

3. ENERGIA JA SOOJUSHULK

3.1. Termodünaamiline süsteem ja termodünaamilised protsessid

Termodünaamilise süsteemina võib vaadelda iga piiritletud keha või kehade hulka. Süsteemi võib liigendada alamsüsteemideks. Süsteem võib omada mehaanilist energiat ja teha tööd. Näited: *soojusjõumasin, segumasin*.

Olgugi et termodünaamika lubab rangelt kirjeldada vaid tasakaalulisi süsteeme, võib vaadeldav süsteem muutuda. Muutusi ehk dünaamikat hakatakse kirjeldama kui tasakaalude rida. Analoogia: *kinofilm on staatiliste piltide rida, dünaamika on kirjeldamata ja kaadreid võib vaheldada suvalise kiirusega*.

Termodünaamilise süsteemi oleku muutumine on termodünaamiline protsess.

Süsteemi olekuga üheselt määratud parameetrit nimetatakse olekufunktsiooniks. Näide: süsteemi ruumala.

Protsessis toimuvaid muutusi iseloomustavaid parameetreid nimetatakse protsessifunktsioonideks. Näited: mehaaniline nihe, paisumine.

3.2. Mehaanilise energia mittejäävus ja energia ülekandevormid

Mehaanilise energia jäävuse standardnäide on võnkuv pendel. Mehaaniline energia on aga jääv ainult hõõrdumise täieliku puudumise korral. Tegelikult aeglustub pika aja jooksul iga pendel ja mehaaniline energia hävib. Energia üldine mõiste avaneb termodünaamikas.

Mehaanikas on töö primaarne suurus ja mehaaniline energia töö potentsiaal.

Töö ja soojus on energia ülekandevormid.

Mehaaniline töö on energia ülekanne liikuvale kehale mõjuvate jõudude abil. Tööks üldse nimetatakse aga igasugust energiaülekannet, mis on põhimõtteliselt 100% konverteeritav mehaaniliseks tööks:

Töö ülekandemehhanismide näited: *kardaanvõll, elektrijuhe, hammasrattad, nöör, raadiosaatja – vastuvõtja*.

Töö A märk: positiivne = süsteemist välja.

Kõik ülekandevormid, mis pole töö, kannavad koondnime “soojus”.

Näited: *Pliit – kastrul, Päike – Maa*.

Probleemsed näited: *laseri kiirgus? raadiosaatja – vastuvõtja?*

Soojushulga Q märk: positiivne = süsteemi sisse.

Füüsiku jaoks ebameeldiv suunakokkulepe on pärit soojusmasinate teooriast.



Küsimus: kuidas saaks eksperimendis soojust ja tööd eraldi uurida? Lahendus: ehitada süsteem, mis saab energiat vahetada ainult ühes vormis.

Mehaaniliselt isoleeritud süsteem. See on mudel soojusülekanne uurimiseks. Vastavaid protsesse võiks nimetada töövabadeks protsessideks.

Adiabaatiliselt isoleeritud süsteem. Näide: *Dewari anum*. Adiabaatilised ehk soojusülekandevabad protsessid.

Täielikult isoleeritud süsteem. Siin võivad toimuda soojuse ja töö ülekanded süsteemi sees selle osasüsteemide vahel.

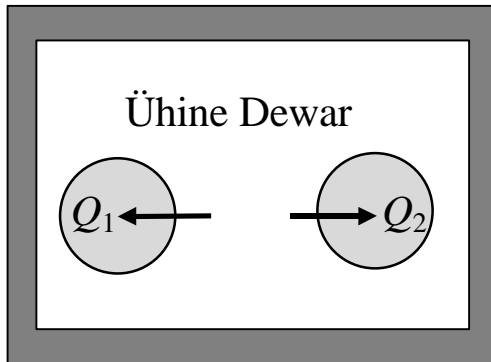
3.3. Kalorimeetria ja soojushulga mõiste

Termodünaamika arengu algperioodil mõõdeti soojust mehaanilisest tööst sõltumatult. Selleks kasutatakse kalorimeetrit, mille oleku muutusi saab jälgida visuaalselt loetava indikaatori järgi.

☞ Näited: *raske kolviga silinder, paisumistermomomeetri või bimetaltribaga varustatud veeanum*.

Kalorimeeter isoleeritakse keskkonnast täielikult ja ainult soojusvahetuse ajaks viiakse ta soojuslikku kontakti mingi välise kehaga. Kaks soojushulka loetakse ekvivalentseteks, kui nad viivad kalorimeetri kindlast algolekust ühesugustesse lõppolekutesse. Soojushulk Q osutub aditiivseks suuruseks ja teda saab mõõta Arhimedese protseduuri abil. Fundamentaalsuurusena defineeritud soojushulga mõõtühikuks oli kalor: soojushulk, mis soojendab üht grammi vett ühe Celsiuse kraadi võrra. See lihtsustatud definitsioon on umbmäärane. Tuntud on mitu erinevat täpsustust ning mitu teineteisest veidi erinevat kalorit (CRC käsiraamatus viis).

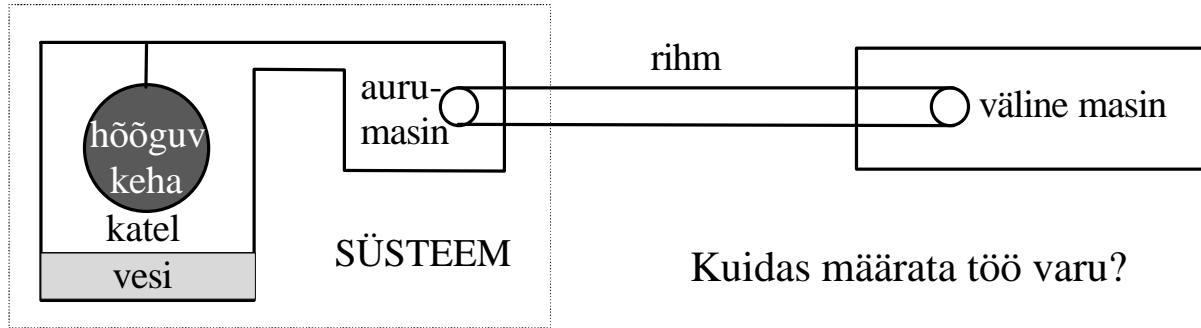
Töövabas ja ainult töövabas protsessis oleks Q tõlgendatav kui soojuse varu muutus (samaviisi kui töö puhul mehaanikas). Näide:



$$Q_1 + Q_2 = 0 \quad \text{ehk} \quad Q_1 = -Q_2$$

Erinevalt mehaanikast ei ole soojusõpetuses aga kunagi räägitud soojuse jäävuse seadusest.

3.4. Soojuse ja töö varude individuaalse määratlemise võimatus



Kuidas määrata töö varu?

Laseme hõõguva raua vette. Energia väljub süsteemist kahes vormis.

Katse 1: rihtm peal.

Katse 2: rihtm maas.

3.5. Termodünaamika I seadus

Soojushulga arvel saab teha tööd ja tööd kulutades saab tekitada soojust.



Vaatleme protsesse, mille puhul süsteemi lõppolek on identne algolekuga ning küsime, kuidas on Q ja A teineteisega seotud. Eksperimentaaluuringute tulemuseks on soojushulga ja töö ekvivalentsuse seadus

$$A = c_J \times Q,$$

kus töö ja soojushulga etalonide valikust olenevat universaalkonstanti c_J nimetatakse soojuse mehaaniliseks ekvivalendiks.

Sisult üht ja sama seadust on võimalik nii formuleerida kui nimetada mitmel erineval viisil. Töö ja soojushulga ekvivalentsuse väide on termodünaamika esimese seaduse algne formulatsioon.

Ekvivalentsus lubab mõõta tööd soojushulga ühikutes ja vastupidi ning defineerida soojushulga ja töö ühise varu. Soojusvaba protsessi korral on see suurus mehaanikast tuntud konservatiivse süsteemi mehaaniline energia. Siit tulenevalt nimetatakse töö ja soojushulga ühist varu energiaks üldistatud mõttes.

Energia defineerimisel ei seata vaadeldavaile süsteemidele mingeid kitsendusi. Täielikult isoleeritud süsteemi energia ei saa mingil juhul muutuda. Kui selline süsteem koosneb kahest teineteisest isoleerimata osasüsteemist, siis kasvab ühe osasüsteemi energia alati täpselt samapalju, kuipalju kahaneb teise osasüsteemi energia. Termodünaamika esimene seadus on üldine energia jäävuse seadus: energia tekkimine ega hävimine pole võimalik. Seadus ei kehti eraldi võetuna ei mehaanilise energia ega soojuse kohta.

Näited:

- *sumbuv pendel* hävitab mehaanilist energiat,
- *soojusjõumasin* hävitab soojuslikke “varusid”.

Seaduse kontrollimiseks võib mõõta adiabaatilisel isoleeritud süsteemi tööd katsetes, kus üks ja sama süsteem viiakse välisjõudude abil kindlast algolekust kindlasse lõppolekusse mitmel erineval viisil. See on analoogiline mehaanilise potentsiaalse energia ühesuse kontrollimisega.

Kui soojuste mehaaniline ekvivalent ei oleks universaalne ja võiks omada erinevates protsessides erinevaid väärtusi, siis saaks energiat lihtsal viisil suurendada või vähendada. Siit nähtub seaduse kahe formulatsiooni sisuline samaväärsus.

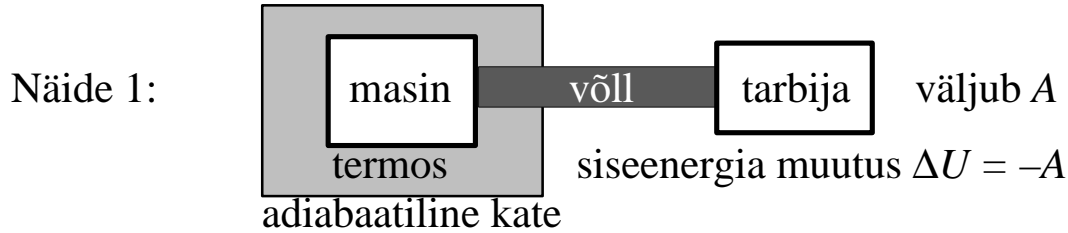
Termodünaamika esimese seaduse kõige usaldusväärsema tõestuse autoriteks on perpetuum mobile leiutajad ja nende leiutustepanekute analüüsijad. Seetõttu võiks ehk kõige fundamentaalsemaks pidada termodünaamika esimese seaduse Ostwaldi formulatsiooni: esimest liiki perpetuum mobile on võimatu.

Wilhelm Friedrich Ostwald sündis Riias 1853, lõpetas Tartu Ülikooli 1875 ja töötas siin kuni 1881. Sai Nobeli preemia 1909. Nõukogude õppekirjanduses oli Ostwald “sobimatute” filosoofiliste vaadete tõttu osaliselt põlu all.

3.6. Siseenergia ja termodünaamika esimese seaduse võrrand

Välisenergia = süsteemi kui terviku liikumise mehaaniline energia. Energia on samaviisi suhteline nagu kiirus ja alati on võimalik valida välisenergiavaba taustsüsteem. Termodünaamikas nii tehaksegi ja süsteemi välisenergiale tähelepanu ei pöörata.

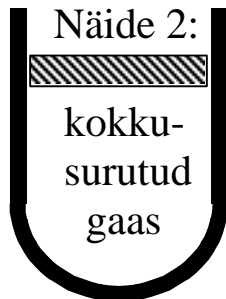
Süsteemi poolt tehtud töö ja soojuste vormis üle kantud energia on protsessifunktsioonid. Milliste parameetritega saaks kirjeldada süsteemi soojuslikku olekut?



Adiabaatiliselt isoleeritud süsteemi energiabilanss $\Delta U + A = 0$ ehk $dU + \delta A = 0$.

NB: pange tähele d ja δ erinevust!

ΔU on üheselt määratud, U ise aga ei ole, samaviisi kui mehaanikas potentsiaalse energia puhul. Algolek $U = 0$ on kokkuleppeline.



$$\delta A = F dl = p S dl = p dV$$

$$p dV + dU = 0$$

Juhul, kui süsteem ei ole soojuslikult isoleeritud, lisandub energiabilansi võrrandisse soojuste kujul ülekantud energia. Kui soojushulka mõõdetakse fundamentaalsuurusena ja originaalühikutes, siis

$$\Delta U + A = c_J Q .$$

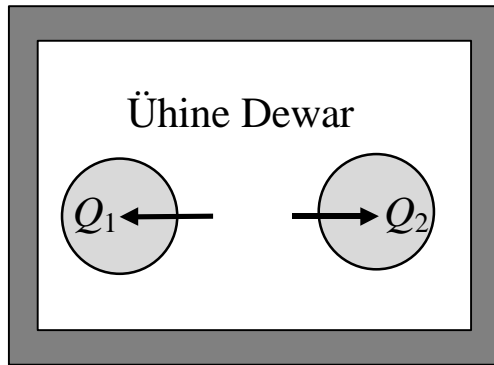
Energiabilansi üldist võrrandit nimetatakse termodünaamika esimese seaduse võrrandiks.

3.7. Soojushulga mõiste degradeerimine

Termodünaamika esimene seadus lubab soojust mõõta mehaanikahikutes. Fundamentaalmõõtmiseks sobib Joule'i kompensatsioonimeetod.



Mõõtühik J.



Küsimus: kas võiks defineerida Q kui energiabilansi täienduse: $Q = A + \Delta U$ ja kuulutada ta mittefundamentaalseks füüsikaliseks suuruseks? Termodünaamika esimese seaduse traditsiooniline võrrand oleks sellega degradeeritud soojushulka defineerivaks kokkuleppeks mida ei saa käsitada kui loodusseadust. Meenutame üht varasemat mõttelist katset. Kuna soojushulk ei ole nüüd fundamentaalselt

defineeritud, ei saa enam otseselt väita, et $Q_1 = -Q_2$. Soojushulkade suhet saab uurida ainult eksperimentaalselt. Kui katsed tõestavad, et soojushulkade absoluutväärtused on alati võrdsed, on viimane väide käsitatav kui loodusseadus. See on sisu poolest sama kui termodünaamika esimene seadus. Niiviisi lisandus veel üks

termodünaamika esimese seaduse sõnastamise võimalus. Kõik on korrektne kuid veidi harjumatu ja rakendamiseks ebamugav.

Kui soojushulka mõõdetakse tööühikutes, siis on $c_J = 1$ ja termodünaamika esimese seaduse võrrandit võib kirjutada ühel alljärgnevatest kujudest:

$$\Delta U = Q - A \qquad Q = \Delta U + A \qquad \delta Q = dU + \delta A.$$

Lühikokkuvõte.

Siseenergia U on süsteemi olekuga määratud varu, mida mõõdetakse kokkuleppelise algoleku suhtes. Töö A ja soojushulk Q on ülekantava energia hulga mõõdud ja kumbki neist ei kirjelda süsteemi olekut ega ole tõlgendatav kui varu. Siseenergia on olekufunktsioon, töö ja soojushulk aga protsessifunktsioonid. Töö loetakse kokkuleppeliselt positiivseks siis, kui energia suundub süsteemist välja, soojushulk aga siis, kui energia suundub süsteemi sisse. Soojushulka mõõdetakse tavaliselt tööühikutes. Energiabilansi ehk termodünaamika esimese seaduse võrrand on seetõttu: $\Delta U = Q - A$.