

Lämpötila, lämpö energiana

Tilanmuuttujien perushahmotus

Lämpötila, paine, tasapaino

Lämpötilalla tarkoitetaan aluksi aineen aistinvaraisesti havaittavaa ominaisuutta. Havaitaan että toisiinsa kosketuksissa olevien kappaleiden tai aineiden lämpötilaerot tasoittuvat.

Kutsutaan aineen puristustilaa *paineeksi*. Todetaan tukitulla ruiskuilla että ilman paineen erot saavat aikaan voimia, ja että ympäröivällä ilmalla on paine. Vedetään mäntä pois tyhjästä ruiskusta. Imetään pehmeästä muovipullosta pumpulla ilma pois. Nesteiden ja kaasujen paine-erot pyrkivät myös tasoittumaan.

Lämmittäminen yleensä suurentaa aineen tilavuutta, voi aiheuttaa kiinteän aineen muuttumisen nesteeksi, tai nesteen muuttumisen kaasuksi. Jäähdyttäminen aiheuttaa päinvastaiset ilmiöt. Puristaminen pienentää tilavuutta, voi myös lämmittää. Yleisesti: kun vakiomäärän ainetta sisältävässä systeemissä joko aineen lämpötilaa, puristustilaa tai tilavuutta muutetaan, niin kahdesta muusta ainakin toinen tai molemmat muuttuvat myös.

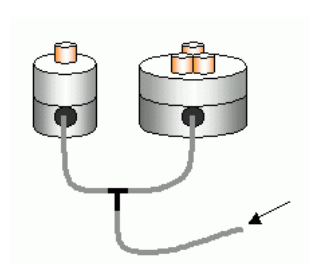
Määritellään lämpötila, paine ja tilavuus aineen *tilanmuuttujiksi*, ja kutsutaan tilannetta jossa ne eivät muutu systeemin tasapainotilaksi. Havaitaan myös että lämpötilaerot ja paine-erot pyrkivät tasoittumaan.

Tilanmuuttujien kvantifiointi, tilanyhtälöt

Paine

Esikvantifiointi esim. painamalla nastaa sormien välissä ja yhteen kytketyillä ruiskuilla. Todetaan että voiman suurentaminen suurentaa painetta, vakioapaineen aiheuttama voima riippuu pinta-alasta.

Kvantifiointi: kulhot, kelmut ja kannet. Neljän kulhon sarja, valitaan yksi standardiksi. Laitetaan sen kannen päälle punnuksia. Kytetään vuorotellen kukin kolmesta muusta testikulhosta standardikulhon kanssa Y-letkulla yhteen, puhalletaan letkuun, etsitään testikulhon kannelle punnuksia joilla testikulhon ja standardikulhon kannet nousevat yhtä aikaa. Havaitaan, että mittauspisteet asettuvat (A,F) -koordinaatistossa origon kautta kulkevalle suoralle. Muutetaan standardikulhon punnuksia ja toistetaan koesarja, saadaan uusi suora. Suoran kulmakertoimen $p = \frac{F}{A}$ määritellään olevan kaasun puristustilaa kuvaava suure, *paine*.



Ilman paineen mittaust

Karkea mutta yksinkertainen tapa: vedetään jousivaa'alla mäntä ulos ensin avoimesta ruiskusta (voima on männän kitkavoima), sitten tukitusta ruiskusta (voima on kitkavoima + ilmanpaineen mäntään kohdistama voima).

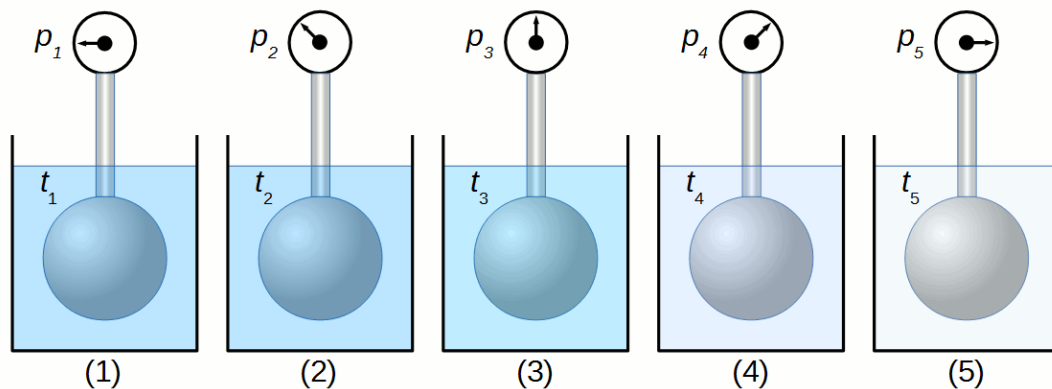
Lämpötila

Lämpötilaa ei voi kvantifioida kahden suureen välisen riippuvuuden invarianssina. Valitaan jokin

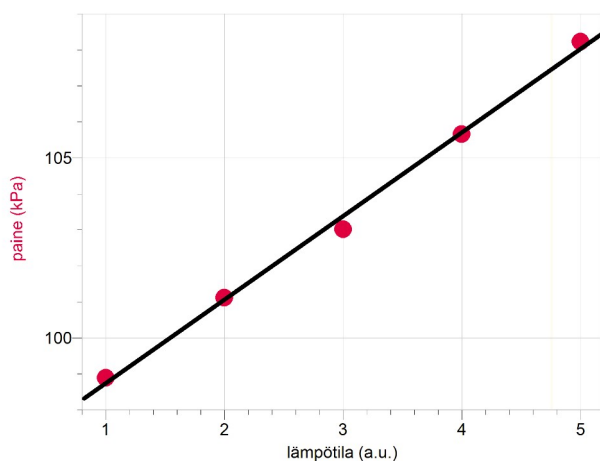
lämpötilasta riippuva suure, ja tutkitaan voidaanko lämpötilan mittaaminen perustaa tämän suureen arvon mittaamiseen. Mahdollisia suureita olisivat ainakin kiinteän kappaleen koko tai muoto, nesteen tilavuus sekä kaasun paine. Tunnetusti kaikkiin näihin perustuvia lämpömittareita on käytössä. Valitaan kaasun paine, koska se lieenee käyttökelpoinen laajalla lämpötila-alueella. Käytetään umpinaista pulloa, jossa vallitsevaa ilman painetta voidaan mitata. Käytännössä mittaus kannattaa tehdä tietokoneen paineanturilla (Gas Pressure Sensor).

Otetaan hanasta kylmää vettä (1) ja kuumaa vettä (5), ja sekoitetaan niitä suhteessa 1:1. Intuitio sanoo, että seoksen (3) lämpötilan täytyy olla alkulämpötilojen keskiarvo. Vastaavasti sekoitetaan kylmää vettä (1) ja seosta (3), saadaan seosta (2). Ja vielä kuumaa vettä (5) ja seosta (3), saadaan seosta (4). Seosten lämpötilat $t_1 \dots t_5$ ovat tasavälein, ja koekohtaista yksikköä (a.u.) käyttäen lämpötilat voidaan ilmaista $t_1 = 1$ a.u., $t_2 = 2$ a.u. jne.

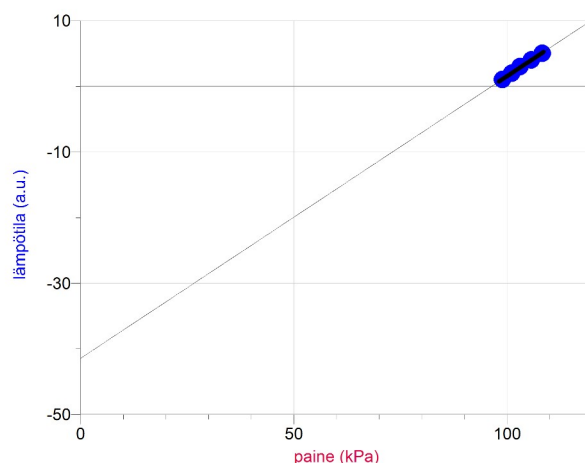
Laitetaan pullo vuorotellen kuhunkin veteen (1)...(5).



Havaitaan että lämpötilan ja ilman paineen ja välillä vallitsee lineaarinen riippuvuus, eli $\Delta p \sim \Delta t$. Riippuvuus voidaan kääntää toisin päin, $\Delta t \sim \Delta p$.



Paineen riippuvuus lämpötilasta kokeen laitteistolla. Lämpötilan yksikkö on koekohtainen (a.u.)



Matalin empiirisesti mielekäs lämpötila on se, jossa kaasun paine $p = 0$. Kokeen laitteistolla ja asteikolla tämä lämpötila olisi noin -41,3 a.u.

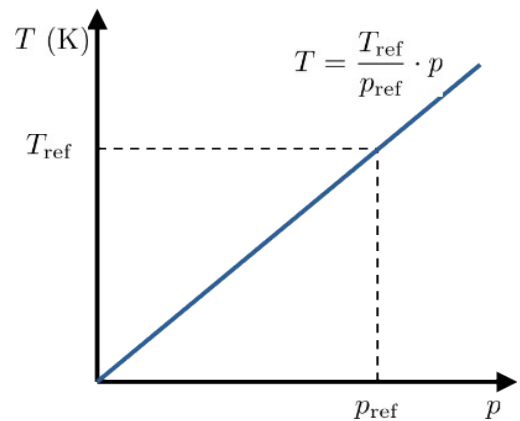
Kaasun paine ei voi olla negatiivinen, joten **termodynaaminen lämpötila** T kannattaa määritellä niin, että kun $p = 0$, myös $T = 0$. Tällöin lämpötilan ja paineen välillä vallitsee verrannollisuus $T \sim p$.

Lämpötila-asteikon määrittelymiseksi tarvitaan lisäksi yksi peruspiste, jonka lämpötila on vakio ja mahdollisimman tarkasti realisoitavissa. Tällaiseksi on valittu veden kolmoispiste, jonka lämpötilaksi on määritetty $T_{\text{ref}} = 273,16$ kelviniä (K). Koulukokeissa peruspisteenä voidaan käyttää helpommin realisoitavaa jään sulamispistettä, joka on normaalipaineessa 273,15 K.

Peruspiste on aikanaan määritelty tällä tavalla siksi, että kelvinaste saadaan yhtä suureksi kuin celsiusaste.

Kokeen laitteesta saadaan kaasulämpömittari, kun ensin määritetään kaasun paine p_{ref} peruspisteen lämpötilassa. Tuntematonta lämpötilaa T_x määritettäessä mitataan kaasun paine p_x tässä lämpötilassa, jolloin

$$T_x = \frac{T_{\text{ref}}}{p_{\text{ref}}} \cdot p_x$$



Laki kertoo miten termodynaamisen lämpötilan voi mitata, joten laki on yksi mahdollinen lämpötilan määrittelylaki.

Toukokuussa 2019 SI-järjestelmä otti käyttöön uuden kelvinasteen määritelmän. Se perustuu Boltzmannin vakioon, joka kytkee yhteen lämpötilan ja molekyylin liike-energian. Koulufysiikassa kannattaa kuitenkin esitellä ensin yllämainittu empiirinen määritelmä, maininnalla että tarkempikin on olemassa, mutta sen voi ymmärtää vasta kun ymmärretään lämpötilan ja energian yhteys. On myös huomattava että *suureen* määritelmä ja *yksikön* määritelmä ovat kaksi eri asiaa. Yksikölle voi olla vain yksi standardinmukainen määritelmä. Suurelle taas ei ole olemassa yhtä ainoaa ”oikeaa” määrittelyä, vaan voi käyttää tilanteen tarpeiden mukaista, toimivaa ja ymmärrettävää määritelmää.

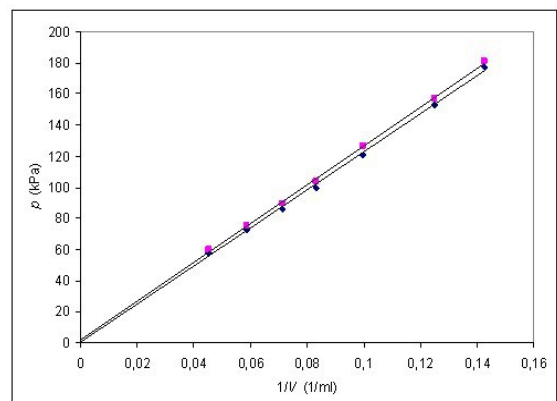
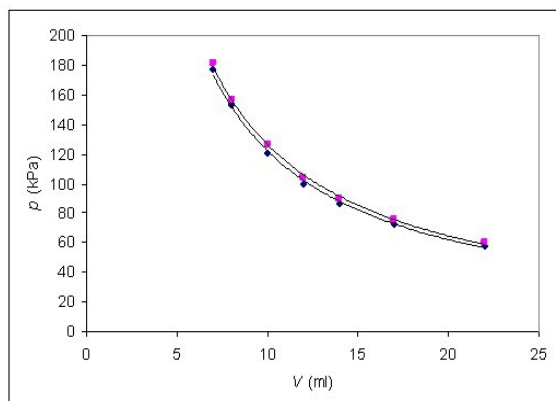
Kaasun tilanyhtälöt

Kokeet kannattaa tehdä tietokoneavusteisella mittauksella. Käytettävissä on paineantureita ja lämpötilaantureita. Tilavuuden muuttamiseen käytetään lääkeruiskuja.

Boylen laki: paineen riippuvuus tilavuudesta vakio­lämpötilassa. Käytetään kaasusäiliönä lääkeruiskua, joka on kytketty letkulla tietokonemittausjärjestelmän paineanturiin. Kaasun tilavuus luetaan ruiskun sylinterin asteikolta, huomioiden letkun ja anturin tilavuus (noin 1 ml). Muutetaan ruiskuun suljetun ilman tilavuutta, ja mitataan kutakin tilavuutta vastaava paine.



Tehdään yksi mittaussarja pitäen ruiskua huoneilmassa, varoen lämmittämästä ruiskua kädellä. Jos mahdollista, tehdään vielä toinen mittaussarja ruisku upotettuna lämpimään veteen.

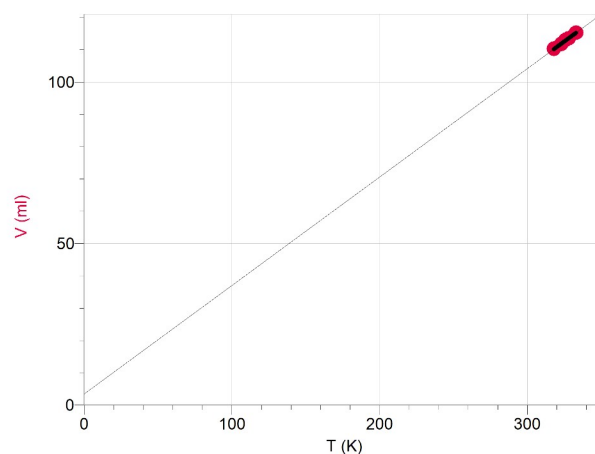
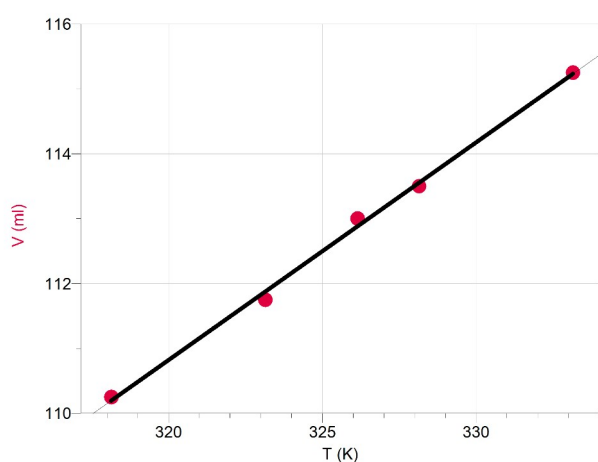
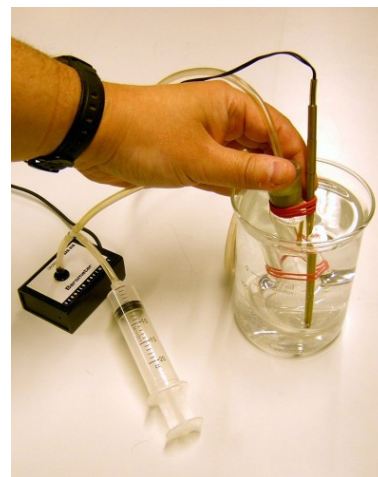


Kuvaajista havaitaan, että ruiskussa olevan ilman paine on vakio­lämpötilassa verrannollinen tilavuuden käänteisarvoon siten, että verrannollisuuskerroin riippuu lämpötilasta. Voidaan kirjoittaa $p \sim \frac{1}{V}$, eli $pV = \text{vakio}$.

Charlesin laki kuvaa paineen riippuvuutta lämpötilasta vakiotilavuudessa. Edellä lämpötila on määriteltä perustuen verrannollisuuteen $T \sim p$, joten pätee myös $p \sim T$.

Gay-Lussacin laki: tilavuuden riippuvuus lämpötilasta vakioaineessa. Käytetään lasipulloa, joka on kytketty Y-letkulla lääkeruiskuun ja herkkään paineanturiin. Pullon kylkeen on kiinnitetty lämpötila-anturi. Upotetaan pullo veteen, jonka lämpötilaa muutetaan. Pidetään paine pullossa vakiona säätämällä lääkeruiskun mäntää, jolloin ruiskun asteikosta voidaan lukea ilman tilavuuden muutos. Piirretään kuvaaja systeemin (pullo+ruisku) tilavuudesta lämpötilan funktiona.

Havaitaan, että systeemin sisältämän ilman tilavuus on verrannollinen lämpötilaan, $V \sim T$.



Kaasulait yhdistämällä saadaan lakiennuste $\frac{pV}{T} = \text{vakio}$. Laki kertoo kvantitatiivisesti sen mitä havaittiin jo perushahmotuksessa: kun yhtä kolmesta tilanmuuttujasta muutetaan, kahdesta muusta ainakin toinen tai molemmat muuttuvat myös.

Energian perushahmotus

Johdanto:

Monimuotoinen energia

Energia on fysiikan tärkein käsite sekä käytännölliseltä että teoreettiselta kannalta. Se yhdistää toisiinsa kaikki fysiikan ilmiöalueet ja teorat. Energiakäsite kuuluu yleissivistykseen, ja fysiikan opetuksen pitää antaa siitä yleistiedot. Oppimista vaikeuttavat ainakin seuraavat seikat:

- Arkikielessä ja tiedotusvälineissä energiakäsitettä käytetään merkityksissä, jotka eivät aina ole yhteensopivia fysikaalisen käsitteen kanssa. Myös [näennäistieteen](#) piirissä käytetään paljon energia-termiä, merkityksissä jotka ovat enemmän mystisiä kuin fysikaalisia.
- Energia sellaisena käsitteenä kuin se nykyään ymmärretään on hyvin yleinen ja abstrakti. Energia esittää jotakin, joka liittyy kaikkiin olioihin ja ilmiöihin. Tämä on hyvin epäkiitollinen opetuksen lähtökohta. Opetuksessa on pakko lähteä liikkeelle rajatuista ilmiöluokista, ts. käsitellä kutakin energialajia aluksi erikseen. Tämäkään lähestymistapa ei ole ongelmaton, koska energialajien rajat eivät ole aina kovin selvät. Käsitteiden energian lajeista onkin fysiikan kehittyessä kokenut monia muutoksia.

Kuitenkin, opettajalla on syytä olla mielessään mahdollisimman selkeä ja fysikaalisesti oikea perushahmo yleiselle energiakäsitteelle. Kattavan perushahmon pukeminen sanalliseen ilmaisumuotoon ei ole helppoa.

Joitain ehdotuksia:

- *Energia on kyky tehdä työtä.* Tämä energian määritelmä esiintyy usein oppikirjoissa, mutta se ei ole monestakaan syystä hyvä. Se kytkee energian pelkästään mekaniikkaan, mekaaniseen työhön. Useimmilla energian lajeilla ei ole suoraan kykyä tehdä mekaanista työtä.
- *Energia on kyky lämmittää.* Tämäkin on rajoittunut määritelmä, mutta silti paljon edellistä parempi lähtökohta. Määritelmä on ymmärrettävissä konkreettisella tasolla, ja sisältää samalla luonnossa vallitsevan energian huononemisen periaatteen: kaikki energia pyrkii lopulta muuttumaan lämmöksi.
- *Energia on kyky luoda järjestystä.* Erikoistapauksia koskevana tämä on hyvinkin ymmärrettävissä konkreettisella tasolla - on selvää että esimerkiksi huoneen siivoaminen ja tavaroiden järjestäminen vaatii energiaa. Mutta yleisempi soveltaminen on koulun tasolla vaikeaa, koska ongelmaksi tulee "järjestyksen" määrittely. (Täsmällinen järjestystä kuvaava käsite, entropia, on käsittehierarkiassa erittäin korkealla.)
- *Energia on se mikä säilyy kaikissa ilmiöissä, vaikka energia siirtyisi tai muuttaisi muotoaan.* Lienee tässä esitetyistä määritelmistä käyttökelpoisin ja yleisin. Ei kuitenkaan ole sisäistettävissä muuten kuin tutustumalla erikoistapauksiin, siis eri energialajeihin, ja siihen miten määritelmässä ilmastut energian perushahmot (säilyminen, siirtyminen ja muuttuminen) kussakin tapauksessa ilmenevät.

DFK-kurssilla aloitetaan energian käsittely lämpöenergiasta. Muihin energiamuotoihin edetään siten, että tutkitaan tilanteita joissa syntyy tai häviää lämpöenergiaa (tai jotain muuta jo tunnettua energiamuotoa), ja tarkastellaan mitä näissä tilanteissa häviää tai syntyy. Esimerkiksi jos lämpöenergiaa syntyy ja jotain muuta häviää, tämä "jokin muu" tulkitaan myös energiailmiöksi, johon liittyy yksi tai useampia energialajeja.

Energian perushahmot lämpöilmiöissä

Energian perushahmot ovat säilyminen, siirtyminen ja muuntuminen. Näiden hahmottamiseen tarvitaan esimerkkejä tilanteista, joissa:

- Lämpö säilyy, jolloin se ei siirry eikä muunnu. Myös tilanteet joissa lämpö ei näytä säilyvän: tällöin lämpöä joko siirtyy tai muuntuu.
- Lämpöä siirtyy kappaleesta toiseen.
- Lämpöä syntyy ja jotain muuta häviää; lämpöä häviää ja jotain muuta syntyy.

Kvantifiointi

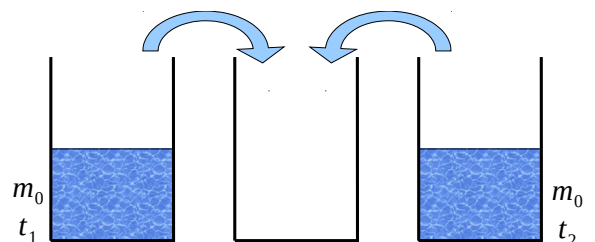
Lämpömäärä, ominaislämpökapasiteetti

Perusidea: kun kaksi erilämpöistä kappaletta tai nestemäärää on kontaktissa toisiinsa, kylmempi ottaa vastaan yhtä paljon lämpöenergiaa kuin mitä kuumempi luovuttaa.

Merkitään siirtyvää lämpöenergiaa eli *lämpömäärää* tunnuksella Q .

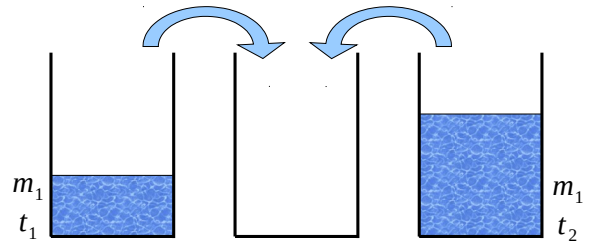
Sekoitetaan yhtä suuret määrät erilämpöisiä vesiä. Havaitaan, että loppulämpötila on alkulämpötilojen keskiarvo, eli molempien vesimäärien lämpötilat muuttuvat yhtä paljon vastakkaisiin suuntiin: $\Delta t_1 = -\Delta t_2$, joten $Q \propto \Delta t$.

Lämpötilan kvantifiointi perustui samaan ideaan, joten koetta ei välttämättä tarvitse tehdä uudestaan.



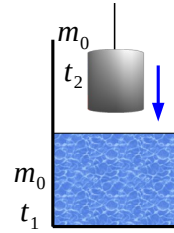
Sekoitetaan eri suuret määrät eri lämpöisiä vesiä.

Havaitaan $-\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{m_2}{m_1}$ eli $m_1 \Delta t_1 = -m_2 \Delta t_2$. Siis $m \Delta t$ muuttuu kummallekin vesimäärällä yhtä paljon mutta vastakkaisiin suuntiin. Ilmeisesti $Q \propto m \Delta t$, joten $Q \propto m$.



Laitetaan veteen toista ainetta oleva kappale, jolla on sama massa mutta eri alkulämpötila kuin vedellä. Havaitaan että nyt kappaleen ja veden lämpötilat muuttuvat eri määrän. Lämpötilojen muutosten suhde on erilainen eri aineilla. Kappaleen kyky ottaa vastaan lämpöenergiaa riippuu siis myös aineesta. Jotta lämpöenergian siirtymistä kuvaava yhtälö edelleen pitäisi paikkansa, siihen täytyy lisätä aineiden lämpöenergia vastaanottokykyjä kuvaavat kertoimet c :

$c_1 m_1 \Delta t_1 = -c_2 m_2 \Delta t_2$, joten $Q \propto c$.



On hyvä käyttää toisena aineena alumiinia. Kts. Joulen koe.

Kokeet osoittavat, että lämpömäärä riippuu aineesta, ainemäärän massasta ja lämpötilan muutoksesta. Määritellään: lämpömäärä $Q = cm \Delta t$, jossa c on aineelle ominainen vakio, ominaislämpökapasiteetti.

Lämpömäärän yksikkö täytyy aluksi määrittää standardiaineen avulla => kalori: 1 cal on lämpöenergia, joka muuttaa 1 g vesimäärän lämpötilaa 1°C verran. Veden ominaislämpökapasiteetti on siis 1 kcal/(kg °C).

Lämpömäärän yksiköksi saadaan joule vasta sitten, kun lämpöenergia on kytketty mekaaniseen työhön Joulen kokeella.