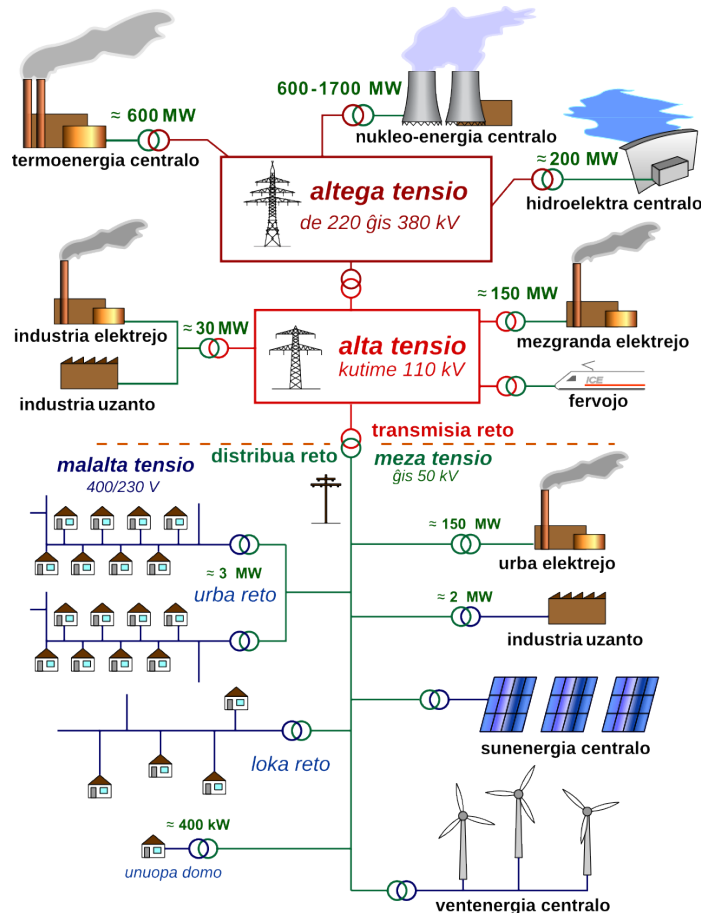


Fig. 202: Skemo de elektra reto

## 4.6 Solvendaj problemoj

1. Metala kadro kun  $a = 30\text{ cm}$  kaj  $b = 40\text{ cm}$  (vidu Fig. 203) estas enŝovata en magnetan kampon kun intenso de  $50\text{ mT}$  dum tempo egala al  $0,2\text{ s}$ .
  - a) Kiom grandas la induktata tensio dum la enŝovo?
  - b) Kiom grandas la kurento dum la enŝovo, se la tuta rezistanco de la kadro egalas al  $11,9\text{ m}\Omega$  ?
  - c) Kalkulu la forton, kiu necesas dum la enŝovo, la faritan laboron kaj la produktitan elektran energion!

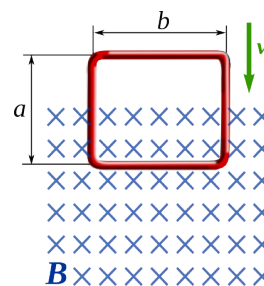


Fig. 203

2. La rotor de generatoro prezentita en Fig. 204 kun  $d = 3\text{ cm}$  kaj  $s = 4\text{ cm}$  havas 450 volvojn. La tuta rezistanco de la volvoj egalas al  $5,4\ \Omega$ . La rotor estas turnata kun frekvenco egala al  $2\text{ Hz}$  en magnetan kampo kun  $200\text{ mT}$ . Al generatoro estas konektita lampo, kies rezistanco egalas al  $10\ \Omega$ .

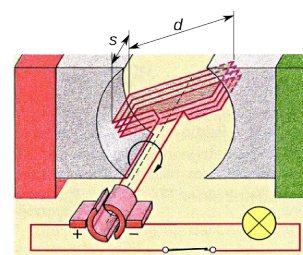


Fig. 204

Kalkulu la kurenton kaj la tordomomanton, kiu necesas, por turni la rotoron!

3. Uzanto bezonas elektran povumon egala al  $15\text{ kW}$  kun tensio de  $230\text{ V}$ . Oni supozas, ke la uzanto estas rekte konektita al elektrejo per konduktiloj, kies tuta rezistanco egalas al  $50\ \Omega$ .
  - a) Kiom devas grandi la tensio de generatoro, kaj kiom grandas la povumo perdita en konduktiloj.
  - b) Per ideala transformilo la tensio de generatoro estas pligrandigata al  $230\text{ kV}$  kaj proksime al uzanto ĝi estas malgrandigata per alia ideala transformilo al  $230\text{ V}$  (vidu Fig. 201). Je kiom sumiĝas la perdoj en konduktiloj en ĉi tiu kazo?

4. La rezistanco de la najlo en Fig. 205 egalas al  $5\text{ m}\Omega$ . La transformilo havas primaran bobenojn kun 600 volvojn kaj sekundaran bobenojn kun 6 volvojn.

Kiom grandas la kurento en la najlo, kiam la primara bobeno estas konektata al tensio egala al  $230\text{ V}$ . La transformilo estu konsiderata kiel ideala, t.e. senperda.

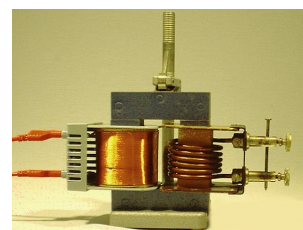


Fig. 205

5. La alumina ringo je la dekstra flanko de la ferkerno de Fig. 206 funkcias kiel sekundara bobeno de transformilo. Ĝi havas rezistancon egala al  $0,3\text{ m}\Omega$ . La primara bobeno havas 600 volvojn.

Kiom grandas la elektra povumo transmisiata al la ringo, se la primara bobeno estas konektita al tensio egala al  $230\text{ V}$ ? La transformilo estu konsiderata kiel ideala.



Fig. 206

### Respondoj

1. La tensio egalas al  $30\text{ mV}$  kaj la kurento egalas al  $2,52\text{ A}$ . La necesa laboro egalas al  $15\text{ mJ}$ .
2. La kurento egalas al  $88\text{ mA}$  kaj la necesa momanto estas  $0,95\text{ Ncm}$ .
3. a) Necesas tensio de generatoro egala al  $3490\text{ V}$ . En la konduktiloj perdiĝas  $213\text{ kW}$ .  
b) Kun transformiloj la perdoj egalas al  $0,21\text{ W}$ .
4. La kurento egalas al  $4,6\text{ A}$ .
5. La povumo egalas al  $490\text{ W}$ .

## Vortindekso

absoluta permeablo.....	46	magneta flukso.....	53
akcelo.....	16	magneta kampo.....	33
akcelo, centripeta.....	27	magneta kampo de bobeno.....	45
akcelo, konstanta.....	18	magneta kampo de elektra kurento.....	34
alcentra forto.....	27	magneta kampo, mezuro.....	37
ampermetro.....	42	magneta konstanto.....	46
ampermezurilo.....	42	magneta permeablo.....	45
ampero, difino.....	41	magnetado.....	32
baza ekvacio de mekaniko.....	19	magnetismo, fundamentoj.....	31
centra forto.....	27	magneto.....	31
cirkla movo.....	26	malkompono de forto.....	3
decentra forto.....	27	malkompono sur klinita ebena.....	4
diamagneta.....	46	malstabila ekvilibro.....	12
efikeco de transformilo.....	62	masocentro.....	10
ekvilibro.....	2	mekanika ekvilibro.....	7
ekvilibro, mekanika.....	7	momantoboltilo.....	7
ekvilibro, specoj de.....	12	motoro, elektra.....	44
elektromagneta forto.....	38	movenergio.....	23
elektromagneta indukto.....	51	movo.....	16
elementaj magnetoj.....	32	neŭtono, laŭleĝa difino.....	19
falo.....	20	Oersted, eksperimento de.....	34
falo en aero.....	21	Oersted, Hans Christian.....	34
Faraday, eksperimento.....	54	paralelogramo de fortoj.....	1
Faraday, Michael.....	54	paramagneta.....	46
feromagneta.....	31, 46	paraŝutado.....	21
flukso, magneta.....	53	permeablo, magneta.....	45
generatoro.....	58	Pitagoro.....	2
Hertz, Heinrich.....	26	poluso, magneta.....	31
indiferenta ekvilibro.....	12	rapido.....	16
indukto en rotacianta volvo.....	52	regulo de la tri fingroj.....	36
indukto, elektromagneta.....	51	relativa permeablo.....	46
kampo, magneta.....	33	renversiĝo.....	13
kampolinio.....	33	reto, elektra.....	64
katodradia tubo.....	48	rezultanto.....	1
kirlokurento.....	62	stabila ekvilibro.....	12
klinita ebena.....	4, 22	stabileco.....	13
kurentmezurilo.....	42	Tesla, Nicola.....	37
Lenz, Emil.....	57	teslo.....	37
Lenz, leĝo de.....	57	tordomomanto.....	6
levbrako.....	6	transformatoro.....	60
levilo.....	8	transformilo.....	60
libera falo.....	20	transmisio de elektra energio.....	63
lorenca forto.....	47	vektora sumo.....	1
Lorentz H.A.....	47	ventgeneratoro.....	13
magneta fluksdenso.....	37	Weber, Wilhelm.....	54