

**Pro Gradu – tutkielma**

**Mikrotason kuvailu lukion lämpöopin opetuksessa**

**Jonne Lakanen**



**Jyväskylän yliopisto**

**Fysiikan laitos**

**13.2.2007**

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta

Fysiikan laitos

Lakanen Jonne, S.: Mikrotason kuvailu lukion lämpöopin opetuksessa  
Pro gradu: s.72  
Työn ohjaajat: Juha Merikoski  
Tarkastajat: Juha Merikoski ja Hannu Koivisto  
Helmikuu 2007

---

Hakusanat: fysiikka, opetus, lämpöoppi, termodynamiikka, mikroskooppinen, mikrotaso, aineen hiukkasmalli

## TIIVISTELMÄ

Fysiikan opetuksessa lämpöoppi koetaan vaikeaksi aiheeksi opettaa. Lämpöopin opetusta hankaloittavat käsitteet, joilla on arkikielessä eri merkitys kuin fysiikassa, sekä lämpöopin ilmiöiden abstraktius. Oppilaiden käsityksiä lämpöopin ilmiöistä on tutkittu jo 1960-luvulta saakka. Tutkimusten perusteella oppilailla on opetuksesta huolimatta paljon epätasällisiä käsityksiä lämpöilmiöiden fysikaalisesta luonteesta. Lukion lämpöoppi koostuu pääosin makroskooppisesta kuvailusta. Lämpöilmiöiden fysikaalinen selitys vaatii kuitenkin mikrotason eli aineen hiukkasmalliin pohjautuvaa kuvailua. Opinnäytetyössäni tarkastelen lämpöopin opetusta mikroskooppisen lähestymisen näkökulmasta ja pohdin, miten mikrotason kuvailu voisi parantaa lämpöopin opetusta. Selvitän myös, minkälaista mikrotason kuvailua esiintyy nykyisissä lukion lämpöopin oppikirjoissa ja missä yhteydessä. Hyvin toteutettuna mikrotason kuvailu voi tukea oppilaiden käsitteellisen tietämyksen kehittymistä ja parantaa oppilaiden valmiuksia ymmärtää lämpöopin ilmiöitä. Mikrotason kuvailua tulisi lisätä lämpöopin oppikirjoihin varsinaisen termodynamiikan yhteyteen.

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
2	LÄMPÖOPIN HISTORIA.....	7
2.1	Kalorikkiteoria .....	7
2.2	Kalorikkiteorian johdattelemana.....	7
2.3	Mekaniikka luo pohjaa lämmön määrittelyyn .....	8
2.4	Kohti termodynamiikan ensimmäistä lakia .....	8
2.5	Kokeellisuuden kautta voittoon .....	9
2.6	Termodynamiikan ensimmäinen laki saa matemaattisen muotoilun .....	9
2.7	Termodynamiikan lait.....	9
2.8	Maxwell ja lämmön mikroskooppinen luonne .....	10
2.9	Kineettinen kaasuteoria täydentyy .....	11
2.10	Brownin liike .....	12
3	LÄMPÖOPIN TEOREETTISTA TAUSTAA .....	13
3.1	Makroskooppinen ja mikroskooppinen.....	13
3.2	Lämpö ja lämpöenergia.....	13
3.3	Termodynamiikan systeemit ja terminen tasapaino.....	14
3.4	Lämpötila-asteikot .....	14
3.5	Ominaislämpö .....	14
3.6	Olomuodonmuutokset.....	15
3.7	Ominaissulamis- ja höyrystymislämpö.....	16
3.8	Lämpölaajeneminen .....	17
3.9	Lämmön johtuminen, siirtyminen ja säteily .....	17
3.10	Termodynamiikka .....	18
3.11	Ensimmäinen pääsääntö .....	19
3.12	Hyötysuhde .....	19
3.13	Entropia.....	20
3.14	Toinen pääsääntö .....	21
3.15	Kolmas pääsääntö .....	22
3.16	Ideaalikaasu ja kineettinen kaasuteoria.....	22
3.17	Kaasun tilanyhtälö .....	23
3.18	Ideaalikaasun energia.....	24
4	OPPILAIKEN KÄSITYKSIÄ LÄMMÖSTÄ .....	26
4.1	Lämpö ja lämpötila .....	26
4.2	Lämpö on ainetta.....	27
4.3	Aineella ja kappaleilla on lämpöä koskevia ominaisuuksia .....	27
4.4	Eristeet ja johteet.....	28
4.5	Lämpö on energiaa.....	29
4.6	Olomuodonmuutokset.....	30
4.7	Termodynamiikan I laki.....	30
5	MITEN LÄMPÖOPPIA TULISI OPETTAA .....	32

5.1	Valtakunnallinen opetussuunnitelma .....	32
5.2	Oppilaiden valmiudet.....	33
5.3	Motivaatio .....	34
5.4	Havainnollistaminen .....	35
5.5	Muita perusteluja mikroskooppiseen lähestymiseen .....	36
5.6	Ongelmia mikroskooppisen lämmön opetuksessa .....	37
5.7	Ohjeita opetukseen.....	38
5.8	Tutkimus termodynamiikan opetuksesta lähtökohtana aineen hiukkasmalli....	38
<b>6</b>	<b>OPPIKIRJA-ANALYYSI.....</b>	<b>40</b>
6.1	Analyysin rakenne .....	40
6.2	Oppikirjojen sisältö .....	41
6.3	Yleiset lähestymistavat .....	42
6.4	Mikroskooppisen lähestymistavan esiintyminen .....	44
6.5	Mikrotason näkökulmia lämpöopin tärkeisiin aiheisiin.....	53
6.6	Aineen hiukkasmalli ja olomuotojen rakenne.....	53
6.7	Lämpö ja lämpötila .....	55
6.8	Olomuodonmuutokset.....	56
6.9	Lämmön siirtyminen.....	58
6.10	Lämpöopin pääsäännöt .....	60
<b>7</b>	<b>PÄÄTELMÄT .....</b>	<b>63</b>

# 1 JOHDANTO

Lämpöoppi on vaikea aihe opettaa, minkä joutuvat toteamaan niin alaluokkien, peruskoulun ja lukion opettajat kuin yliopistojen ja ammattikorkeakoulujen luennoitsijatkin. Lämpöilmiöt ohjaavat luonnon olosuhteita, kuten veden jäätymistä talvisin, joten ne ovat yleisesti tunnettuja ilmiöitä. Ihmisillä on tapana tehdä luonnonilmiöistä maalaisjärkeen perustuvia päätelmiä: ”Koska metallikaide tuntuu puuseinää kylmemmältä, on metallikaiteen lämpötila alhaisempi kuin puuseinän”. Fysiikan näkökulmasta lämmön olemus on kuitenkin monimutkainen ja hankala. Havainnot eivät aina riitä selittämään, miksi luonnon prosessit etenevät tiettyyn suuntaan. Lämpöilmiöiden selittäminen vaatii aineen hiukkasluonteen tuntemista. Ei ole siis ihme, että ihmisten päätelmät ja oletukset niistä ovat usein epätasällisia. Fysiikan opetuksen tehtävänä on antaa oppilaille nykyisen tietämyksen mukainen selitys luonnon ilmiöille ja tukea oppilaiden käsitteellistä, päättelyyn perustuvaa tietämystä.

Lämpöopin vaikeus tulee esille sen historiasta. Lämpöoppi on kehittynyt vuosisatojen ajan aina 1600-luvulta lähtien. Lämpöä pidettiin alun alkujaan kalorikkina eli ”virtaavana aineena” sen ainemaisten ominaisuuksien vuoksi. Lämpö lukeutui valon kanssa usean muun ”alkuaineen” joukkoon. Joulen määritettyä lämmön mekaanisen ekvivalentin joutui kalorikkiteoria väistymään ja tilalle nousi käsitys lämmöstä energian muotona. Termodynamiikan lakien yhteydessä lämmölle määriteltiin sen täsmällinen makroskooppinen luonne siirtyvänä energiana. Termodynamiikan lait eivät kuitenkaan selittäneet lämpöilmiöitä kuten lämmön hajaantumista. Vasta kun aineen hiukkasluonne ymmärrettiin kunnolla 1900-luvun alusta lähtien, saatiin lämpöilmiöille tyydyttävä selitys. Mikrotasolla lämpö on aineen hiukkasten satunnaista liikettä, ja lämmön makroskooppiset ilmiöt selittyvät tarkastelemalla hiukkasten keskimääräistä liikettä. Lämpöoppi on tietyllä tavalla verrattavissa valo-oppiin. Valolla on sekä hiukkas- että aaltoluonne. Lämmöllä on puolestaan mikroskooppinen hiukkasluonne ja makroskooppinen energialuonne. Lämpöopilla on kuitenkin vahva historiallinen side klassiseen mekaniikkaan, mikä näkyy tavasta opettaa lämpöoppia.

Lämpöopin periaatteita sisältyy nykyään jo alaluokkien fysiikan opetukseen, pääosin veden olomuotojen yhteydessä. Yläluokkien opetuksessa painottuu kokeellinen toiminta, jossa käsitellään havainnoitavissa olevia ilmiöitä kuten lämpölaajenemista. Lukiossa päästään käsiksi lämpöopin teoreettiseen puoleen, joka sisältää suuren määrään uusia käsitteitä sekä lämpöilmiöiden makroskooppista ja mikroskooppista kuvailua. Makroskooppisella tarkoitetaan suoraan havainnoitavissa olevaa mittakaavaa ja mikroskooppisella aineen hiukkastason mittakaavaa.

Nykyisessä lukion lämpöopin opetuksen sisällössä näkyy edelleen sen historiallinen tausta. Makroskooppisella kuvailulla on ensisijainen asema. Ilmiöitä ei useinkaan pyritä selittämään syvällisesti, vaan ne pyritään tekemään tutuiksi. Makroskooppinen kuvailu koetaan ehdottoman tärkeäksi, kun taas mikrotason kuvailu koetaan ehkä kuormittavaksi lisätiedoksi. Kummallakin lähestymistavalla on tärkeä asema lämpöopin opetuksessa. Mikrotason kuvailu antaa selityksen havainnoitavalla makrotason ilmiölle.

Lämpöopin opetuksen tutkimuksissa oppilaille on todettu olevan monenlaisia vaikeuksia ymmärtää täsmällisesti lämpöopin käsitteitä. Vaikeudet johtuvat sekä heidän tavastaan tehdä fysiikan kannalta epäoleellisia päätelmiä että opetuksen puutteista.

Oletuksenani on, että mikrotason selitysmallit voisivat edesauttaa oppilaita ymmärtämään paremmin lämpöopin makroskooppisia ilmiöitä. Näitä syvällistä fysiikkaa sisältäviä selityksiä ei kuitenkaan korosteta riittävästi opetuksen sisällössä, mikä näkyy myös oppimistuloksissa. Mikrotason kuvailu todennäköisesti kehittää oppilaiden päättelykykyä muissa fysiikan aiheyhteyksissä.

Mikroskooppinen lähestyminen lämpöopin opetuksessa ei ole itsestään selvää. Sitä on tutkittu maailmalla varsin vähän, eikä näyttöä sen toimivuudesta juurikaan ole. Lisäksi lämpöopin mikrotason selitykset voivat olla sekä oppilaille että opettajille haasteellisia, minkä vuoksi ne saatetaan sivuuttaa. Jotta mikrotason kuvailusta olisi hyötyä, on siinä pyrittävä johdonmukaisuuteen ja laatuun. Erityisen tärkeää opetuksen sisällössä on se, millä tavoin mikrotason kuvailua esiintyy oppikirjoissa.

Opinnäytetyöni tarkoituksena on ensisijaisesti tutkia, miten lukion lämpöopin opetuksessa voitaisiin hyötyä mikrotason kuvauksesta. Toiseksi tarkoituksenani on selvittää, miten paljon ja missä yhteyksissä mikrotason kuvailua käytetään nykyisissä lukion lämpöopin oppikirjoissa. Kiinnitän huomiota mikrotason kuvailun täsmällisyyteen ja laatuun. Tarkastelujeni pohjalta annan ehdotuksia kehittää mikrotason kuvailun käyttöä oppikirjojen sisällössä ja erityisesti lämpöopin opetuksen sisällössä.

Opinnäytetyöni pääteemat:

Mikrotason kuvailun hyödyt lämpöopin opetuksessa

Mikrotason kuvailun esiintyminen nykyisissä lukion oppikirjoissa

## 2 LÄMPÖOPIN HISTORIA

### 2.1 Kalorikkiteoria

Ensimmäinen lämpöön yhdistettävä fysikaalinen teoria oli niin kutsuttu kalorikkiteoria, joka säilyi yleisesti hyväksyttynä teoriana aina 1800-luvun puoliväliin saakka. Kalorikki-käsitteen otti ensimmäisenä käyttöön modernin kemian isä Antoine Lavoisier. Hänen vuonna 1789 julkaisemassaan vaikutusvaltaisessa oppikirjassa ”Kemian alkeet” oli luetteloitu 33 perusainetta, joista ensimmäisenä oli mainittu kalorikki ja toisena valo (von Baeyer 1998). Lämpö ja siihen liittyvät ilmiöt johtuivat teorian mukaan kalorikista, kuvitteellisesta alkuaineesta, joka oli nestemäistä, näkymätöntä ja massatonta. Uskottiin, että muiden alkuaineiden tapaan kalorikkia ei voinut syntyä eikä hävitä. Lämpötilan ajateltiin johtuvan kalorikin määrästä. Mitä enemmän kappaleen atomien välisessä tyhjässä tilassa oli kalorikkia, sitä suurempi oli sen lämpötila. Lämpötilaerojen tasoittumisessa kalorikin uskottiin virtaavan kuumasta kylmään, mikä teorian mukaan aiheutti myös kappaleissa havaitun lämpölaajenemisen. Kalorikin määrän lisääntymisen ajateltiin nimittäin kasvattavan kappaleen tilavuutta. Energian yksikkö kalori juontaa nimensä kalorikkiteoriasta. Yksi kalori vastaa lämpö määrää, joka tarvitaan lämmittämään yksi gramma vettä yhden celsiusasteen verran normaalipaineessa.

### 2.2 Kalorikkiteorian johdattamana

Kalorikkiteoriaan tukeutuviin fyysikkoihin lukeutui Ranskan armeijan insinööri Sadi Carnot, joka eli 1800-luvun Pariisissa. Nuori Carnot oli kiinnostunut lämpökoneista ja niiden toimintaperiaatteista. Lämpökoneella tarkoitetaan mitä tahansa konetta, joka muuttaa lämpöä mekaaniseksi energiaksi. Hän uskoi, että lämpö saa aikaan liikettä, ja että tämä liike johtuu kalorikin virtauksista. Tutkiessaan hiilen palamisessa irtaantuvan kalorikin virtausta hän sai hätkähdyttävän oivalluksen. Rakenteestaan riippumatta lämpökone luovuttaa lämpöä ympäristöönsä. Toisin sanoen kaikkea koneen tuottamaa lämpöä ei voida hyödyntää mekaaniseksi energiaksi. Hän jatkoi päätelmäänsä todeten, että lämmön siirtyminen ympäristöön ei ollut kuitenkaan huono asia, vaan fysikaalisesti väistämätön ilmiö. Se oli lämmön liikkeelle paneva voima (von Baeyer 1998).

Carnot onnistui pukemaan ajatuksensa hyvin yleisluontoiseen muotoon. Hän pohti lämmön lähdettä ja ympäristöä kahtena erillisenä lämpösäiliönä, jotka ovat eri lämpötiloissa, toinen korkeassa lämpötilassa ja toinen matalassa lämpötilassa, ja tuli siihen johtopäätökseen, että lämpökoneen hyötysuhde riippuu ainoastaan lämpösäiliöiden lämpötilaerosta. Käytännössä lämpösäiliöinä voivat toimia esimerkiksi höyrykoneen palava hiilipesäke ja sitä ympäröivä ilma. Carnot’n ajattelu oli tuona aikakautena harvinaisen abstraktia. Itse asiassa Carnot oli lähellä onnistua muotoilemaan termodynamiikan toisen pääsäännön, jonka yhtenä ilmaisumuotona on lämmön virtaaminen kuumasta kylmään. Carnot’n työ oli huomattavan tärkeää höyrykoneiden kehittymiselle, mutta hänen kalorikkiteoriaan pohjautuva teoreettinen pohdiskelunsa oli vielä melko kaukana lämmön todellisen luonteen ymmärryksestä.

## 2.3 Mekaniikka luo pohjaa lämmön määrittelymiseen

1600-luvulla Newtonin mekaniikkaa alettiin soveltaa myös lämpöilmiöihin. Englantilainen Francis Bacon esitti rohkeasti ajatuksiaan lämmöstä: ”Lämpö itse, sen olemus ja ydin on liikettä, ei mitään muuta” (von Baeyer 1998). Fysiikan lämpö-käsitteen varsinaisena isänä pidetään kuitenkin Benjamin Thompsonia eli Kreivi Rumfordia. Palvellessaan Englannin sotavoimissa 1700-luvun lopulla Kreivi Rumford tutki tykkien toimintaperiaatteita, tykkien joita ei tosin ollut tarkoitettu tieteen palvelukseen vaan ranskalaisten tappamiseen. Kreivi Rumford oli ollut koko elämänsä ajan hyvin kiinnostunut lämmöstä ja tulesta. Niinpä ei ollut ihme, että hän kiinnitti huomionsa tykkien sorvaamisesta syntyneeseen lämpöön, joka tuolloin käsitettiin kalorikkina. Hän ryhtyi tutkimaan, miten paljon lämpöä syntyy metallien hangatessa toisiaan. Hän teki kokeita ahtaissa ja epämiellyttävissä oloissa yrittäen löytää selitystä kitkan ja lämmön väliselle yhteydelle. Hän päätyi lopulta perusteellisten tutkimusten jälkeen siihen lopputulokseen, ettei liikkeestä syntynyt lämpö voinut olla ainetta, vaan liikettä itsessään (von Bayer, 1998). Lämmön ja kitkan välinen yhteys oli kiistaton, mutta kalorikkiteorian kannattajat olivat yhä toista mieltä. Myös Kreivi Rumford myönsi ymmärtämättömyytensä: ”Olen kaukana siitä, että teeskentelisin tietäväni, miten tuo erityislaatuinen kappaleiden liike, jonka on oletettu muodostavan lämmön, syntyy, jatkuu ja leviää” (von Baeyer 1998). Käsitteily liikkuvista atomeista ja molekyyleistä olisi saattanut vahvistaa hänen näkemyksensä, mutta niiden aika koitti vasta vuosisata myöhemmin.

## 2.4 Kohti termodynamiikan ensimmäistä lakia

Saksalainen lääkäri Robert Julius Mayer teki tietämättään merkittävän oivalluksen lämmön käsitteen ja mekaniikan työkalun välisestä yhteydestä. Mayer oli kiinnostunut fysiikasta, mutta luopui fysiikan opiskeluistaan yhden lukukauden jälkeen ryhtyessään lääkäriksi ja erikoistuen verenkiertoon. Valmistuttuaan hän lähti merille laivalääkäriksi, jolloin hänelle jäi runsaasti aikaa pohtia lääketieteen ja fysiikan ilmiöitä. Eräänä päivänä tropiikissa matkatessaan hän kiinnitti huomioita ihmisten harvinaisen kirkkaaseen verenlaatuun. Koulutuksensa pohjalta hän tiesi, että ihmiskeho tuottaa tuhkaa polttaessaan hiiltä, jolloin veri näyttää tummempalta. Havainnostaan hän päätteli, että tropiikin lämpimässä ilmassa ihmisen keho kuluttaa vähemmän ravintoa kuin kylmemmässä ilmanalassa, joten ihmiskehon lämmittämiseen täytyy kulua ravintoa. Näin ollen hän yhdisti ajatuksissaan kaksi aikaisemmin täysin toisistaan riippumattomana pidettyä asiaa. Mayerin kiinnostus ilmiötä kohtaa syttyi fysiikan näkökulmasta, mutta lääketieteen tuntemuksen avulla hän osasi hyödyntää päättelyssään mikroskooppista lähestymistä. Hän kuvitteli, että ihmiskeho toimii kuten lämpökone tuottaen hiilestä työtä, lämpöä ja liikettä. Yrittäessään löytää fysiikan teorioista selitystä tähän yhteyteen, joka vallitsi hiilen, lämmön ja mekaanisen työn välillä, hän teki mahtavan oivalluksen: ”On oltava voimaa (energiaa), joka on muunneltavissa ja joka on toisaalta häviämätöntä” (von Bayer 1998). Hänen ajatuksensa oli ehkä hieman kömpelästi muotoiltu, mutta hän oli erittäin lähellä saavuttaa nykyisen energian säilymislain periaatteen. Mayer ei ollut oppinut fyysikko, eikä hän osannut tuoda ajatuksiaan riittävän formaalisti esille tieteellisen julkaisun muodossa, mutta häntä voidaan pitää yhtenä termodynamiikan ensimmäisen lain keksijöistä.



## 2.5 Kokeellisuuden kautta voittoon

Samoihin aikoihin englantilaisen panimomestarin poika Prescott Joule teki perusteellisia mittauksia lämmön ja energian suhteista. Joule oli kokeellisen fysiikan taitaja, jonka sanottiin kykenevän havaitsemaan mittaustarkkuuksia, joihin tavalliset silmät eivät kyenneet. Hän teki lämpömittarin asteikon lukemisesta taidetta. Vuonna 1840 Joule esitti mittaustensa perusteella lämmön ja johtimen läpi kulkevan virran yhteyden. Nykyään Joulen laiksi kutsuttu periaate ei saanut kuulijakuntaa hämilleen eikä esitykselle annettu suurta arvoa. Vasta vuonna 1843 Joulen todistaessa, että lämpö syntyi johtimessa, eikä se ollut peräisin muista kappaleista tai ympäristöstä, sai kalorikkiteoria varteen otettavan haastajan. Joulen kokeet ja päätelmät syrjäyttivät vuoteen 1950 mennessä kalorikkiteorian, sillä enää ei voitu kieltää mekaanisen energian muuttumista lämmöksi. ”Jos tietyn työmäärän muuttaminen ensin sähköenergiaksi ja sitten lämmöksi tuottaa saman tuloksen kuin sen tuottaminen suoraan lämmöksi, yhtään energiaa ei katoa muutosprosessissa” (von Bayer 1998). Näin termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön periaate oli syntynyt. Energia voi muuttaa muotoaan, mutta systeemin kokonaisenergia säilyy. Joule pystyi myös siipipyöräkokeillaan määrittämään hyvin tarkan arvon lämmön mekaaniselle ekvivalentille, joka nykyisen SI-järjestelmän mukaan vastaa arvoa 4,159 J/cal.

## 2.6 Termodynamiikan ensimmäinen laki saa matemaattisen muotoilun

Saksassa opettajan perheeseen syntynyt Herman von Helmholtz oli yksi 1800-luvun monipuolisimpia fyysikkoja. Hän opiskeli lääkäriksi ja toimi Preussin armeijan kirurgina. Hän oli jo nuorena poikana haaveillut fyysikon urasta. Hän perusti armeijan parakkeihin pienen tutkimuslaboratorion fysiikan ja fysiologian tutkimusta varten. Vuonna 1847 hän loi energian säilymislailla matemaattisen muotoilun, mikä tuki Joulen kokeellista tutkimustyötä ja väittämiä. Helmholtzin teoreettinen lähestymistapa oli yleispätevä ja se soveltui mekaniikkaan, lämpöön, sähköön, magnetismiin, fysikaaliseen kemiaan ja tähtitieteeseen. Toisin kuin Joule, Helmholtz oli kova teoreetikko, jota kiinnosti erityisesti fysiikan matemaattinen puoli. Elämänsä aikana hän ehti niittää mainetta silmän fysiologisessa tutkimuksessa sekä fysiikan teoreettisen tutkimuksen saralla niin termodynamiikassa, nestemekaniikassa kuin sähködynamiikassakin.

## 2.7 Termodynamiikan lait

“Rudolf Clausius oli tyypillinen saksalainen professori 1800-luvun oppineisuuden hengessä” (von Baeyer, 1998). Nykyään häntä kutsutaan useassa yhteydessä termodynamiikan isäksi, joka korjasi Carnot’n työn ristiriidat. Vuonna 1850 hän kävi lämmön teorian kimppuun aseenaan Joulen ja Mayerin ansiokas työ kalorikkiteorian kumoamiseksi sekä Helmholtzin valokeilaan nostama termodynamiikan ensimmäinen laki. Clausius kuitenkin tajusi, että jotain puuttui vielä lämmön teoriasta. Miksi lämpö virtaa aina kuumasta kylmään? Miksi kuuma kahvikuppi jäähtyy, eikä lämpene? Carnot näki höyrykoneitaan tarkkaillessaan lämmön polttoaineena kalorikin, joka piti koneet käynnissä, mutta ei kulunut prosessissa vaan siirtyi lämpösäiliöstä toiseen. Clausius tiesi, että tämä ei sopinut yhteen termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön kanssa. Osan

lämmöstä oli siis muututtava mekaaniseksi energiaksi. Niinpä hän lähti luomaan teoriaa tästä uudesta näkökulmasta.

Tuodakseen toisen lain muotoilun lähemmäksi kokemuspiiriämme Clausius päätteli seuraavaa: ”Jos olisi olemassa laite, joka ei hukkaa lämpöä – sanotaan vaikka laite, joka muuttaa jääkaapin poistaman lämmön sähköksi. Jos tuota sähkövirtaa voitaisiin käyttää pitämään jääkaappi toiminnassa, nuo kaksi laitetta siirtäisivät jääkaapista lämpöä ympäristöönsä ilman ulkoista voimanlähdettä” (von Baeyer 1998). Kyseessä olisi ”ikiliikkujajääkaappi”. Tiedämme kuitenkin kokemuksesta, ettei sellaista laitetta ole olemassa. Ei ole konetta ilman lämmön hukkaa. Kauniissa yksinkertaisuudessaan toinen laki sanoo: Lämpö virtaa luonnostaan kylmään, ei toisinpäin. Tämä saattaa kuulostaa meistä itsestäänselvyydeltä, mutta toisaalta myös hyvin vaikealta asialta hyväksyä. Miksi luonto toimii juuri näin? Onko mahdollista, että löytyisi keino kiertää tämä luonnon laki? Termodynamiikan toisen lain nojalla voimme sanoa, että ei ole. Clausius hyväksyi Joulen päätelmän lämmön mekaanisesta ekvivalentista, jonka Helmholtz hieman myöhemmin käänsi matemaattiseksi yhtälöksi, sekä korjasi Carnot’n tulokset täsmälliseen muotoon. Siinä missä Mayeria ajoi eteenpäin usko sielun kuolemattomuuteen ja Joulea usko maailmankaikkeuden jumalalliseen järjestykseen, Clausius sai innoituksen säästäväisyyden periaatteesta. Hän etsi täydellistä ilmausta. Vuonna 1950 hän julkaisi kaksi lämmön teorian keskeistä periaatetta: (1) energia säilyy ja (2) lämpö virtaa luontaisesti kuumasta kylmään.

Välittömästi lausuttuaan yhtälönsä termodynamiikan toisen lain yksinkertaisessa muodossa Clausius ryhtyi kääntämään sitä matemaattiselle kielelle. Vaikka hän kuinka yritti, hän ei onnistunut tekemään sitä pelkästään energian termein, vaan hänen oli lisättävä matemaattisen yhtälönsä uusi suure. Tämä abstrakti teoreettinen käsite sai nimekseen entropia, joka tarkoitti kreikan kielellä muutosta. Clausius kuvaili sananvalintaansa: ”...olen tarkoituksella muodostanut sanan entropia niin, että se on samanlainen sanan energia kanssa, sillä nämä molemmat suureet,..., ovat läheistä sukua toisilleen niiden fysikaalisen merkityksen suhteen.”. Sir Arthur Eddington on sanonut termodynamiikan toisesta laista seuraavaa: ”Laila, jonka mukaan entropia aina kasvaa, on mielestäni ylin asema Luonnon lakien joukossa”. Entropiasta käytetään lyhennettä S ja se kuvaa makroskooppisesti lämmön ja absoluuttisen lämpötilan suhdetta. Nykyään termodynamiikan oppikirjoissa toista lakia kuvataan entropian avulla: reversiibelissä (käänteinen) prosessissa entropia säilyy; irreversiibelissä entropia kasvaa. Clausius päätti vuonna 1864 julkaisemansa artikkelin ilmaisemalla termodynamiikan kaksi ensimmäistä päälakia tiiviissä muodossa, jotka merkityksensä laajuudessa herättävät kunnioitusta:

- 1) Maailmankaikkeuden energia on vakio
- 2) Maailmankaikkeuden entropia pyrkii kohti mahdollisimman suurta arvoa.

## 2.8 Maxwell ja lämmön mikroskooppinen luonne

Maxwellin yhtälöt ovat tuttuja jokaiselle sähköopin opiskelijalla; neljä tiiviiseen differentiaalimuotoon puristettua yhtälöä, jotka yhdistävät sähköisen ja magneettisen vuorovaikutuksen sekä kuvaavat sähkömagneettisten kenttien käyttäytymistä. Yhtälöiden takana oli skotlantilainen fyysikko James Clerk Maxwell, jonka uteliaisuus maailman fysikaalisia ilmiöitä kohtaan oli ylivertainen. Maxwell oli loistava fyysikko ja

erinomainen matemaatikko. Hän julkaisi ensimmäisen virallisen matematiikan julkaisun ollessaan vasta neljäntoista vuoden ikäinen. Lahjakkuus yhdistettynä hänen leikkisään innostukseensa sai aikaiseksi lämpöopin ja sähkömagnetismin tärkeitä teorioita. Suurimman osan työstään Maxwell omisti sähkölle. Vuonna 1864 hän julkaisi ensimmäisen kerran kuuluisat sähkömagnetismin yhtälönsä, jotka loivat jatkossa pohjan sähkömagneettisten ilmiöiden tutkimiseen.

Lämpö oli toinen Maxwellille rakkaista ilmiöistä ja jaksoi askarruttaa häntä aina hänen elämänsä loppuun saakka. Maxwellilla oli voimakas näkemys aineen atomisesta rakenteesta. Hän tiesi, että matemaattisten mallien juurten täytyy aina olla kokeellisesti käsiteltävissä. Ryhtyessään pohtimaan termodynamiikkaa molekyylien liikkeen näkökulmasta hän kuitenkin joutui luopumaan havaintojen tarjoamasta totuuden maaperästä. Maxwell oli kuitenkin rohkea eikä antanut epäilyksen vaikuttaa ratkaisuunsa. Hän halusi kokeilla, mihin aineen molekyylinen tarkastelu lämmön suhteen johtaa. Vuonna 1867 hän muodosti tilastollisen kineettisen kaasuteorian, joka oli ensimmäinen varteenotettava mikroskooppinen lähestyminen lämpöön. Toki pohdintoja lämmön mikroskooppisesta luonteesta olivat aikaisemmin jo käyneet Bacon ja Lordi Rumford.

Kineettisessä teoriassa lämpö ja lämpötilat ovat seurausta molekyylien ja niiden rakenneosien liikkeestä. Yksi kuutiokeskimetri ilmaa sisältää noin  $10^{19}$  molekyyliä. Ei ole mitenkään mahdollista mitata yhden molekyylin sijaintia ja nopeutta (Ohanian 1988). Emme siis voi saada selville yhden molekyylin liikettä, saati sitten useamman molekyylin yhtäaikaista liikettä. Maxwellin ja hänen seuraajaansa Ludwig Boltzmanin neronleimaus oli soveltaa tilastollisia menetelmiä termodynamiikassa. He kehittivät matemaattiset työkalut, joilla voidaan tutkia makroskooppisia ilmiöitä mikroskooppisista lähtökohdista. Siirtyessään varmuudesta todennäköisyyksiin Boltzmann ja Maxwell loivat pohjan modernille fysiikalle, joka jatkossa poiki uusia tutkimushaaroja, esimerkiksi kvanttifysiikan ja statistisen fysiikan. James Maxwellia ja Ludwig Boltzmannia voidaankin pitää mikroskooppisen fysiikan esi-isinä.

## 2.9 Kineettinen kaasuteoria täydentyä

Itävallassa syntynyt fyysikko Ludwig Boltzmann toimi voimakkaana atomin biljardipallomallin kannattajana. Hän uskoi teorian sisältävän muutakin kuin pelkkiä käyttökelpoisia vertauksia. Boltzmann oli nuorena opiskelijana saanut Maxwellin kineettistä kaasuteoriaa koskevat artikkelit. Hän onnistui ratkaisemaan niitä koskevan pienen ongelman ja siten parantamaan kaasumolekyylien nopeutta koskevaa teoriaa. Boltzmann oli ihastunut Maxwellin kaasuteoriaan ja vertasi sitä mestarilliseen sävellykseen. Hän oli valmis uhraamaan uransa ja koko elämänsä kannattaessaan teoriaa, jota suurin osa tuon ajan fyysikoista kääntyi vastustamaan siitä yksinkertaisesta syystä, että atomi onnistui piileskelemään mikroskooppisessa maailmassaan kaikista lähestymisy yrityksistä huolimatta. Tehdessään tutkimusta teorian hyväksi hän teki vuonna 1905 yhden aikamme suurimmista keksinnöistä, joka merkitsi siirtymistä vanhasta uuteen fysiikkaan, vanhasta maailmasta uuteen maailmaan. ”Boltzmann löysi Graalin maljan, joka pakeni Maxwellia ja hänen demoniaan; entropian mikroskooppisen käsitteen”(von Baeyer 1998).

Clausius oli aikaisemmin määritellyt entropian lämmön ja absoluuttisen lämpötilan suhteena, joka voidaan määritellä tavallisilla laboratoriovälineillä tehdyillä mittauksilla eli kyseessä oli makroskooppinen suure. Maxwellin opetuslapsena Boltzmann pyrki kuvittelemaan entropiaa molekulaarisena käsitteenä. Todennäköisyyslaskenta ja -jakaumat olivat hänelle tuttuja matemaattisia välineitä. Päätellessään yhteyttä todennäköisyyden multiplikatiivisen ja entropian additiivisen ominaisuuden välillä hän teki rohkean arvauksen: entropia on todennäköisyyden logaritmi. Boltzmann järkeili entropian mittaavaan todennäköisyyttä ja todennäköisyyden ilmaisevan epäjärjestystä. ”Kvalitatiivisesti ottaen entropia on epäjärjestystä, jolla on luontainen taipumus kasvaa. Kokeellisesti se mitataan lämpömäärän ja lämpötilan suhteena. Teoreettisesti se liittyy todennäköisyyden numeroiden määrään” (von Baeyer 1998). Boltzmannin keksinnön myötä Maxwellin kaasuteoriasta tuli täydellinen.

## **2.10 Brownin liike**

Boltzmannin teoria sai yleisen hyväksynnän pian keksinnön jälkeen Albert Einsteinin osoitettua, että Brownin liike syntyy lämpöliikkeessä olevien molekyylien törmäyksistä. Tutkittaessa moninkertaista suurennosta kasvin lehdellä kelluvasta vesipisarasta saattaa havaita merkillisen ilmiön. Kasvista irronneet siitepölyhiukkaset liikkuvat vesipisarassa ilmeisen satunnaisesti ja itsenäisesti, vailla päämäärää. Ne poukkoilevat paikasta toiseen aivan kuin jokin ulkoinen voima ohjaisi niitä ilman loogisuuden häivää. Vuonna 1827 englantilainen kasvitieteilijä Robert Brown havahtui tähän mielenkiintoiseen ilmiöön, jota nykyisin kutsutaan Brownin liikkeeksi. Selityksen ilmiöön keksi Albert Einstein melkein kahdeksankymmentä vuotta myöhemmin. Brownin liikkeessä esiintyvät hiukkaset ovat hyvin pieniä. Niin pieniä, että niiden vuorovaikutus aineen molekyylien kanssa on mikroskoopilla havaittavissa. Boltzmannin ja Maxwellin kaasuteorian pohjalta Einstein selitti hiukkasten liikeratojen johtuvan niihin jatkuvasti törmäilevistä molekyyleistä, jotka ovat lämpöliikkeessä. Suurille hiukkasille näitä törmäyksiä tapahtuu joka puolelle keskimäärin saman verran, voimat kumoutuvat ja hiukkaset pysyvät paikoillaan. Brownin liikkeen selityksestä seurasi ehkä maailman vanhimman fysiikan mallin eli atomimallin lopullinen hyväksyntä sekä aineen mikroskooppisen tutkimuksen valtakausi.

## 3 LÄMPÖOPIN TEOREETTISTA TAUSTAA

### 3.1 Makroskooppinen ja mikroskooppinen

Makroskooppisella tarkoitetaan yleisesti paljain silmin nähtävissä olevaa ilmiötä, asiaa, tai paikkaa. Makroskooppinen liittyy isoihin mittakaavoihin ja sen vastakohta on mikroskooppinen, joka liittyy pieniin mittakaavoihin. Mikroskooppisella tarkoitetaan pientä ilmiötä, asiaa tai tilaa, jonka näkemiseksi tarvitaan suurentavia apuvälineitä kuten mikroskooppia (Webster's Universal College Dictionary 1997). Makroskooppinen liitetään ilmiöihin, joita voidaan suoraan havaita laboratoriossa. Voimme esimerkiksi mitata makroskooppisesti lämpötilaa, pituutta, massaa, tilavuutta tai tiheyttä. Pienten hiukkasten kuten molekyylien, atomien, ionien ja vielä pienempien hiukkasten tutkiminen vaatii erilaisia fysikaalisia ja matemaattisia menetelmiä kuten todennäköisyyslaskentaa. Vaikka nykytekniikka mahdollistaakin pienten hiukkasten havaitsemisen, joudutaan havaintojen tulkitsemisessa tukeutumaan fysiikan teorioihin.

### 3.2 Lämpö ja lämpöenergia

Lämpöä ja lämpöenergiaa pidetään arkikielessä yleensä synonyymeina, vaikka tieteessä niiden määritelmät eivät ole samat. Lämpöenergia on yksi energian muoto. Se on hiukkasten kuten atomien, elektronien ja molekyylien liike- ja potentiaalienergiaa satunnaisessa mikroskooppisessa liikkeessä. Hiukkasten liike on etenevää (translational), akselinsa ympäri pyörivää (rotational) ja tasapainoasemansa suhteen värähtelevää (vibrational). Lämpö on fysikaalisessa prosessissa siirtyvää lämpöenergiaa. Lämpö ei siis ole absoluuttista energiaa. (Young & Freedman 2000, 470- 471). Se liittyy kappaleen emittoimaan ja absorboimaan lämpöenergiaan. Kun kappale absorboi tietyn määrän lämpöä, sen hiukkasten satunnainen mikroskooppinen liike lisääntyy, ja kun kappale emittoi tietyn määrän lämpöä, sen satunnainen mikroskooppinen liike vähenee. Kaasussa molekyylit pääsevät liikkumaan vapaasti, joten kaasun molekyylien liikkeen kineettinen energia on suoraan verrannollinen sen lämpötilaan. Kiinteän aineen ja nesteiden molekyylien välillä on voimia siten, että lämpötilan kasvu vaikuttaa kineettisen energian kasvun lisäksi myös niiden potentiaalienergioihin. Kiinteässä aineessa atomit ja molekyylit värähtelevät tasapainoasemansa suhteen. Kappaleen absorboidessa lämpöä sen kineettinen energia ja potentiaalienergia kasvavat, jolloin myös kappaleen lämpötila kasvaa.

Lämpöenergia on siis yksi energian esiintymismuoto, joten se voidaan muuttaa makroskooppiseksi mekaaniseksi energiaksi ja päinvastoin. Lämpöenergiaa voidaan muuttaa työksi esimerkiksi höyrykoneen avulla. Höyrykoneet eivät kuitenkaan luo energiaa vaan ne nimenomaan muuttavat lämpöenergiaa mekaaniseksi työksi. Työ puolestaan muuttuu lämmöksi helposti kitkan välityksellä.

Kalorikkiteorian vallitessa ei vielä ymmärretty lämmön mikroskooppista luonnetta. Lämmön energiäkäsitetkin ymmärrettiin paremmin vasta, kun Prescott Joule määrittä lämmön mekaanisen ekvivalentin eli lämpöenergian ja mekaanisen energian vastaavuuden. Lämmön yksikkö kalori, jota nykyään käytetään yleisesti ruoka-aineiden energiapitoisuuksia mitatessa, tarkoittaa sitä energian määrää, joka tarvitaan, jotta 1 g vettä lämpenisi 1 °C normaalipaineessa. Nykyään energiayksikkönä käytetään joulea (J),

joka tarkoittaa energiamäärää, joka vaaditaan 1 N voiman aiheuttamaan liikkeeseen 1 m pituisen matkan. Koska lämpö ja energia ovat molemmat energiayksikköjä, voidaan lämpöä yhtäläillä mitata jouleina. Kokeellisesti määritetty tarkka lämmön mekaaninen ekvivalentti on 4,1855 J/cal eli 1 kalori vastaa 4,1855 joulea.

### 3.3 Termodynamiikan systeemit ja terminen tasapaino

Termodynamiikassa on erilaisia systeemejä. Termodynaamisella systeemillä tarkoitetaan tarkastelun alaista makroskooppista kokonaisuutta. Avoin systeemi voi vaihtaa ympäristön kanssa sekä ainetta että energiaa, suljettu systeemi voi vaihtaa vain energiaa, ja eristetty systeemi ei voi vaihtaa kumpaakaan. Puhuttaessa systeemin sisäenergiasta tarkoitetaan systeemin kokonaisenergiaa, joka koostuu potentiaalienergiasta eli hiukkasten ja molekyylien sidosenergiasta sekä kineettisestä energiasta eli hiukkasten ja molekyylien liikkeestä systeemin massakeskipisteen suhteen. Systeemin sisäenergian arvoja ei voida mitata, mutta niiden muutoksia voidaan. Jos kahden eri systeemin välillä ei tapahdu lämmön siirtoa, sanotaan kyseisten systeemien olevan keskenään termisessä tasapainossa. Tämä niin sanottu termodynamiikan ”nollas”-pääsääntö voidaan esittää myös muodossa: ”Jos systeemi C on termodynaamisessa tasapainossa sekä systeemin A että systeemin B kanssa, ovat systeemit A ja B keskenään termodynaamisessa tasapainossa”.

### 3.4 Lämpötila-asteikot

Lämpötila on määriteltävissä makrotasolla lämpötila-asteikon kautta. SI-järjestelmässä käytetty lämpötila-asteikko on Kelvin-asteikko. Muita yleisesti käytettyjä lämpötila-asteikkoja ovat Euroopassa käytetty Celsius- ja Yhdysvalloissa käytetty Fahrenheit-asteikko. Kelvin-asteikkoa kutsutaan absoluuttiseksi lämpötila-asteikoksi, ja lämpötilaa 0 K absoluuttiseksi nollapisteksi. Celsius-asteikko on määritelty siten, että (1 atm:ssa) sen nollakohta on veden sulamispiste ja 100 °C:ssa on veden sulamispiste. Kokeellisten havaintojen mukaan absoluuttisessa nollapisteessä eli paineen ollessa nolla lämpötila olisi -273,15 °C.

Lämpötilan mittaaminen perustuu termiseen tasapainoon. Kun esimerkiksi elohopeamittarin lukema on asetunut, sanomme sen olevan termisessä tasapainossa kappaleen tai ympäristön kanssa. Tällöin mittarin lukema näyttää kappaleen tai ympäristön lämpötilan. Elohopeamittari kuuluu nestelämpömittareihin, joissa lämpötilan muutos vaikuttaa nestepatsaan korkeuteen. Muita lämpömittarityyppejä ovat kaasulämpömittari ja resistanssiin perustuva lämpömittari.

### 3.5 Ominaislämpö

Ominaislämmöksi kutsutaan energian määrää, joka tarvitaan, jotta 1 kg jotain tiettyä ainetta lämpenisi 1 °C verran. Ominaislämpö on kullekin aineelle ominainen piirre, joka vaihtelee lämpötilan mukaan. Esimerkiksi veden ominaislämpö vaihtelee lämpötilavälillä 0 °C - 100 °C yhden prosentin verran ja se on pienimmillään 35 °C asteessa. (Ohanian 1988, 516)

Puhtaasti lämpötilaeroista johtuvaa energian siirtymistä kutsutaan lämmönsiirroksi tai lämpövirraksi. Lämmitettäessä kappaletta esimerkiksi tekemällä mekaanista työtä siirtyy lämpöä kappaleeseen. Tällöin kappaleen, jonka massa on  $m$  ja ominaislämpökapasiteetti  $c$ , absorboima lämpö  $Q$  ja lämpötilan muutos  $\Delta T$ , voidaan kirjoittaa muotoon:

$$(1) \quad Q = mc\Delta T$$

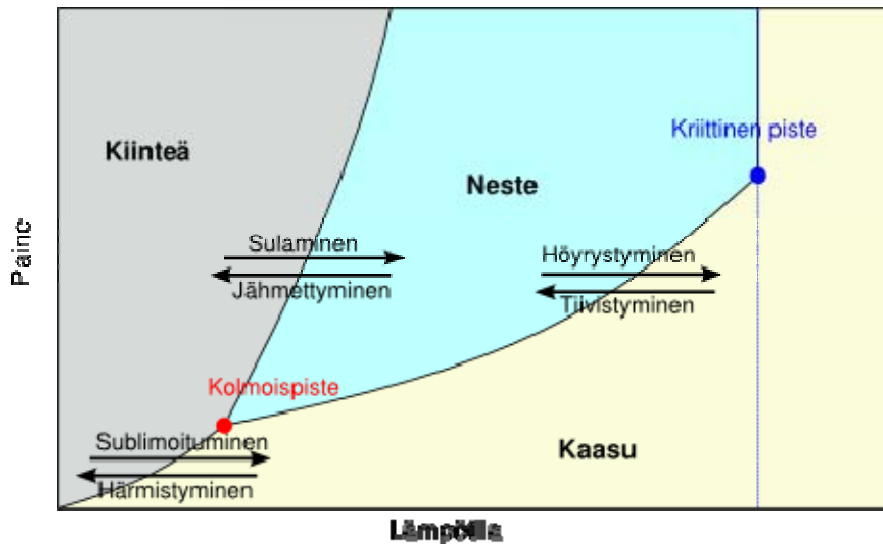
Lämpötila  $T$  ilmaisee systeemin molekyylien keskimääräisen liike-energian. Lämmön siirtyminen kappaleeseen tarkoittaa systeemin molekyylien keskimääräisen liike-energian kasvua.

### 3.6 Olomuodonmuutokset

Aineen pääolomuotoja on kolme: kaasu, neste ja kiinteä. Lisäksi aineella on hyvin korkeassa lämpötilassa ja paineessa neljäs olomuoto, jota kutsutaan plasmaksi. Kun kiinteitä tai nestemäisiä aineita lämmitetään riittävästi vakioaineessa, ne saavuttavat niin sanotun faasirajan. Tällöin lämpötila ei enää kasva, vaan aineen olomuoto alkaa muuttua. Aineen olomuodonmuutosta kutsutaan myös faasimuutokseksi. Faasirajoja on kaksi; kun paine on vakio, alhaisemmassa lämpötilassa aineen kiinteä muoto muuttuu nestemäiseksi eli tapahtuu sulaminen ja päinvastoin eli tapahtuu jähmettyminen, korkeammassa lämpötilassa neste muuttuu kaasuksi eli tapahtuu höyrystyminen ja päinvastoin eli tapahtuu tiivistyminen. Hyvin alhaisessa paineessa kiinteää ainetta lämmitettäessä se muuttuu suoraan kaasuksi. Prosessia kutsutaan sublimoitumiseksi. Sublimoitumista tapahtuu vähissä määrin myös normaalipaineessa esimerkiksi jään pinnalla. Kaasun tiivistymistä suoraan kiinteäksi aineeksi kutsutaan puolestaan härmistymiseksi. Faasirajojen yhdistymispiste on kolmoispiste, jota alhaisemmassa paineessa tai lämpötilassa aineella ei ole enää nestemäistä olomuotoa. Lämpötilan ja paineen ollessa riittävän suuret saavutetaan puolestaan aineen kriittinen piste, jonka jälkeen aineella on ainoastaan kaasumainen olomuoto.

Vedellä on normaalipaineessa sulamispiste  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja kiehumispiste  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolloin jää sulaa vedeksi ja vesi höyrystyy sen kaasumaiseen muotoon eli vesihöyryksi. Paine vaikuttaa sulamis- ja kiehumispisteeseen. Paineen ollessa normaalipainetta alhaisempi ovat veden sulamis- ja kiehumispisteet alhaisemmassa lämpötilassa, kun taas paineen ollessa normaalipainetta korkeampi ovat sulamis- ja kiehumispisteet korkeammassa lämpötilassa. Esimerkiksi veden kiehumispiste korkealla vuoristossa on alhaisempi kuin merenpinnalla.

## Aineen olomuodot



Kuva 3.1 Paine-lämpötiladiagrammi aineen olomuodoista

Mikrotasolla olomuodonmuutos johtuu aineen sidosrakenteiden hajoamisesta. Aineen absorboitua riittävästi lämpöä sen molekyylien ja atomien liike on niin rajua, että sidosvoimat eivät kykene pitämään sen rakennetta koossa. Päinvastaisessa tapauksessa, aineen luovuttaessa lämpöä aineen sisäinen energia vähenee siten, että sidosenergiat ovat riittävän vahvoja pitämään aineen koossa, jolloin faasirajalla kaasu tiivistyy nesteeksi tai neste jähmettyy kiinteäksi. (Ohanian 1988, 518-519)

### 3.7 Ominaisulamis- ja höyrystymislämpö

Ominaisulamilämpö ja ominaishöyrystymislämpö ovat aineelle ominaisia piirteitä ja liittyvät oleellisesti olomuodonmuutoksiin. Yleisemmin faasimuutosten yhteydessä puhutaan latentista lämmöstä, josta sulamis- ja höyrystymislämmöt ovat erikoistapauksia. Ominaisulamilämpö, jota merkitään symbolilla  $s$ , tarkoittaa sitä lämpöä  $Q$  massayksikköä  $m$  kohden, joka tarvitaan sulattamaan sulamispisteessä oleva kiinteä aine. Aineen jähmettyessä vapautuu samansuuruinen lämpömäärä. Tämä voidaan ilmaista yhtälönä:

$$(2) \quad Q = sm$$

Ominaishöyrystymislämpö, jota merkitään symbolilla  $r$ , tarkoittaa sitä lämpömäärää  $Q$  massayksikköä  $m$  kohden, joka vaaditaan kiehumispisteessä olevan nesteen muuttamiseksi kaasumaiseen olomuotoon.

$$(3) \quad Q = rm$$

Aineen tiivistyessä takaisin nesteeksi vapautuu samansuuruinen lämpömäärä. Faasimuutos on reversiibeli eli palautuva prosessi siten, että vaihdettaessa sen suuntaa ainoastaan  $Q$ :n etumerkki muuttuu.



### 3.8 Lämpölaajeneminen

Lämpölaajeneminen on lämpöön liittyvä makroskooppinen ilmiö. Kun vakiopaineessa oleva kaasu, neste tai kiinteä kappale absorboi lämpöä, sen tilavuus kasvaa. Kaasuilla tilavuuden kasvu on voimakkaampaa kuin nesteillä ja kiinteillä kappaleilla, mikä johtuu kaasumolekyylien vapaudesta liikkua joka suuntaan. Lämpölaajenemisen aikana kiinteät kappaleet säilyttävät muotonsa, mutta niiden koko kasvaa.

Mikroskooppisesti nesteiden ja kiinteiden kappaleiden lämpölaajeneminen selittyy niiden molekyylien ja atomien satunnaisen liikkeen kasvulla. Kiinteässä aineessa atomeita ja molekyyliä sitovat toisiinsa sisäiset voimat, jotka toimivat kuten jouset. Atomit ja molekyylit värähtelevät tasapainoasemansa suhteen ja värähtelyn amplitudi kasvaa lämpöenergian kasvun myötä. Mikroskooppisia ”jousia” on sisäisten voimien luonteen takia vaikea puristaa kasaan, joten ulospäin suuntautuva venytys on voimakkaampaa kuin sisäänpäin suuntautuva puristus. Näin atomit ja molekyylit levittäytyvät laajemmalle alueelle synnyttäen makroskooppisen ilmiön eli lämpölaajenemisen

Lämpölaajenemisessa kiinteän kappaleen pituuden kasvu on suoraan verrannollinen lämpötilan kasvuun,

$$(4) \quad \Delta L = \alpha L \Delta T$$

missä  $L$  on kappaleen pituus ja  $\alpha$  on pituuden lämpötilakerroin

Lämpölaajenemista tapahtuu yleensä jokaiseen suuntaan samalla tavoin, joten myös kappaleen tilavuuden kasvu on suoraan verrannollinen lämpötilan kasvuun. Poikkeuksina voidaan mainita eräät materiaalit kuten puu ja yksittäiset kristallit, joiden lämpölaajeneminen eri suuntiin on niiden molekyyilirakenteesta johtuen erilaista. (Young & Freedman, 2000) Kun tilavuuden lämpötilakerroin on  $\beta$ , kirjoitetaan tilavuuden lämpölaajeneminen muotoon:

$$(5) \quad \Delta V = \beta V \Delta T$$

Useille aineille pätee  $\beta \approx 3\alpha$ . Vesi käyttäytyy poikkeuksellisesti lämpölaajenemisessa. Lämpötilan noustessa  $0\text{ °C} - 3,98\text{ °C}$  veden tilavuus pienenee, kunnes se saavuttaa miniminsä hieman alle  $4\text{ °C}$ :ssa. Neliasteinen vesi on tiheimmillään, mikä mahdollistaa elämän säilymisen järvissä talvisin. Näin järvien pohjat säilyvät sulina läpi talven. Lämpötilan noustessa edelleen yli  $4\text{ °C}$ :een vesi käyttäytyy kuten muut nesteet ja sen tilavuuden kasvu on suoraan verrannollinen lämpötilan kasvuun. (Ohanian 1988, 518-520)

### 3.9 Lämmön johtuminen, siirtyminen ja säteily

Vaikka pala puuta ja kappale metallia ovat samassa lämpötilassa ( $20\text{ °C}$ ), kosketettaessa niitä metallikappale aistitaan selvästi kylmempänä. Tämä johtuu materiaalien erilaisista kyvyistä johtaa lämpöä. Edellä mainitussa esimerkissä metallinen kappale johtaa lämpöä iholta tehokkaammin kuin puupala, jolloin sen pinta tuntuu

kylmemmältä. Lämmön johtumista tapahtuu joko kappaleen sisällä tai kahden eri kappaleen välillä, kun ne ovat termisessä kontaktissa. Kappaleet ovat termisessä kontaktissa, mikäli niiden välillä voi tapahtua energian vaihtoa ilman ulkoista työtä. Esimerkiksi kuuman ja kylmän kappaleen ollessa kontaktissa lämpöä virtaa kuumasta kylmään, kunnes niiden välillä on terminen tasapaino eli kunnes niiden välillä ei tapahdu enää makroskooppista energian vaihtoa. Kokemuksesta tiedämme, että alumiinikattilat ovat hyviä lämmön johtimia kun taas jääkaapin rakenteessa on materiaaleja, jotka eristävät hyvin lämpöä.

Molekyylitasolla lämmön johtuminen selittyy molekyylien kineettisen energian siirtymisellä. Kun metallipalaa lämmitetään toisesta päästä, on lämmitettävän puolen molekyyleillä suurempi keskimääräinen kineettinen energia kuin vastakkaisen puolen molekyyleillä. Molekyylit ovat vuorovaikutuksessa toisiinsa, joten molekyylien liike siirtyy kuumemmasta päästä kylmempään päähän molekyylien keskinäisten törmäysten seurauksena ketjureaktion tapaan, kunnes koko kappale saavuttaa makroskooppisesti tasaisen lämpötilan. Mikroskooppisesti tämä tarkoittaa sitä, että koko kappaleen molekyylien liike-energia on jakautunut keskimääräisesti tasan koko kappaleen alueelle, mutta yksittäiset molekyylit liikkuvat eri tavoin ja eri nopeuksin. Metallit ovat hyviä lämmönjohtimia, sillä niiden ”vapaasti liikkuvat” elektronit voivat kuljettaa nopeasti energiaa kappaleen sisällä. Lämmönjohtavuudesta onkin suora analogia sähkönjohtavuuteen, niin johtimiin kuin eristeisiin.

Jokainen kappale, jopa huoneenlämpöinen kappale, säteilee energiaa ympäristöönsä sähkömagneettisina aaltoina. Lämpösäteilyä kutsutaan myös infrapunasäteilyksi, koska huoneenlämpöisten kappaleiden emittoima sähkömagneettinen säteily kuuluu infrapuna-alueeseen. Sen aallonpituus on n. 700 nm – 1 mm. Kappaleen emittoiman säteilyn aallonpituus riippuu kappaleen lämpötilasta. Mitä kuumempi säteilijä on kyseessä, sen pienempi on säteilyn aallonpituus. Koska säteilyn väri riippuu sen aallonpituudesta, kappale säteilee 800 °C:ssa punaisena ja 3000 °C:ssa valkoisena (Ohanian 1988).

Lämpöä voi siirtyä paikasta toiseen aineen mukana saman aineen tai eri aineiden tiheyseroista johtuen, mitä kutsutaan myös konvektioksi. Järvissä tihein (+4 °C) vesi painuu pohjalle siirtäen mukanaan myös lämpöä. Kuuma ilma on puolestaan kylmää ilmaa kevyempää, joten se nousee huoneissa katon rajaan.

### **3.10 Termodynamiikka**

Termodynamiikka tutkii fysikaalisten systeemien välisiä suhteita, joiden kuvaamiseen riittävät pelkästään makroskooppiset parametrit. Termodynamiikassa ei kiinnitetä erityistä huomiota systeemin ja siihen liittyvien prosessien mikroskooppisiin yksityiskohtiin. Riittää, että tukeudutaan muutamaankin tärkeään peruserätykseen esimerkiksi energian säilymiseen, joka ei ole mitenkään riippuvainen siihen liittyvien mikroskooppisten prosessien luonteesta (Ohanian 1988). Usein käytännön termodynaamisia prosesseja tutkittaessa mikroskooppinen tarkastelu onkin tarpeetonta. Prosessin makroskooppisten yksiköiden kuten lämpötilan, paineen, tiheyden ja lämpökapasiteetin tarkastelu riittää antamaan tarvittavan tiedon. Termodynamiikan tärkein kysymys on, miten energiaa muutetaan muodosta toiseen ja tarkemmin se miten lämpöenergiaa muutetaan joksikin toiseksi energialajiksi. Termodynamiikka tiivistyy

kolmeen ytimekkääseen lakiin, jotka pätevät ainoastaan systeemin tasapainotiloihin. Lukiossa opetettavassa termodynamiikassa pääpaino on nimenomaan systeemin tasapainotilojen tarkastelussa, johon kuuluvat oleellisesti tietyillä parametreilla muutosprosessin alku- ja lopputilat. Mitattavina parametreina termodynamiikassa toimivat useimmiten lämpötila, paine ja tilavuus, joiden avulla voidaan määrittää myös prosessissa tapahtuvat energian muutokset.

### 3.11 Ensimmäinen pääsääntö

Oletetaan systeemin olevan tilassa, jossa sen paine, lämpötila ja tilavuus ovat vakiot. Systeemiin voidaan tuoda lämpöä tai sitä voidaan poistaa, jolloin mm. systeemin lämpötila muuttuu. Systeemiin voidaan myös tuoda mekaanista työtä, tai systeemi voi tehdä mekaanista työtä, jolloin esimerkiksi sen paine ja tilavuus muuttuvat. Kaikissa edellä mainituissa tapauksissa systeemin sisäenergia muuttuu. Termodynamiikan ensimmäinen laki sanoo yleispätevästi:

(6) *Aina kun systeemiin vaikuttava ulkoinen työ ja lämpö muuttavat systeemin alkuperäisen termodynaamisen tilan, jota kuvaavat tietyt makroskooppisten parametrien arvot, sen lopulliseen tilaan, jota kuvaavat uudet makroskooppisten parametrien arvot, systeemin sisäenergian muutos on*

$$\Delta E = Q - W,$$

*joka ei riipu muutosprosessin yksityiskohdista (Ohanian 1988).*

Ensimmäistä lakia kutsutaan energian säilymislaiksi, koska sen mukaan systeemin sisäenergian muutos vastaa siihen tuotavan lämmön ja työn määrää. Energiaa ei voida luoda eikä hävittää, ainoastaan siirtää paikasta toiseen tai muuttaa toiseksi energiamuodoksi. Näin ollen energian muutosprosesseissa kokonaisenergia säilyy.

Yhtälössä (6) tulee esiin lämmön luonne siirtyvänä energiana. Lämpö ja työ ovat samankaltaisia fysikaalisia käsitteitä. Ne liittyvät energian muutokseen, joten ei voida määrittellä systeemissä säilyvää lämpöä tai työtä. Energiaa siirtyy eri tavoin, tässä lämmön tai työn muodossa, systeemistä toiseen. Lämmön siirtymisessä osa energiasta voi muuttua muotoaan mekaaniseksi energiaksi.

### 3.12 Hyötysuhde

Lämpökoneeksi kutsutaan mitä tahansa konetta, joka muuttaa lämpöä työksi syklisen prosessin kautta. Syklinen prosessi tarkoittaa kiertokulkua, jossa prosessi palautuu jokaisen tai joskus joka toisen kierroksen jälkeen alkuperäiseen tilaansa.

Lämpökoneen toiminta perustuu eri lämpötiloissa oleviin lämpösäiliöihin, joista toinen on korkeassa ja toinen matalassa lämpötilassa. Lämpö virtaa aina kuumasta kylmempään, jolloin osa lämpösäiliöiden välissä virtaavasta lämmöstä voidaan muuntaa mekaaniseksi työksi. Kuumen lämpösäiliön lämpötilaa pidetään suunnilleen vakiona esimerkiksi polttoaineen avulla. Kylmänä lämpösäiliönä toimii useimmiten vesisäiliö tai maapallon ilmakehä, jotka ovat niin suuria, että niiden lämpötilojen voidaan olettaa pysyvän vakiona.

Lämpökoneessa osa lämmöstä menee hukkaan eli sitä ei voida hyödyntää energian muutosprosessissa. Koneen tekemä työ voidaan johtaa energian säilymislaista (6) ottaen huomioon, että koko prosessissa energian määrä ei muutu. Jos lämpösäiliöiden lämpömäärät ovat  $Q_1$  (kuumasta säiliöstä) ja  $Q_2$  (kylmään säiliöön), saadaan koneen tekemäksi työksi:

$$(7) \quad W = Q_1 - Q_2$$

Lämpökoneen teho on puolestaan työn ja alkuperäisen lämpömäärän suhde

$$(8) \quad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Yhtälöstä huomataan, että jos lämpöä ei mene hukkaan, niin  $Q_2 = 0$  ja  $\eta = 1$  tai  $\eta = 100$  %, jolloin kone muuttaisi kaiken lämmön  $Q_1$  työksi. Lämpökone tuottaa aina jonkin verran hukkalämpöä ja käytännössä osa mekaanisesta energiasta kuluu aina hukkaan mm. mekaanisissa laitteissa esiintyvän kitkan vuoksi. Osoittautuu, että ideaalisen (ideaalikaasulla toimivan) lämpökoneen tehokkuus riippuu ainoastaan lämpösäiliöiden lämpötilojen suhteesta:

$$(9) \quad \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

### 3.13 Entropia

Yhtälö (9) voidaan johtaa Carnot'n kierron avulla lämpövoimakoneen ollessa reversiibeli, jolloin kone voisi myös toimia päinvastoin muuttaen työtä lämmöksi. Prosessi on reversiibeli, jos systeemi kulkee prosessin aikana tasapainotilojen kautta alkutilasta lopputilaan. Carnot'n kierron aikana systeemin tila muuttuu vaiheittain joko isotermisesti lämpötilan pysyessä vakiona tai isobaarisesti paineen pysyessä vakiona. Jokainen reversiibeli kierto voidaan esittää hyvin pienten Carnot'n kiertojen summana, jolloin eksaktin arvon antaa integraali yli jokaisen kierron. Lämpötilan ollessa vakio tilannetta kuvaa Clausiuksen teoreema: Integraali  $dQ/T$ :sta yli minkä tahansa reversiibelin kierron on nolla

$$(10) \quad \oint \frac{dQ}{T} = 0$$

Yhtälössä  $dQ$  on positiivinen, jos systeemin tuodaan lämpöä, ja negatiivinen, jos systeemistä poistuu lämpöä.

Olomuodonmuutosta voidaan pitää reversiibelinä prosessina. Tällöin kiertoon kuuluu esimerkiksi pakkassäällä jään sulaminen nesteeksi ja nesteen kiinteytyminen jälleen jääksi. Jään sulaminen kuluttaa yhtä paljon lämpöä kuin sen kiinteytyminen takaisin jääksi vaatii, joten energiamuutosten summa koko prosessin yli on nolla. Normaali lämmön virtaus termisessä kontaktissa olevista kappaleista tapahtuu puolestaan irreversiibelisti korkeammasta lämpötilasta matalampaan, jolloin systeemi ei voi enää ilman ulkoista energiaa palata alkutilaansa. Irreversiibeli prosessi ei etene tasapainotilojen kautta, eikä se voi tapahtua käänteisesti.

Yleensä termodynaamisissa prosessissa ei edetä kokonaista kiertoa, vaan edetään tasapainotilasta A ( $\rho_A, V_A$ ) tasapainotilaan B ( $\rho_B, V_B$ ), jossa tilaa kuvaavat parametrit ovat tiheys ja tilavuus. Clausiuksen teoreeman avulla reversiibelille prosessille voidaan osoittaa, että integraali

$$(11) \quad \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

riippuu vain alku- ja lopputiloista, eikä niitä yhdistävästä polusta. Näin ollen voidaan muodostaa uusi funktio kuvaamaan entropian muutosta reversiibelissä prosessissa

$$(12) \quad \Delta S = \int_A^B \frac{dQ}{T}$$

Funktiota kutsutaan nimellä entropia ja sen yksikkö on J/K, jossa K on lämpötila Kelvin-asteikolla. Entropialla on samankaltainen asema termodynamiikassa kuin potentiaalienergialla on mekaniikassa (Ohanian 1988). Lukion lämpöopin Clausiuksen teoreema esitetään vähemmän formaalissa ja enemmän selityksiä antavassa muodossa, mikä tuo oman haasteensa opetukseen.

Entropia on systeemin epäjärjestyksen mitta. Systemi pyrkii spontaanisti siirtymään vähemmän todennäköisestä tilasta todennäköisempään. Tällaisia siirtymiä ovat mm. lämpötilaerojen tasoittuminen ja nesteiden sekoittuminen.

### 3.14 Toinen pääsääntö

Havaintojen perusteella termodynaamiset prosessit etenevät siten, että entropia kasvaa. Luonnossa epäjärjestys pyrkii siis kasvamaan. Edellä mainittu pätee, kun otetaan huomioon systeemin ympäristössä tapahtuvat muutokset. Toiselle pääsäännölle on useita ekvivalentteja muotoiluja. Termodynamiikan toinen pääsääntö (Kelvin-Planck):

(13) *Mikään kiertoprosessia suorittava lämpövoimakone ei voi absorboida termistä energiaa säiliöstä ja tuottaa samaa määrää työtä*

Lämpövoimakone ei siis voi muuttaa lämpöä mekaaniseksi energiaksi ilman hukkalämpöä. Carnot'n koneen yhteydessä tämä mahdottomuus voitiin päätellä hyötysuhteen yhtälöstä (8). Toisen pääsäännön mukaan jokaisen reversiibelin lämpövoimakoneen hyötysuhde on sama kuin Carnot'n koneen hyötysuhde.

Lämmön spontaani virtaus huomioon ottaen toinen laki voidaan muotoilla (Clausius):

(14) *Mikään kiertoprosessia suorittava lämpövoimakone ei voi siirtää lämpöä kylmästä säiliöstä lämpimään säiliöön ilman ulkoista energiaa*

Luonnollinen prosessi on irreversiibeli, joten siinä entropian muutos on aina suurempi kuin nolla. Matemaattisesti toinen pääsääntö voidaan ilmaista:

$$(15) \quad \int \frac{dQ}{T} \geq 0$$

Integraali  $dQ/T$ :sta yli minkä tahansa syklisen irreversiibelin prosessin on suurempi tai yhtä suuri kuin nolla. Edelleen voimme päätellä ja johtaa matemaattisesti, että minkä tahansa suljetun systeemin entropia joko kasvaa tai pysyy vakiona (Ohanian 1988, 561-562).

Mikrotasolla entropian kasvu tarkoittaa systeemin epäjärjestyksen kasvua. Makroskooppisen kappaleen liikkeessa tiettyyn suuntaan sen jokainen rakenneosanen liikkuu samaan suuntaan samalla nopeudella, jolloin kappaleen liike-energia on ”järjestyneessä muodossa”. Lämpö puolestaan on ”epäjärjestynyttä energiaa” – hiukkaset liikkuvat eri nopeuksilla satunnaisesti suuntiin. Kun lämpöä siirtyy matalammassa lämpötilassa olevaan lämpösäiliöön, sen epäjärjestys lisääntyy enemmän kuin lämpöä siirtyessä korkeammassa lämpötilassa olevaan lämpösäiliöön. Tämä johtuu hiukkasten liike-energioiden suuremmasta vaihtelusta. Entropian ja epäjärjestyksen yhteydelle voidaan antaa tarkka matemaattinen merkitys, mutta se vaatii statistisen fysiikan ja informaatioteorian menetelmiä (Ohanian, 1988, 563). Ihmisen toiminta muuttaa jatkuvasti järjestäytyneitä energiaa epäjärjestyneempään eli käyttökelvottomampaan muotoon.

### 3.15 Kolmas pääsääntö

Kun systeemin lämpötila laskee kohti absoluuttista nollapistettä (0 K), sen hiukkasten satunnainen lämpöliike vähenee, jolloin myös hiukkastasolla epäjärjestys vähenee. Tällä tavoin mikrotasoa tarkastellen voidaan päätellä, että systeemin lämpötilan laskiessa myös sen entropia laskee ja että absoluuttisessa nollapisteessä hiukkasten lämpöliike lakkaa kokonaan. Makroskooppisesti yhtälön (12) avulla ei kuitenkaan voida kiinnittää entropian absoluuttiarvoa, vaan siihen tarvitaan statistisen mekaniikan keinoja. Näin ollen termodynamiikassa on tyydyttävä tekemään oletamus, termodynamiikan täydentävä kolmas pääsääntö:

$$(16) \quad \textit{Absoluuttisessa nollapisteessä entropia on nolla}$$

Mikään fysikaalinen systeemi ei voi kuitenkaan saavuttaa absoluuttista nollapistettä, se voi vain lähestyä sitä. Näin ollen entropiakaan ei voi mennä täysin nolnaan.

### 3.16 Ideaalikaasu ja kineettinen kaasuteoria

Kaikki tuttu aine koostuu molekyyleistä. Molekyylissä voi olla yksi tai useampia atomeja. Esimerkiksi vedessä on yksi happiatomi ja kaksi vetyatomia. Jokaisen kemiallisen yhdisteen molekyylit ovat identtisiä. Molekyylejä sitovat toisiinsa kemialliset voimat, jotka ovat luonteeltaan sähköisiä. Molekyyliden väliset voimat ovat paljon heikompia kuin atomin sisäiset sähköiset voimat.

Yksi kuutiosenttimetri ilmaa sisältää noin  $2,7 \times 10^{19}$  ilmamolekyylejä. Yksittäisen mikroskooppisen pienen molekyylin tarkan sijainnin ja nopeuden määrittäminen niin suuresta joukosta on mahdotonta, erityisesti kvanttimekaanisessa maailmassa. Näin ollen aineen mikroskooppisen tarkastelun sijasta joudutaan tyytymään makroskooppiseen kuvailuun, joka karakterisoi kaasutilavuuden keskimääräisiä tiloja vain muutamalla makroskooppisella muuttujalla. Esimerkkejä kaasun makroskooppisista muuttujista ovat kaasun tilavuus, massa, tiheys, paine ja lämpötila.

Kineettinen kaasuteoria pyrkii yhdistämään aineen mikroskooppisen luonteen ja niihin liittyvät makroskooppiset ilmiöt tutkimalla kaasun molekyylien keskimääräistä käyttäytymistä. Jotta kineettinen kaasuteoria ei olisi liian monimutkainen, otetaan käyttöön uusi käsite, ideaalikaasu. Ideaalikaasu on malli, jossa hiukkaset oletetaan pistemäisiksi eli niiden tilavuus oletetaan nolaksi. Ideaalikaasun atomit ovat pistemäisiä. Atomit eivät ole keskenään vuorovaikutuksessa ja ne törmäilevät täysin kimmoisasti kaasua ylläpitävän astian seinämiin, jolloin seinämien kohdistamat voimat vaikuttavat atomeihin vain hetkellisesti. Ideaalikaasun molekyylien liike on nopeaa ja suoraviivaista. Normaaleissa tiheyksissä ja paineissa kaasut käyttäytyvät yleisesti lähes ideaalikaasun tapaan. Ideaalikaasumalli on hyvä yksinkertaistus ja yleistys kuvailemaan kaasujen käyttäytymistä normaaliolosuhteissa.

### 3.17 Kaasun tilanyhtälö

Yksi mooli kaasua sisältää  $6,0221 \times 10^{23}$  molekyyliä. Molekyylien lukumäärän ja moolin suhdetta kutsutaan myös Avogadron luvuksi ja sitä merkitään  $N_A$ . Kun  $n$  moolia ideaalikaasua on tilavuudeltaan  $V$  olevassa astiassa lämpötilan ollessa  $T$ , kaasu kohdistaa paineen  $p$  astian seinämiin. Kyseisen kaasun tilaa kuvaa niin sanottu ideaalikaasun tilanyhtälö:

$$(17) \quad pV = nRT$$

$R = 8,31 \text{ J/K}$  on moolinen kaasuvakio.

Ideaalikaasun tilanyhtälö antaa normaaliolosuhteissa hapen tilavuudeksi vain 0,13 % todellista pienemmän arvon (Ohanian, 1988, 496).

Ideaalikaasun tilanyhtälöstä nähdään helposti kaasun paineen, tilavuuden ja lämpötilan keskinäiset riippuvuudet.

$$(18) \quad pV = \text{vakio}, \quad \text{kun } T = \text{vakio} \quad (\text{Boylen laki})$$

$$(19) \quad V/T = \text{vakio}, \quad \text{kun } p = \text{vakio} \quad (\text{Gay-Lussacin laki})$$

Lämpötilan ollessa vakio kutsutaan kaasun tilan muutosprosessia isotermiseksi ja paineen ollessa vakio isobaariseksi.

Avogadron lukua hyväksi käyttäen voidaan ideaalikaasun tilanyhtälö kirjoittaa toiseen muotoon, koska  $n$  moolissa on  $N = N_A n$  molekyyliä. Kun vakio  $R/N_A$  korvataan vakiolla  $k$ , saadaan tilanyhtälöksi.

$$(20) \quad pV = NkT$$

Vakiota  $k$  on Boltzmannin vakio ja sen esiintyminen yhtälössä viittaa makroskooppisten ja mikroskooppisten suureiden väliseen yhteyteen (vrt. § 2.10).

### 3.18 Ideaalikaasun energia

Kuten edellä on todettu, lämpö on mikroskooppisesta näkökulmasta katsottuna molekyylien satunnaista liikettä. Liike voi olla värähtelyä tasapainoaseman suhteen, pyörimistä tai eteenpäin suuntautuvaa liikettä. Ideaalikaasussa molekyylit liikkuvat vapaasti joka suuntaan törmäämättä toisiinsa. Jättäen huomioimatta molekyylien pyörimisen ja värähtelyt liike rajoittuu kolmiulotteiseen etenemisliikkeeseen koordinaatiston x-, y- ja z-suunnissa. Tarkastelemalla ideaalikaasun molekyylien liikettä suljetussa tilassa voidaan osoittaa, että kaasumolekyylin nopeuden keskineliön neliöjuuri on

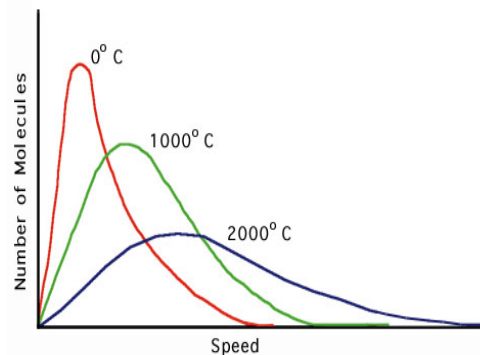
$$(21) \quad v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

Yhtälöstä nähdään molekyylin tyypillisen nopeuden ja lämpötilan riippuvuus. Tässä  $v_{rms}$  tarkoittaa kaasun molekyylien tyypillistä nopeutta, ja  $m$  on kyseisen molekyylin massa. On myös mahdollista määrittää kaasun kaikkien molekyylien nopeuksien keskiarvo tai molekyylien todennäköisin nopeus, jolloin päädytään samankaltaiseen tulokseen. On huomioitava, että yksittäisten molekyylien nopeudet vaihtelevat laajasti lähes nolasta äärettömyyteen.

Molekyylien nopeuksia voidaan kuvata käyttäen Maxwell-Boltzmannin jakaumaa, joka on kaasulle ominainen jakaumafunktio ja joka määrittelee matemaattisesti nopeuksien mukaan kaasumolekyylien lukumäärän. Hyvin pienellä nopeusvälillä  $dv$  olevien molekyylien lukumäärä on

$$(22) \quad dN = N_v dv,$$

missä Maxwell-Boltzmannin jakauman  $N_v$  muoto riippuu kaasun lämpötilasta. Mitä pienempi on kaasun lämpötila, sitä terävämpi huippu jakaumaan tulee.



Kuva 3.3 Molekyylien nopeusjakauma

Jakaumafunktion arvo menee nolnaan, kun nopeus lähenee nolaa tai kun nopeus lähenee äärettömyyttä.

Tiedämme nyt ideaalikaasun molekyylin tyypillisen nopeuden  $v_{rms}$  jossakin lämpötilassa  $T$ , joten voimme määrittää myös molekyylin keskimääräisen kineettisen energian



$$(23) \quad \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT$$

Jos tämä kerrotaan kaasussa olevien molekyylien lukumäärällä, saadaan molekyylien etenevän (translaatio) liikkeen kokonaisenergia ratkaistua. Pistemäisten hiukkasten ideaalikaasussa molekyyilleillä ei ole keskinäisiä sidoksia eikä myöskään potentiaalienergiaa. Näin ollen kineettinen energia on myös kaasun kokonaisenergia.

$$(24) \quad E = K = \frac{3}{2} NkT$$

Tulos pätee hyvin yksiatomisille molekyyilleille kuten helium, argon ja krypton (Ohanian 1988, 505). Molekyylien pyörimisliike akseliensa suhteen voidaan ottaa huomioon, jos kyseessä on esimerkiksi kaksiatominen molekyyli. Tällöin molekyylien liike-energia saadaan tasajakaumaperiaatteesta (equipartition theorem):

(25) *Molekyylin liikkeeseen liittyvän energian, oli kyseessä etenevä liike, värähtely tai pyörimisliike, on  $\frac{1}{2}kT$  vapausastetta kohti.*

Vaikka kineettinen kaasuteoria käsittelee vain kaasuja ja hyvin yksinkertaisia malleja kaasuista, antaa teoria meille kuitenkin kuvan siitä, miten lämpötila vaikuttaa yksittäisten molekyylien liikkeeseen. Kun tarkastellaan riittävän suurta lukumäärää molekyylijä, tulee ilmiöstä makroskooppinen, ja sitä voidaan tutkia laboratoriossa mittaamalla kaasun makroskooppisia suureita. Yksittäisen molekyylin tilavuus tai massa voidaan määrittää, mutta yksittäisen molekyylin lämpötila ei ole hyvin määritelty. On tyydyttävä tarkastelemaan yksittäisten molekyylien liikkeen keskimääräistä, todennäköistä tai tyypillistä nopeutta, joista lämpötila koostuu.

## 4 OPPILAIDEN KÄSITYKSIÄ LÄMMÖSTÄ

Lämpö on fysiikan opetuksessa vaikea käsite lähestyä. Se on toisaalta arkinen jokapäiväisestä elämästä tuttu asia, mutta fysikaalisessa mielessä se on abstrakti ja vaikeasti kuvailtavissa oleva käsite. Lapsilla on jo varhaisessa vaiheessa lukuisia vahvoja arkisia käsityksiä lämmöstä. Lämmön voi aistia suhteellisesti kylmänä tai kuumana. Lämpö sulattaa lumen ja jään. Lämpö karkaa kodin sisätiloista ulos. Lasten käsitykset perustuvat maalaisjärkeen ja uskomuksiin ja ne eroavat usein tieteellisestä käsityksestä (Wiser & Amin 2001, Lewis & Linn 2003, Solomon 1982). Nämä lapsena omaksutut uskomukset saattavat säilyä läpi koko elämän. Fysiikan opetuksen suurena haasteena on saada ihmiset irtaantumaan epätasällisistä uskomuksista ja saada heidät ymmärtämään fysiikka ilmiöiden taustalla.

### 4.1 Lämpö ja lämpötila

Lämpötila on yksi lämpöopin tärkeimmistä systeemin tilaa kuvaavista suureista. Sen yleinen, täsmällinen määritelmä on melko monimutkainen, mutta klassisesti ajateltuna se lähinnä kuvaa hiukkasten keskimääräistä liike-energiaa. Lämpö kuvaa puolestaan prosessia, jossa energia siirtyy. Vaikka lämpö ja lämpötila kuvaavat täysin eri asioita, on jopa yliopistotason opiskelijoilla vaikeuksia erottaa niiden luonteet toisistaan (Duit 1988, Roon 1992, Sözbilir 2003). Lämpö käsitetään usein lämpötilan kaltaisena systeemin tilaa kuvaavana suureena. Oppilaille on tapana ajatella, että mitä enemmän lämpöä systeemissä on, sitä suurempi on sen lämpötila (Kesidou & Duit 1988). Tarkkaan ottaen lämmön siirtyminen systeemin ei aina johda sen lämpötilan muutokseen, koska systeemissä on muutakin energiaa kuin ainoastaan hiukkasten kineettistä energiaa.

Suurin osa 12-13-vuotiaista peruskoululaisista ei tee minkäänlaista erottelua lämmön ja lämpötilan välillä (Ericsson 1985). Lämpö ja lämpötila sekoittuvat arkipäiväisessä kielessä usein keskenään, mikä johtaa helposti väärinkäsityksiin. Arkipuheen lisäksi lämpöopin opetuksen yhteydessä saatetaan käyttää epätasällistä kieltä. Vaikka alle 12-vuotiaille lapsille on jo opetettu kouluissa lämmön kineettistä teoriaa, he eivät kuitenkaan erota näitä kahta käsitettä toisistaan (Tiberghien 1985). Opettajien ja oppikirjojen välillä vallitsee erimielisyyksiä lämpöopin käsitteistä ja niiden käytöstä (Sözbilir 2003). Lapset sekoittavat lämmön myös sen kuvailevaan adjektiivimuotoon lämmin. He ovat saaneet käsityksen, että lämpö on aina kuumaa, mutta lämpötila voi olla sekä kuumaa että kylmää (Tiberghien 1985).

Myös 15-vuotiailla koululaisilla on huomattu edellä mainittuja väärinkäsityksiä lämmöstä (Brook et al. 1984, 1985). Tuntuukin siltä, että arkikielen käsitteet, jotka tarkoittavat usein eri asiaa kuin mitä vastaavat fysiikan termit, jäävät voimakkaammin ihmisten mieleen kuin opetuksessa määritetyt termit. Suomen kielessä ongelma on varsin ilmeinen, koska oikaisemme puhekielessä sanan lämpötila usein sanaksi lämpö. Kysymme esimerkiksi, paljonko ulkona on lämpöä? Tapamme puhua synnyttää väärinkäsityksiä, ja onkin ymmärrettävää, että oppilaan voi olla hyvin vaikea käsittää sanan lämpö fysikaalista merkitystä. Englanninkielessä sanaa lämpö vastaa sana ”heat” ja sanaa lämpötila sana ”temperature”, joita ei sekoiteta toisiinsa puhekielessä. Onkin oletettavaa, että lämmön ja lämpötilan keskinäisessä väärinymmärryksessä on myös jotain syvällisempää ongelmallisuutta.

## 4.2 Lämpö on ainetta

Yksi oppilaan perusolettamuksista on lämmön aineellisuus. Oppilailla tuntuu olevan synnynnäinen taipumus ajatella lämpö kalorikkiteorian tapaan; lämpö on ainetta, joka leijuu paikasta toiseen. Erickson ja Engels huomasivat tutkiessaan 6-16-vuotiaiden lapsien väärinkäsityksiä lämmöstä, että lapset vertaavat lämmön olemusta ilmamaiseen aineeseen. On sekä kylmää että kuumaa lämpöä, joka leijuu kuten ilma (Erickson 1979, 1980, 1985; Engels 1982). Lisäksi 15-vuotiailla oppilailla on havaittu väärinkäsityksiä, joiden mukaan lämpö ja kylmä ovat toistensa vastakohtia ja että ne ovat nestemäisiä aineita (Brook et al. 1984, 1985). Käsitys lämmön aineellisuudesta tulee esille erityisesti lämmön ja lämpötilan yhteyksissä. Lapset ymmärtävät lämmön ja lämpötilan suhteen siten, että lämpötila on lämmön määrä, tai jos kahdella kappaleella on sama lämpötila, on niillä myös yhtä suuri määrä lämpöä (Kesidou & Duit 1988).

On mielenkiintoista ajatella, että lapsilla olisi synnynnäinen tai opittu tapa muodostaa luonnon ilmiöistä olettamuksia, jotka muistuttavat lämpöopin historian varhaisvaiheen ajatuksia lämmöstä. Onko lämmön kalorikkiteorian mukainen käsitys helpoiten omaksuttavissa vai opitaanko se vasta koulussa tietyn opetuskaavan mukaisesti? Joka tapauksessa on pääteltävissä, että idea lämmön aineellisuudesta säilyy pitkään oppilaiden mielissä, mikä puolestaan vaikuttaa muiden lämpöopin käsitteiden kuten lämpökapasiteetin ja lämpösäteilyn omaksumiseen (Sözbilir 2003).

## 4.3 Aineella ja kappaleilla on lämpöä koskevia ominaisuuksia

Kun lämpöopin opetuksessa kohdataan uusia käsitteitä, lisääntyvät myös oppilaiden väärinkäsitykset. Useat lämpöopin opetusta koskevat tutkimukset osoittavat, että peruskoululaisilla on vaikeuksia ymmärtää eri aineiden ja kappaleiden suhdetta lämpöön. Peruskouluissa opetetavat asiat ovat makroskooppisia ja ne liittyvät lämmön johtumiseen, säteilyyn ja siirtymiseen. Käsitteiden ymmärtäminen ei vaadi lämmön todellista ymmärtämistä, vaan ne saattavat vahvistaa oppilaiden mielikuvia lämmön aineellisuudesta, mikä johtaa puolestaan väärinkäsitysten lisääntymiseen.

Osa väärinkäsityksistä on täysin kokemukseen pohjautuvia, jolloin opetus ei ole antanut riittävää valmiutta väärinkäsitysten korjaamiseksi. Ihmisten aistimukset ovat vahvoja kokemusperäisiä siteitä ilmiöihin. Hyvä esimerkki on lämmön tuntoaistimukset. Toinen kappale saattaa tuntua samassa huoneenlämpötilassa kylmältä ja toinen taas kuumalta. Ilmiö johtuu kappaleiden lämmönjohtavuuskyvyistä, mutta oppilaat tekevät usein väärän johtopäätelmän. He luulevat kappaleilla tai aineilla olevan erilaisia kykyjä sitoa lämpöä. Käsitykset lämmön tuntoaistimuksesta saattavat olla niin vahvoja, että ne säilyvät fysiikan opetuksesta riippumatta. 17-18-vuotiaille oppilaille tehdyn tutkimuksen mukaan suuri osa oppilaista luulee, että huoneenlämmössä olevat kappaleet, jotka tuntuvat kylmiltä, ovat alhaisemmassa lämpötilassa kuin huone (Grayson et al. 1995).

Brooken tutkimuksen mukaan oppilaat ajattelevat, että eri aineet ovat luonnostaan kylmiä ja toiset kuumia (Brook et al. 1984, 1985). Hyvänä esimerkkinä ovat metalliset esineet, jotka tuntuvat usein huoneenlämpötilassa kylmemmältä kuin vaikka puiset tai muoviset kappaleet. Oppilaat uskovat, että eri materiaalit vetävät puoleensa lämpöä ja

säilyttävät sitä eri tavoin (Kesidou & Duit 1988). Lisäksi oppilailla on taipumus ajatella, että lämpö siirtyy helpommin tai vaikeammin eri materiaaleihin ja niistä pois.

Amerikkalaisen tutkimuksen koehenkilöinä toimi 15-16-vuotiaita oppilaita, joille oli opetettu jo neljä vuotta fysiikkaa perinteisin keinoin. He yrittivät selittää lämmön johtumista kalorikkiteorian tavoin; materiaaleilla on tietty vaikutus lämpöön. Heidän käsitystensä mukaan lämpö on vuorovaikutuksessa ympäristönsä ja eri esineiden kanssa. ”Lämpö vetää kylmää kappaletta puoleensa, kunnes lämpötilaerot ovat tasoittuneet” (Kesidou & Duit 1998). Joidenkin oppilaiden ajatuksissa ilmalla tuntuu olevan muista aineista poikkeava ominaisuus. He olettavat, että ilma ainoastaan jäähdyttää kappaleita. Tämäkin on hyvin vahva osoitus siitä, miten kokemus muokkaa ajatuksiamme ja miten herkästi teemme sen perusteella vääriä johtopäätöksiä.

Lisäksi oppilaat uskovat, että kappaleen koko vaikuttaa sen lämpöön (Ericsson 1985). Oppilaat tarkoittavat nimenomaan lämpöä, eivätkä lämpötilaa. He siis uskovat kappaleiden sisältävän lämpöä. Tutkimuksen mukaan osa lukion 17-18-vuotiaista oppilaista olettaa, että kappaleilla voi olla tietty määrä lämpöä sisällään tai että kappaleet voivat sitoa tietyn määrän lämpöä (Grayson 1995). Tästä päätellen lukion oppilaat saattavat lämpökapasiteetin (yhtälö 1) opetuksen yhteydessä sekoittaa lämmön kappaleessa säilyväksi energiaksi tai aineeksi.

#### **4.4 Eristeet ja johteet**

Sähkö- ja lämpöopin käydään läpi eri aineiden kykyä johtaa sähkö tai lämpöä, jolloin aineet luokitellaan eristeisiin ja johteisiin. Näiden oppien välillä vallitsee analogia, joka on hyvin johdonmukainen. Silti lämpöopin yhteydessä oppilaat tuntevat vetävän opetuksesta riippumattomia ja kokemukseen pohjautuvia johtopäätöksiä enemmän kuin sähköopin yhteydessä. Lämpöopin yhteydessä ei ymmärretä johteiden ja eristeiden fysikaalista luonnetta, vaan niiden ominaisuudet sekoitetaan monella tapaa keskenään.

Lewis ja Linn tekivät aiheesta tutkimuksen, johon osallistui 12-14-vuotiaita lapsia sekä 19-45-vuotiaita aikuisia. Iästä huolimatta koehenkilöillä oli paljon samankaltaisia väärinkäsityksiä johtimien ja eristimien ominaisuuksista. Koska metallit aistitaan yleensä kylmiksi, ajatellaan, että ne vetävät puoleensa ja säilyttävät paremmin kylmää (Lewis & Linn 1994). Tosiasiassa metallit ovat johtimia, jotka johtavat nopeasti lämpöä esimerkiksi kädestä metalliin.

Osa koehenkilöistä uskoi, että johtimet johtavat lämpöä hitaammin kuin eristeet. Tämä käsitys johtuu siitä, että kylmyys ja lämpimyys yhdistetään kokemuksiin materiaaleista, jotka ovat johtimia ja eristeitä. Koska johdinmateriaalit tuntevat kylmiltä, eivät ne voi johtaa nopeasti lämpöä. Eristemateriaalit puolestaan tuntevat lämpimiltä, joten ne johtavat nopeasti lämpöä. Lisää hämmennystä voi syntyä siitä, että eristinkin tuntuu kylmältä.

Eristimien kohdalla epätasällisiä käsityksiä syntyy olettamuksesta, jonka mukaan eristimet imevät ja vangitsevat lämpöä. Termospullon käyttötarkoituksen vuoksi voi vaikuttaa siltä, että se pitää sisällään tai vangitsee hyvin lämpöä. Eristeillä on usein ihmisten mielestä lämmittäviä vaikutuksia. Erityisesti lapsilla on tapana ajatella, että villa lämmittää (Newell & Ross 1996). Näissä väärinkäsityksissä tulee jälleen esille se, miten

lämpö käsitetään ”aineena”, joka on vuorovaikutuksessa eri kappaleisiin tai materiaaleihin.

Eristimien ja johtimien välinen ero koetaankin johtuvan useimmiten siitä, minkälainen on niiden vuorovaikutus lämmön kanssa. On paljon käsityksiä, joiden mukaan lämpimältä tuntuva kappale, oli kyseessä sitten johdin tai eristin, sitoo paremmin lämpöä tai pitää sisällään enemmän lämpöä (Lewis & Linn 1994). Materiaalit luokitellaan eristimiin ja johtimiin usein tämän käsityksen perusteella.

## 4.5 Lämpö on energiaa

Sanalla lämpö viitataan fysiikassa tapaan siirtää energiaa systeemistä toiseen. Fysikaalisessa merkityksessä toinen samankaltainen mekanismi siirtää energiaa systeemistä toiseen on työ, esimerkiksi mekaaninen työ tai sähköinen työ (Viennot 1991). Lämpö ei siis kuvaa systeemin tilaa, vaan prosessia, jossa systeemin energia muuttuu.

Peruskoulussa, lukiossa ja korkeakouluissa opetetaan termodynamiikan perusteita, joista tärkeimpiin lukeutuu termodynamiikan ensimmäinen laki eli energian säilymlaki, joten se kertautuu opetuksessa vuodesta toiseen. Jostain syystä myös väärinkäsitys lämmön energialuonteesta säilyy oppilaiden ajatuksissa vuodesta toiseen.

Jo 6-13-vuotias lapsi pitää lämpöä yhtenä energian muodoista (Erickson 1979,1980,1985). Lämpö on abstrakti käsite kuten energia, joka fysiikan opetuksessa rinnastetaan valitettavan usein systeemin pysyvää tilaa kuvaavaan energiakäsitteeseen. Opetuksessa käymme läpi, miten energia muuttaa muotoaan lämmöstä työksi ja toisinpäin, vaikka sekä lämpö että työ kuvaavat energian siirtomekanismia. Ilmaisuu ei ole väärä, mutta sen epätäsmällisyys saattaa johtaa oppilaita harhaan. Erään tutkimuksen mukaan myös yliopisto-opiskelijat tulkitsevat lämmön energiakäsitteenä väärin. Heidän mielestään lämpö kuvaa kappaleen tilaa kuten sisäenergia (Roon 1992).

Väärinkäsitykset saattavat johtua opetuksen ja oppikirjojen ristiriitaisesta tiedosta. Opettajien ja oppikirjojen tekijöiden keskuudessa on paljon erimielisyyksiä siitä, miten lämpö tulisi opetuksessa määritellä. Opettajat ja oppikirjojen tekijät saattavat tulkita lämmön tieteellisen määritelmän liian monimutkaiseksi ja päätyä käyttämään yksinkertaisempaa määritelmää. Opettajalla voi olla tapana tehdä näin esimerkiksi suullisessa esityksessä. Oppikirjojen sisällössä harhaanjohtavaa tulkintaa voi esiintyä esimerkiksi energiasäilymistä käsittelevissä luvuissa ja niihin sisällytettävissä laskuissa tai esimerkeissä. Eri tulkinnat eri yhteyksissä saattavat häiritä oleellisesti oppimisprosessia.

Baierleinin mukaan oppilaille tulisi tehdä aikaisessa vaiheessa selväksi energian ja lämmön erilaisuus. ”Lämpöä ja työtä ei saisi pitää energiamuotoina, vaan paremminkin mekanismeina, jotka siirtävät sisäenergiaa ympäristöön” (Söztbilir 2003). Terminä lämpö on kuitenkin riittävä, kunhan kiinnitetään huomiota siihen, että se ei ole mitään sellaista, joka voisi säilyä systeemissä. Opetuksessa tätä tulisi korostaa entisestään, sillä etenkin lukiolaiset, jotka ovat opiskelleet jo paljon fysiikkaa, käsittävät usein lämmön ja sisäenergian samoina asioina (Harrison et al. 1999).

Lasten ja nuorten on vaikea ymmärtää abstrakteja käsitteitä kuten energiakäsite, saati sitten edellä kuvailtua mekanismikäsitettä. Lämpö-käsitteen täsmällinen määritelmä

tekee siitä vaikean opettaa ja omaksua. Vaikeutta lisää sen sekoittaminen muihin läheisiin lämpöopin käsitteisiin kuten lämpöenergia tai lämpömäärä. Opettajan näkökulmasta on joka tapauksessa tärkeää pyrkiä kuvailemaan lämpö nykyajan tieteen määrittelyn mukaisesti niin, ettei opetus sisällä ristiriitaista tietoa. Opetuksessa annettavan tiedon on oltava selkeää ja oikeellista, vaikka sen esittäminen olisikin hankalaa.

## 4.6 Olomuodonmuutokset

Lämpöä siirtyy kuumasta kappaleesta kylmään kappaleeseen, kun ne ovat fyysikaalisessa kontaktissa keskenään. Lämpöä siirtyy, kunnes kappaleet ovat samassa lämpötilassa ja niiden kesken vallitsee tasapainotila. Kyseessä on termodynamiikan peruseräite yksinkertaisesti ilmaistuna. 15-16-vuotiailla peruskoululaisilla on vaikeuksia omaksua kyseinen periaate. Heille lämpö on ainetta, joka virtaa kuumasta ja kylmään. Lisäksi heillä on oletamus, että on itsessään kuumia ja kylmiä kappaleita. Niinpä heidän mielestään lämmön siirtyminen jatkuu kuumasta kappaleesta kylmään kappaleeseen, vaikka lämpötila on saavuttanut tasapainon (Duit & Kesidou 1988). Sama ajatuksenjuoksu tuntuu pätevän myös aineen olomuodonmuutosten kohdalla.

Kahdessa eri tutkimuksessa, joissa kohderyhminä olivat 12-vuotiaat peruskoululaiset sekä 17-18-vuotiaat lukiolaiset, saatiin viitteitä siitä, että suuri osa oppilaista olettaa lämpötilan muuttuvan veden sulamisen ja kiehumisen aikana (Tiberghien 1985, Grayson et al. 1995). Lukiolaisten ajatuksista heijastui pitempi aikaisen koulutuksen vaikutus. He ymmärsivät kiehumispisteen määritelmän, mutta silti heidän mielestään olomuodonmuutoksissa lämpötila voisi nousta kiehumispistettä korkeammaksi. Väärinkäsitykset saattavat johtua lämmön aineellistamisesta; lämpöä siirtyy kiehumisen aikana edelleen veteen, joten veden lämpötilan täytyy nousta. Oppilaat eivät aina ymmärrä lämmön roolia energian siirtäjänä, vaan he yhdistävät lämmön ainoastaan lämpötilan muutokseen. Peruskoululaisilla väärinkäsitys saattaa johtua enemmänkin siitä, etteivät he ymmärrä tai tunne kiehumispisteen tarkkaa määritelmää. Oppilaille on muun muassa opetettu, että veden kiehumispiste riippuu paineesta, joten se on eri korkeassa kuin matalassa ilmanalassa. Tämä saattaa sekoittaa peruskoululaisten ja lukiolaisten ajatuksia. Opetettaessa olomuodonmuutoksia on syytä painottaa lämmön asemaa energian siirtäjänä. Veden kiehuessa lämmön siirtämä energia kuluu olomuodonmuutokseen ja näin ollen veden lämpötila ei muutu.

## 4.7 Termodynamiikan I laki

Tutkimukset osoittavat, että yliopiston ensimmäisen lukuvuoden opiskelijoilla on melko hyvä kuva tilafunktiokäsitteestä, kun taas heillä tuntuu olevan suuria vaikeuksia ymmärtää prosessiriippuvaisia määreitä kuten työ ja lämpö. Opiskelijoilla on taipumus kuvaila niitä tilanyhtälöominaisuuksien tapaan. Termodynamiikassa konkreettiseksi ongelmaksi muodostuu oppilaiden uskomus siitä, että syklisessä prosessissa tehty työ ja systeemiin absorboitunut lämpö ovat nolla (Meltzer 2002). Erään tutkimuksen mukaan ensimmäisen lain matemaattinen muoto, jossa käytetään merkintöjä  $U$ ,  $\Delta Q$  ja  $\Delta W$ , on harhaanjohtava. Termodynamiikan ensimmäisen lain määritelmässä tulee tehdä ero sisäenergian  $U$  ja varastoidun energian  $E$  välillä. Oikea matemaattinen muoto, jota

tulisi yleisesti käyttää, on  $\Delta E = Q - W$ . Tutkimuksen mukaan lämpöopin opetuksessa tulee painottaa prosessin luonnetta, eikä sen läpikäymiä tasapainotiloja (Moore 1993).

Amerikkalaisen tutkimuksen mukaan suurin osa ensimmäisen ja toisen vuoden fysiikan opiskelijoista ei ymmärrä termodynamiikan ensimmäisen lain merkitystä. Tutkimuksessa osoittautui, etteivät opiskelijat osaa erottaa toisistaan käsitteitä lämpö, lämpötila sekä työ ja energia. Tutkijoiden mielestä epämääräiset tulkinnat yksinkertaisesta mikroskooppisesta mallista saattavat häiritä makroskooppisten ilmiöiden ymmärtämistä (Loverude et al. 2001).

## 5 MITEN LÄMPÖOPPIA TULISI OPETTAA

Fysiikan opetuksen tutkimus on paljastanut meille monia asioita, joita opettajien tulisi huomioida astuessaan luokkahuoneeseen. Oppilailla on useasta aiheesta aiempia käsityksiä, joita kutsutaan tutkijoiden keskuudessa väärinkäsityksiksi, ennakkokäsityksiksi, vaihtoehtoisiksi käsityksiksi tai maalaisjärkeilyksi. Lämpöopin osalta oppilaiden käsitykset ovat huolestuttavan suurelta osin vääriä tai epätasällisiä.

Oppilaiden aiempia käsityksiä on huomattavan vaikeaa muuttaa. Etenkin perinteisen opetuksen keinoin, joka on luonteeltaan määrällistä, saadaan vain vähän oppilaiden ymmärryksessä tapahtuvia muutoksia aikaiseksi. Oppilaiden tieto ei ole johdonmukaisesti järjesteltyä. Heidän tietonsa pohjautuu pääosin huonosti toisiinsa kytköksissä olevasta sekalaisesta faktatiedosta ja kaavoista. Heidän ajatteluaan eivät johda fysiikan periaatteet vaan paremminkin sirpaleiset tiedonjyvät (Knight 2002).

Tarkoituksenani on pohtia mikroskooppisen lähestymisen näkökulmasta, miten lämpöopin tiedollista sisältöä tulisi muuttaa laadukkaammaksi niin, että se tukisi nykyisen käsityksen mukaisen lämpöopin opetusta. Keskityn opetuksen tiedolliseen sisältöön, joten tarkasteluni ulkopuolelle jää useita menettelytapoja, joilla mikrotason fysiikan opetustoimintaa voisi parantaa.

### 5.1 Valtakunnallinen opetussuunnitelma

”Fysiikan ja kemian opetuksen lähtökohtana ovat oppilaan aikaisemmat tiedot, taidot sekä kokemukset sekä ympäristön aineista, kappaleista ja ilmiöistä tehdyt havainnot ja tutkimukset, joista edetään kohti fysiikan ja kemian peruskäsitteitä ja peruseriaatteita” (Valtakunnallinen peruskoulutuksen opetussuunnitelma, 2004).

Valtakunnallisen opetussuunnitelman (2004) mukaan alaluokilla opetetaan fysiikassa veden olomuodonmuutoksiin liittyvää lämpöopin käsitteistöä kuten lämpötila. Alaluokkien fysiikan aihealueisiin sisältyy myös lämmön aikaansaaminen sähkön avulla. Alaluokkien fysiikka on paljolti kokeilua, tutkimista ja ilmiöiden havainnointia. Lämmön abstraktiin luonteeseen ei käydä vielä käsiksi. Aineen rakennetta tutkitaan sen verran, että ilman koostumus ja veden ominaisuudet tulevat tutuiksi.

Sama peruslinjaus jatkuu vuosiluokilla 7-9. Lämpöä käsitellään kuitenkin jo omana erillisenä aiheenaan ja siihen liitetään useampia uusia käsitteitä. Ilmiöiden makroskooppinen esitystapa ja käsitteellistäminen ovat etualalla. Aiheina ovat kappaleiden ja aineiden lämpiäminen sekä jäähtyminen ja lämmön energiamuoto. Luonnon rakenteet ovat omana aihealueenaan, jossa käsitellään aineen rakenneosasia ja niitä koossa pitäviä vuorovaikutuksia, mittasuhteita sekä rakenneosasten välisiä prosesseja. Aineen hiukkasmalli tulee siis jossakin määrin tutuksi.

”Fysiikka on empiirinen luonnontiede, jossa luonnon perusrakennetta ja ilmiöitä pyritään ymmärtämään ja selittämään käyttäen luonnosta kokeellisin menetelmin saatavaa tietoa. Tavoitteena on löytää luonnossa yleispäteviä lainalaisuuksia ja esittää ne matemaattisina malleina” (Valtakunnallinen lukion opetussuunnitelma, 2003).

Lukion lämpöoppi on jo syvällistä fysiikkaa, jossa yhdistyvät lämmön makroskooppinen sekä mikroskooppinen malli. Perinteinen suuntaus opetuksessa on



lähestyä ilmiöitä makroskooppisesta näkökulmasta tarjoten myös mikroskooppiseen selityksen. Pääpaino on selkeästi termodynamiikan makroskooppisten tilojen tarkastelussa. Joskus mikroskooppinen käsittely saatetaan sivuttaa kineettistä kaasuteoriaa lukuun ottamatta kokonaan. ”Tavoitteena on, että opiskelija tuntee lämpöön liittyvät ilmiöt ja osaa tutkia termodynaamiseen tilaan tai lämpöopin pääsääntöihin liittyviä ilmiöitä” (Valtakunnallinen lukion opetussuunnitelma, 2003). Näin ollen valtakunnallinen opetussuunnitelma ei painota lämmön mikroskooppisen luonteen tarkastelua opetuksessa.

Keskeisimpänä sisältönä ovat kaasujen tilanmuutokset, lämpölaajeneminen, kappaleiden lämpeneminen, jäähtyminen, olomuodonmuutokset, lämpöenergia, lämpöopin pääsäännöt sekä sisäenergia. Näin ollen valtakunnallinen opetussuunnitelma laiminlyö myös kineettisen kaasuteorian asemaa lämpöopin opetuksessa.

Lämpöoppi on lukion ensimmäinen ja toinen vapaavalintainen kurssi. Kolmannessa kurssissa käsitellään aaltofysiikkaa ja värähtelyliikettä ja vasta kahdeksannessa kurssissa aineen rakennetta eli aineen hiukkasluonnetta. Fysiikan opetuksessa pätee edelleen vahva historiallinen jaottelu klassiseen ja moderniin fysiikkaan. Historia kuitenkin osoittaa, että lämmön luonne selvisi meille vasta aineen hiukkasmallin avulla. Lämpöoppi oli tärkeä astinlauta koko modernin fysiikan synnylle, emmekä ilman modernin fysiikan syntyä osaisi vielääkään selittää lämmön luonnetta. Olemmeko juuttuneet vanhaan opetuskaavan? Olisiko syytä miettiä uusia tehokkaampia tapoja opettaa lämpöoppia? Olisiko syytä miettiä lukiopetukseen uutta sisältöä tai sisältöjärjestystä? Herää myös kysymys, onko asiaa tutkittu tarpeeksi.

## 5.2 Oppilaiden valmiudet

Useat lämpöopin opetuksesta tehdyt tutkimukset korostavat, että opettajien on hyvä tiedostaa ja ottaa huomioon lasten käsitykset ja valmiudet opetettavasta aineesta. Vasta kun opettajat tietävät, mitä heidän oppilaansa todellisuudessa ajattelevat asioista, ja miten vähän perinteinen opetus vaikuttaa lasten ennakkokäsityksiin, voivat opettajat alkaa miettiä oikeanlaisia opetusstrategioita (Ahtee 1993). Lämpö ja lämpötila ovat hyviä esimerkkejä aiheista, joista lapsilla on paljon ennakkokäsityksiä, jokapäiväisiä kokemuksia ja joista he luulevat tietävänsä kaiken oleellisen.

Lapset sekoittavat helposti tieteelliset termit arkisiin ilmaisuihin, ja heidän päätelmissään maalaisjärki korvaa tieteellisen teorian. Jotta lapset ymmärtäisivät tieteellisen teorian ja oppisivat hyödyntämään sitä, tulisi luoda selkeitä ja tehokkaita opetusstrategioita. Esimerkiksi lämmön ja lämpötilan opetuksessa olisi keskityttävä enemmän fysikaalisten ilmiöiden kuvailuun kuin perinteiseen tiedon julistukseen (Viennot 1998). Lapset ovat tärkeässä roolissa, sillä heidän varhainen kehityksensä luo pohjan sille, miten he jatkossa konstruoivat tietoaan. Jara-Guerreron mukaan olisi selvitettävä, missä vaiheessa lapsen kehitystä lapset ovat valmiita oppimaan uusia vaikeita käsitteitä ja niihin liittyviä konteksteja (Jara-Guerrero 1993).

Myös peruskoulun ja lukion oppilailla on epätasällisiä ennakkokäsityksiä lämmöstä. Osa väärinkäsityksistä säilyy koko eliniän ajan opetuksesta huolimatta. Uusien käsitteiden lisääntyminen opetuksessa lisää myös oppilaiden väärinkäsityksiä. Lämpöilmiöiden tieteellinen selitys ei ole helppo. Fysikaalinen selitys vaatii aineen

hiukkasmallin ymmärtämistä. Oli kyseessä lapsi, aikuinen, opettaja tai tiedemies, jokaisesta ryhmästä löytyy ihmisiä, joilla on vaikeuksia selittää arkisia lämpöön ja lämpötilaan liittyviä ilmiöitä (Lewis et al. 1994, Lewis & Linn 2003).

Peruskoulun jättävillä oppilailla on vaikeuksia ymmärtää erityisesti energiäksitetä, hiukkasmallia sekä lämmön ja lämpötilan erilaisuutta (Kesidou & Duit 1993). On selvää, että hyvällä opetuksella voidaan korjata oppilaiden käsityksiä, parantaa heidän valmiuksiaan tehdä tieteellisiä päätelmiä ja siten vähentää heidän väärinkäsityksiään. Mutta miten ”hyvä” opetus tulisi sitten toteuttaa? Suomalaisten oppilaiden lämpöoppiin liittyviä käsityksiä tutkineen Maija Ahteen mukaan oleellisinta olisi selvittää paras mahdollinen järjestys opettaa lämpöopin käsitteitä sekä ilmiöitä (Ahtee 1993). Mikä olisi johdonmukaisin järjestys lähestyä ja edetä lämpöopin opetuksessa? Milloin esimerkiksi lämpöopin makroskooppiset käsitteet tulisi selittää mikroskooppisesta näkökulmasta hiukkasmallin mukaan?

Fysiikan opetuksessa energiäksite mainitaan jo alaluokkien opetussuunnitelmassa. Opettajien mielestä se on yksi vaikeimmista peruskoulu- ja lukiofysiikan käsitteistä, ja erityisesti lämpö koetaan hyvin hankalaksi. Opettajien keskuudessa on kuitenkin erimielisyyksiä siitä, miten ja milloin energiäksitetä ja termodynamiikan käsitteitä tulisi opettaa (Luera et al. 2005). On myös kiistelty siitä, tulisiko opettaa aikaisemmin termodynamiikan ensimmäinen vai toinen laki. 5-15-vuotiaiden lasten ajattelun kehitystä on tutkittu energian säilymislain ja entropian yhteydessä. Tutkimustulosten mukaan lapset ymmärtävät energian säilymislain hyvin vasta 15-vuotiaina, kun taas entropia opitaan 9-15-vuotiaina (Schultz & Coddington 1981).

Konstruktivismiin mukaan uusi tieto rakentuu aina vanhan tiedon pohjalta. Oppilaiden on vaikea oppia uusia asioita, joihin heille ei ole aikaisempaa tiedollista tai kokemusperäistä kytköstä. Tieteellistä näkökulmaa lämpöön on vaikea opettaa ennen ymmärrystä energiäksitteestä. Lämmön mikroskooppista selitystä on vaikea opettaa ennen aineen hiukkasmallin ymmärtämistä. Koska lapsilla on jo varhain vahvat uskomukset lämmöstä, tulisi heille mahdollisimman pian opettaa tieteellinen selitys lämmöstä. Lasten tulisi aikaisessa vaiheessa tiedostaa omat väärinkäsitykset, jotta ne voisivat tehokkaasti korjaantua (Luera et al. 2005).

Tämänhetkisen lukio-opetuksen perusteella on oletettavaa, että kaikilla yliopistoon siirtyvistä opiskelijoista ei ole selkeää kuvaa lämmön mikroskooppisesta luonteesta. Asiaa ei paranna se, että myös yliopistoissa lämpöoppia lähestytään johdatus- tai peruskursseilla pääosin makroskooppisesta näkökulmasta. Amerikkalaisen tutkimuksen mukaan olisi hyödyllistä, että yliopisto-opiskelijoiden tietämys lämmöstä rakentuisi systemaattisesti aineen hiukkasmallin ja siihen liittyvän mekaniikan varaan. Aineen hiukkasmallin ja siihen liittyvän mekaniikan omaksuminen ei tutkijoiden mukaan vaatisi suurta ponnistelua. Mikroskooppinen lähestyminen tarjoaa syvällisen fysikaalisen ymmärryksen lämpöilmiöihin ja lisäksi se on loistava väline hiukkasmallista riippumattoman termodynamiikan analysointiin (Reif 1999).

### **5.3 Motivaatio**

Suomalaisessa opettajankoulutuksessa painotetaan oppilaiden motivaation vaikutusta oppimistuloksiin. Opettajien oma motivaatio ja asenne tiedettä kohtaan

heijastuvat helposti oppilaisiin. Opetuksen on oltava riittävän haastavaa, mutta ei ylitsepääsemättömän vaikeaa. Sen tulisi olla käytännönläheistä ja tutkivaa, sisältäen myös sosiaalista vuorovaikutusta. Sen tulisi huomioida yksilöiden tiedolliset ja taidolliset erot.

Fysiikan opetuksessa teorian ei pitäisi olla itsetarkoitus, vaan sen tulee toimia jokapäiväisten ilmiöiden selityksen tukena. Turkkilaisessa tutkimuksessa oppilaat osallistuivat innokkaammin ja saavuttivat parempia oppimistuloksia, kun opetuksessa pohdittiin puhtaan teoreettisen lähestymisen sijaan jokapäiväiseen elämään liittyviä ongelmia (Sözbilir 2003).

Opetussuunnitelman tulisi erityisesti motivoida oppilaita konstruoimaan ymmärrystä ja hyödyntämään tieteellisten käsitteiden käytännön malleja (Linn et al. 1991). Oppilaiden on hyvä saada kokeilla teorian toimivuutta käytännössä tekemällä ilmiöistä kokeita ja vertaamalla kokeiden tuloksia teorian antamiin tuloksiin. Termodynamiikan ilmiöitä voidaan helposti tutkia laboratorio-oloissa, mutta makroskooppinen lähestyminen ei aina anna tyydyttävää selitystä ilmiöihin.

Aineen hiukkasmalli tarjoaa meille täsmällisen selityksen, mutta sen tutkiminen on vaikeaa. Lämmön mikroskooppinen teoria jää opetuksessa monesti irralliseksi malliksi, jolla ei ole yhteyttä luonnon makroskooppiseen ilmiöön. Miksi oppilaat keskittyisivät teoriaan, jolla ei ole opetuksessa painoarvoa eikä selkeää yhteyttä ilmiöihin? Tutkimuksissa onkin havaittu, että oppilaille on taipumus olla välittämättä lämmön kineettisestä mallista ja että he eivät osaa yhdistää kokeellisia tuloksia teoriaan (Linn & Songer 1991). Lämmön hiukkasmalli toimii liian usein opetuksessa pelkkänä lopputoteamuksena tai kuvissa esiintyvänä havainnollistamisvälineenä. Mikroskooppista mallia tulisi käyttää kokonaisvaltaisesti lämpöopin opetuksessa.

## 5.4 Havainnollistaminen

Tutkimukset puoltavat lämpöopin opetusta, joka sisältää paljon visuaalista tai muuten havainnollista materiaalia, esitystä tai kokeita. Lämpötila on monissa yhteyksissä suhteellinen suure ja sen muutokset ovat kokemusperäisiä, aistittavissa olevia ilmiöitä. Lämmön siirtyminen kuumasta kylmään ja hakeutuminen termiseen tasapainoon ovat ilmiöitä, jotka voidaan kokea tuntoaistin avulla. Opetuksessa tätä voidaan hyödyntää. Oppilaiden on todettu visuaalisen ja kosketusmalliin perustuvan opetuksen avulla ymmärtävän paremmin lämpötilan ja termisen tasapainon välisen suhteen (Clark & Jorde 2004).

Lämpö voidaan tuntea, mutta sitä ei voida nähdä, minkä vuoksi lämmön visuaaliseen kuvailuun tarvitaan sen mikroskooppista hiukkasmallia. Lämpö ja siihen liittyvät ilmiöt voidaan esittää hiukkasten liikkeenä ja värähtelynä toistensa suhteen. Esittämistapoja on monia, esimerkiksi kuvat, kaaviot, animaatiot ja tietokoneohjelmat.

Tietokoneen arvoa havainnollistamisvälineenä on syytä korostaa. On osoitettu, että tietokonesimulaatiota voidaan käyttää antamaan laadullista ymmärrystä molekyylien välisien voimien vaikutuksesta esimerkiksi nesteiden mikroskooppiseen ja makroskooppiseen käyttäytymiseen (Mulero et al. 1993). Botet korostaa yleisesti tietokoneen roolia fysiikan opetuksessa ja erityisesti mikroskooppisten ilmiöiden esittämisessä (Botet & Trizac 2005). Internetistä löytyy runsaasti simulaatioita, joita

voidaan hyödyntää lämpöopin opetuksessa. Simulaatiot kuvaavat yleensä termodynaamisen systeemin hiukkasten liikettä, jota voidaan muokata syöttämällä ohjelmaan makroskooppisten parametrien arvoja. Simulaatiot ovat tietenkin vain karkeita arvioita todellisuudesta, mutta ne havainnollistavat hyvin mikromaailman ja makroskooppisten ilmiöiden yhteyttä. Hyvän lämpöilmiöitä kuvaavan simulaation tulisi mielestäni nimenomaan tuoda esiin mikro- ja makromaailman välisen yhteyden eikä pelkästään esittäisi mikroskooppisia tapahtumia. Esimerkiksi lämmön virtaaminen voitaisiin esittää hiukkasten liike-energian kautta, jonka makroskooppinen vastaavuus olisi systeemin sisäenergia. Prosessissa tapahtuvat muutokset esitettäisiin siis sekä hiukkasten liikkeen muutoksella että systeemin sisäenergian muutoksella. Tosin tässäkin esitystavassa on omat vaaransa.

## 5.5 Muita perusteluja mikroskooppiseen lähestymiseen

Termodynamiikka kuvailee lämpöopin ilmiöitä puhtaasti makroskooppisesta näkökulmasta. Termodynamiikka tutkii systeemin makroskooppisia tasapainotiloja, mikä ei vaadi niihin liittyvien mikroskooppisten prosessien tuntemista. Lämmön siirtymistä systeemistä A systeemiin B voidaan kuvailla seuraavasti: systeemin A ja B välillä on ”lämpövuorovaikutusta”, jonka seurauksena A:n sisäenergia vähenee ja B:n sisäenergia kasvaa.

Makroskooppisen kuvailun heikkoutena on se, ettei se kerro mitään siitä fysikaalisesta prosessista, joka tapahtuu lämmön siirtymisen aikana. (Helsdon 1976). Abstraktit käsitteet helpottavat tiettyjen fysikaalisten ilmiöiden käsittelyä, mutta niistä puuttuu tärkeä fysikaalinen ymmärrys.

Termodynamiikka ja sen lakien soveltaminen käytäntöön eivät vaadi lämmön mikroskooppista mallia, mutta termodynamiikan ilmiöiden fysikaalinen ymmärtäminen vaatii sitä. Kyseiset termodynamiikan perusilmiöt ovat myös lukion lämpöopin opetuksesta tutut paineen ja lämpötilan kasvu puristettaessa kaasua kasaan, lämmön siirtyminen ja lait, kuten Joulen laki ja termodynamiikan toinen laki (Helsdon 1976).

Mikroskooppista lähestymistä termodynamiikkaan voidaan perustella myös sillä, että se korostaa lämpöenergian eroavuutta muista energialajeista. Lämpö on molekyylien tai pienempien hiukkasten satunnaista liikettä, ja lämpöenergia eroaa muista energialajeista nimenomaan sen satunnaisuuden vuoksi. Lämmön satunnainen olemus tekee mahdottomaksi muun muassa sen muuttamisen kokonaan mekaaniseksi työksi, mikä on termodynamiikan peruseriaatteita. Makroskooppinen näkökulma ei tuo selkeästi esille lämmön ja muiden energiamuotojen välistä eroa, eikä näin ollen anna selitystä termodynamiikan toiselle laille.

Yliopistofysiikan perinteisellä peruskurssilla termodynamiikan osuus alkaa ajatuksilla lämmöstä, lämpötilasta sekä termodynamiikan ensimmäisen lain kuvailusta. Tämän jälkeen siirrytään vaikeisiin käsitteisiin kuten entropia ja termodynamiikan toinen laki. Oppilaille olisi hyvä tarjota myös vaihtoehtoinen oppimistie. Baierleinin mukaan opetuksen jälkimmäinen osuus voisi alkaa entropian mikroskooppisesta käsitteestä sekä lämpösystemien välisten prosessien laadullisesta kuvailusta. Entropian opetuksen avainkäsite on makrotilaa kuvaavien mikrotilojen lukumäärä (Baierlein 1994).

## 5.6 Ongelmia mikroskooppisen lämmön opetuksessa

Olen pyrkinyt selvittämään lämpöopin mikroskooppisen mallin käytön hyötyjä opetuksessa. Jokainen oppilas on yksilö, eivätkä kaikki mallit ja opetusmetodit sovi kaikille tasavertaisesti. Yksi oppilas oppii tekemällä visuaalisia havaintoja, toinen tekemällä ja tutkimalla, kolmas kuuntelemalla opettajan puhetta ja neljäs keskustelemalla aiheista.

Aineen hiukkasmalli on keskeinen kuvattaessa lämmön luonnetta ja lämpöön liittyviä ilmiöitä. Ilman sitä emme pääse tarkastelemaan ilmiöitä pintaa syvemmälle. Nykypäivän lämpöopin opetus ei voi sivuttaa niin oleellista mallia, jonka juuret juontuvat jo viime vuosisadan alusta. Lämmön mikrotason kuvailun ongelmaksi opetuksessa muodostuukin oppilaiden heikko tietämys aineen hiukkasmallista. Lämpöoppi on perinteinen klassisen fysiikan kurssi, joka opetetaan varhaisessa vaiheessa sekä lukioissa että yliopiston kursseilla. Aineen hiukkasmalliin tutustutaan vaiheessa, jonka jälkeen lukio-opetuksessa ei enää tarkastella lämpöilmiöitä.

Amerikkalaisen tutkimuksen mukaan yliopisto-opiskelijoilla on vaikeuksia ymmärtää ideaalikaasulain makroskooppisia muuttujia. Oppilaiden vaikeuksilla todettiin olevan yhteys heidän vääriin tulkintoihinsa ilmiöihin liittyvistä mikroskooppisista prosesseista (Kautz et al. 2005). Samankaltaisia johtopäätöksiä on saatu myös tutkittaessa oppilaiden ymmärrystä sähkövirtapiireistä (Thacker et al. 1997). Voidaan siis päätellä, että opiskelijoilla on liian heikko tietämys aineen hiukkasmallista tai he eivät osaa yhdistää niitä lämpöopin tai muiden fysiikan oppien makroskooppisiin ilmiöihin. Thackerin tutkimusryhmä täsmentää, että fysiikan opetuksessa tulisi kiinnittää huomiota mikroskooppisiin malleihin ja niiden kehittymiseen.

Vaikka aineen hiukkasmalli syventää oppilaiden tietämystä ja saattaa täsmentää heidän käsityksiään lämmöstä ja sen ilmiöistä, on toki perusteltua pohtia, onko hiukkasmallin käyttäminen peruskoulu- ja lukiotasolla tarpeellista. Lukion lämpöoppi on iso kokonaisuus, joka sisältää paljon uusia käsitteitä. Onko oppilaita siis turha kuormittaa ”ylimääräisellä” tiedolla? Randal Knightin mukaan oppilaille pitää juurruttaa ensisijaisesti kaksi pääajatusta lämpöopista: ”Lämpöoppi käsittelee systeemien makroskooppisia ominaisuuksia ja niiden ymmärtämistä, ja termodynamiikka puolestaan on yleisempi oppi siitä, miten makroskooppiset systeemit siirtävät ja vaihtavat energiaa” (Knight 2002).

Fysiikan opetuksen tutkimuksen mukaan oppilaat oppivat parhaiten, kun he pystyvät yhdistämään teorian esillä olevaa ilmiöön tai kokeeseen (Knight 2002). Jotta tällainen yhteys voitaisiin saavuttaa, tulisi opetuksen lähteä liikkeelle todellisen maailman havainnoista, konkreettisista ilmiöistä, joiden pohjalta voidaan edetä abstrakteihin käsitteisiin.

Lämmön mikroskooppinen lähestyminen on oiva tapa havainnollistaa tiettyjä lämpöopin ilmiöitä esimerkiksi graafisilla esityksillä tai tietokonesimulaatioilla, mutta mikromaailma ei ole mitenkään konkreettisesti esillä meidän havainnoimassamme maailmassa. Aineen hiukkasmallin ja havainnoitavissa olevan maailman välille ei voida luoda samanlaista yhteyttä kuin esimerkiksi mitattavissa olevan lämpötilan tai tilavuuden tapauksessa.

Kokeellisuus on yksi tärkeimmistä tavoista opettaa fysiikkaa. Kouluopetuksessa kokeellisuudella tarkoitetaan alkeellisia koulutiloissa toteutettavissa olevia fysiikan ilmiöiden tutkimuksia, joissa yleensä mitataan makroskooppisia suureita. Kokeellisuuden hyödyntäminen aineen hiukkasmallin yhteydessä on mahdotonta, sillä lämmön hiukkasmallia ei voida suoraan kokeellisesti osoittaa. Oppilaat eivät voi tutkia yksittäisten hiukkasten liikettä, niiden keskinäistä vuorovaikutusta tai niiden vuorovaikutusta ympäristöönsä. Näin ollen oppilaiden on vaikea sisäistää teoriaa hiukkasten maailmasta, joka olisi yhteydessä heille todelliseen, kokeellisesti mitattavissa tai havainnoitavissa olevaan maailmaan.

Yleinen ajatus lämpöopista on nimenomaan siihen liittyvät makroskooppiset systeemit. Tämä on hyvin pitkälti historiasta juontuva ajatus. Nykyään lämpöoppi statistisine tarkasteluineen on jo paljon muuta. Oppilaiden epätasälliset käsitykset lämmöstä sekä vaikeudet oppia lämpöopin lakeja osoittavat, että myös käsitteellisen tiedon sisällön opetusta olisi hyvä uudistaa. Fysiikan opetuksessa käsitteellisellä tiedolla (conceptual knowledge) tarkoitetaan tietämystä fysiikan periaatteista, sekä tietämystä, joka rakentaa monista tiedon (fakta) palasista yhtenäisen ymmärryksen. Käsitteellinen tietämys on jotain, jonka avulla asioita ja ilmiöitä voidaan selittää tai ennustaa (Knight 2004). Hyvin opetettuna mikroskooppinen malli lisää oppilaiden käsitteellistä tietämystä, mutta huonosti opetettuna malli saattaa myös rikkoa oppilaiden yhtenäisen ymmärryksen lämpöopista.

## 5.7 Ohjeita opetukseen

Yksi suurimmista kompastuskivistä lämpöopin teorian oppimisessa on ihmisten iästä riippumaton taipumus lineaariseen päättelyyn. Lämpöopin ilmiöiden fysikaalinen perusta on aineen hiukkasmallissa, joka ei ole suoraan järkeiltävissä makroskooppisen maailman ilmiöistä. Viennot antaa kaksi tärkeää ohjetta, joiden avulla lämpöopin opetusta voidaan parantaa. Ensinnäkin pitää tunnistaa prosessiin osallistuvat systeemit ja niiden luonne, jotta voidaan ennustaa lämmön siirtyminen. Toiseksi oppilaille pitää esittää selkeästi, mitkä tekijät vaikuttavat muutokseen ja mitkä pysyviin tiloihin (Viennot 1998).

Opettajan antamat selitykset oppilaille ovat erityisen tärkeitä. Selitysten on oltava sellaisia, että oppilaille on edellytykset niiden omaksumiseen. Mielestäni ei ole kuitenkaan väärin antaa tieteellisesti oikeaa selitystä, vaikka sen ymmärtäminen olisi oppilaille hankalaa. Totuutta ei saa vääristää, mutta se on esitettävä oppilaille ymmärrettävässä muodossa. Opettajan on valittava käyttämänsä käsitteet huolella. Paras selitys ei ole aina ilmiöiden kuvailu hienoilla tieteellisillä termeillä, mutta käsitteisiin on kuitenkin tutustuttava aikaisessa vaiheessa.

## 5.8 Tutkimus termodynamiikan opetuksesta lähtökohtana aineen hiukkasmalli

(Ma-Naim et al., 2001)

Opettajien on syytä kysyä itseltään, miten heidän tulisi sisällöllisesti toteuttaa termodynamiikan opetusta. Opetuksen lähtökohtana voi olla kaksi suurta linjausta eli

makroskooppinen lähestyminen tai hiukkasmallia hyväksi käyttävä mikroskooppinen lähestyminen. Israelissa vuonna 2001 tehdyn tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, minkälaisia tuloksia mikroskooppinen lähestymistapa tuottaa käsitteiden lämpö ja lämpötila oppimisessa. Tutkimuksen hypoteesina oli, että hiukkasmalli helpottaa tieteellisten käsitteiden omaksumista tehden niistä havainnollisempia ja konkreettisempia. Tutkijoiden mukaan perinteinen opetus jättää jälkeensä useita väärinkäsityksiä oppilaiden ja opettajien keskuudessa. Hyvänä esimerkkinä on, että lämpö, joka on ”laaja suure” ja lämpötila, joka on ”suppea suure”, sekoitetaan keskenään. Tutkijoiden mielestä tämä johtuu osittain oppikirjojen heikkoudesta. Niissä ilmiöt ja käsitteet esitetään lähes pelkästään makroskooppisesta näkökulmasta. Mikroskooppinen selitys annetaan usein vain lyhyenä jälkikatsauksena.

Tutkimus suoritettiin siten, että koehenkilöille opetettiin perinteisestä tavasta poiketen ensin lämmön hiukkasmalli, jonka pohjalta vasta myöhemmin määriteltiin termodynamiikan makroskooppiset käsitteet kuten lämpö, lämpötila ja sisäenergia. Kaikki nämä käsitteet ovat selkeästi esitettävissä hiukkasmallin avulla. Lämpöilmiöistä keskusteltiin pienissä ryhmissä, minkä jälkeen ne käytiin opettajajohtoisesti läpi kolmella eri tavalla. Ilmiön esittelyn jälkeen oppilaille annettiin hiukkasmallin mukainen selitys, käytiin läpi ilmiössä tapahtuvat systeemin energiatilojen muutokset ja lopuksi kuvailtiin ilmiön makroskooppinen luonne.

Tutkimuksen johtopäätös oli, että oppilaiden tulisi tuntea hyvin aineen hiukkasmalli ennen kuin he aloittavat lämpöopin opiskelun. Oppilaiden kyky selittää lämpöilmiöitä parani huomattavasti, kun he olivat saaneet mikroskooppista lähestymistapaa suosivaa opetusta. Suomalaisen opetussuunnitelman mukaan lämpöä käsitellään kuitenkin veden olomuotojen yhteydessä jo alaluokilla. Lukiossa lämpöoppi on fysiikan ensimmäinen valinnainen kurssi ja aineen hiukkasmallia käsitellään vasta myöhemmin. Vaikka lämpö on arkinen ja tuttu asia, opettajien on syytä muistaa, että lämpöoppi on abstrakti aihe, joka sisältää vaikeita käsitteitä.

Lämpöopin opettamiseen tulisi sisällyttää sen konkreettinen malli eli hiukkasmalli, jolloin ilmiöt voidaan paremmin havainnollistaa kuvina ja kaavioina. Hyvänä esimerkkinä on molekyylien jousimalli, jonka avulla voidaan mallintaa hiukkasten liikettä toistensa suhteen sekä niiden potentiaalienergian muutosta. Valtakunnallisessa opetussuunnitelmassa tulisi harkita aineen hiukkasmallin opettamista ennen lämpöoppiin siirtymistä, jolloin oppilaiden valmiudet sisäistää lämmön mikroskooppiset ilmiöt ja nähdä niistä yhteyksiä makroskooppisiin ilmiöihin olisivat paremmat.

## 6 OPPIKIRJA-ANALYYSI

Fysiikan lukio-oppikirjat sisältävät määrällisesti paljon tietoa opetettavasta aiheesta. Tietomäärä ylittää usein valtakunnallisen opetussuunnitelman määrittelemät raamit, mikä on toisaalta hyvä, sillä oppilaat voivat näin ollen oppikirjan avulla syventää tietämystään. Toisaalta vaarana on oletamus siitä, että oppilaat osaisivat itsenäisesti havaita oleellisen tiedon muun tekstin joukosta. Fysiikan opetuksen tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että fysiikan opetuksessa oleellinen tieto tukee fysiikan periaatteiden ja käsitteiden ymmärtämistä. On havaittu, että oppilaat osaavat yhdistää fysiikan kaavoja tehtävien ongelmiin ja ratkaista niitä ymmärtämättä niiden taustalla olevia fysiikan periaatteita (Knight, 2002). Tämän arvellaan johtuvan osittain laadullisen tiedon korostuksen puutteesta opetuksessa. Perinteisesti oppikirjoissa ja opetuksessa korostuvat ongelmien matemaattinen käsittely ja tiedon toteava luonne.

Opettajien yleinen ongelma on ajankäyttö. Aikaa ei tunnu koskaan olevan riittävästi koko kurssin aiheiden läpikäymiseen. Etenkin vasta valmistuneet fysiikan opettajat myöntävät tukeutuvansa pitkälti oppikirjoihin, jolloin kurssin sisältö vastaa myös pitkälti oppikirjan sisältöä. Opettajien tulisi tiedostaa voimakkaammin, ettei kurssin tarkoituksena ole kiiruhtaa kaikkia oppikirjan aiheita läpi kannesta kanteen. Opetuksessa tärkeintä on korostaa aiheeseen liittyviä fysiikan periaatteita ja käsitteitä, joiden oppiminen vie yllättävän paljon aikaa. Oppikirjat ovat joka tapauksessa tärkeitä, koska oppilaat valmistautuvat itsenäisesti ylioppilaskirjoituksiin hyvin paljon lukemalla oppikirjoja.

Tutkimusten perusteella laadullisen opetuksen tulisi korvata määrällinen opetus. Perinteisen opetuksen saaneilla oppilailla on vaikeuksia yhdistää fysiikan teoriaa todellisen maailman ilmiöihin. Lisäksi heillä on paljon vääriä tai epätasällisiä käsityksiä fysiikan peruskäsitteistä. Perinteinen opetus suosii liiaksi ulkolukua, vaikka tiedämme hyvin, että opetuksen tarkoituksena on pikemmin kehittää käsitteellistä ymmärrystä ja siihen pohjautuvien selityksien muodostamista. Uusia opetustapoja onkin kehitelty paljon viimeisten vuosikymmenien aikana. Entä miten on opetuksen tiedollisen sisällön laita? Olisiko mahdollista kehittää opetuksen tiedollista sisältöä siten, että se tukisi paremmin oppilaiden oppimisprosessia, entä oppikirjojen tiedollista sisältöä?

Aikaisemmin on käsitelty, minkälaisia ennakkokäsityksiä ja väärinymmärryksiä oppilailla on lämpöoppiin liittyen, minkä pohjalta on pohdittu lämpöopin opetuksen sisältöä mikroskooppisen lähestymisen näkökulmasta. Nyt tarkastelun kohteena ovat nykyisten fysiikan lämpöoppia käsittelevien oppikirjojen sisällöt. Miten mikroskooppinen lähestyminen esiintyy oppikirjoissa? Nouseeko esiin edellä mainittuja puutteita, ongelmakohtia ja miksei myös hyviä näkökulmia?

### 6.1 Analyysin rakenne

Oppikirja-analyysini tarkoituksena on selvittää, miten paljon ja minkälaista laadullista tietoa nykyiset lukio-oppikirjat sisältävät mikroskooppisesta lähestymisestä lämpöoppiin. Tarkastelen myös, missä muodossa ja missä vaiheessa tieto tuodaan kirjoissa esille. Käsitelen analyysissäni kolmen eri kustantajan oppikirjoja lämpöopista:



Fysiikka-, Fotoni- ja Physica-kirjasarjaa. Näiden kirjasarjojen uudet painokset ovat tällä hetkellä valtaosin käytössä Suomen lukioissa.

Oppikirja-analyysin tekemiseen ei ole määritelty täsmällisiä sääntöjä, joten se on aina tekijänsä näköinen. Oppikirja-analyysi on siis jossain määrin subjektiivinen, vaikka siinä pyritäänkin mahdollisimman objektiiviseen havainnointiin. Oppikirjan tietoa voidaan luokitella sekä määrällisesti että laadullisesti. Voidaan tutkia tiedon esiintymismäärää, tiedon esittämisen järjestystä tai tiedon laadullista muotoa. Itse olen päättänyt analysoida hieman kaikkia osa-alueita, koska pyrin selvittämään, onko nykyisten lämpöopin oppikirjojen tiedollinen rakenne riittävä.

Kirjasarjat käydään läpi rinnakkain, tietty aihe kerrallaan. Näin päästään vertailemaan kirjojen etenemistä ja tiedollista esitystä keskenään. Ensin lähdetään liikkeelle yleisistä asioista kuten kirjojen ulkoasusta ja lopuksi vertaillaan tarkemmin kirjojen esiin tuomaa mikroskooppista lähestymistä. Olen itse määritellyt ne keinot, joiden avulla voin pohtia kirjojen sisältöä mikroskooppisesta näkökulmasta. Tiedon esiintymismuoto ja tiedon sisällön luonne ovat luokiteltuna liitteenä olevassa taulukossa (Liite 1).

Analyysissäni tieto on luokiteltu sisältönsä puolesta selittäväksi, täsmentäväksi, kertaukseksi, maininnaksi tai harhaanjohtavaksi. *Selittävä* tieto pyrkii selittämään ilmiötä melko laaja-alaisesti aineen hiukkasmallin avulla. *Täsmäntävä* tieto tuo hieman lisäselvitystä jo edellä mainittuun asiaan. *Maininta* on puolestaan lyhyt lause, jossa esiintyy jollakin tavoin aineen mikroskooppinen rakenne. *Kertaus* on vanhan tiedon toistoa, joka voi olla kuitenkin selittävää. *Harhaanjohtava* tieto ei ole välttämättä väärää tietoa, mutta siitä voi saada epätasällisen käsityksen asiasta.

Esiintymismuodot on luokiteltu kappaleeksi, esimerkiksi, taulukoksi, kuvaksi, ekstraksi ja korostavaksi. *Kappaleella* tarkoitetaan, että asia tulee ilmi tekstikappaleen sisällä. *Esimerkki* on yleensä laskuesimerkki. *Extralla* tarkoitetaan kirjassakin erikseen mainittua extra-kappaletta. *Korostava* teksti on hyvin esillä oleva, yleensä erillisessä laatikossa oleva, huomioitava teksti. *Yhteydellä* viitataan puolestaan fysiikan ilmiöön, jonka yhteydessä mikroskooppista lähestymistä hyödynnetään. Kurssin vaihe tarkoittaa oppikirjan lukua, jossa asiat esiintyvät.

## 6.2 Oppikirjojen sisältö

Lukion lämpöopin sisältöön kuuluu termodynaamisten ilmiöiden lisäksi mekaniikasta tutut aiheet: työ ja energia, jotka on yleensä sisällytetty oppikirjojen ensimmäiseen lukuun. Työ ja energia ovat tärkeitä fysikaalisia käsitteitä myös lämpöopin alueella. Kuten muistamme, lämpö on verrattavissa työ-käsitteeseen ja se on termodynaamisessa prosessissa siirtyvää energiaa. Paine esitetään oppikirjoissa usein myös erillisessä luvussa. Paine on tärkeä tilanmuuttaja tutkittaessa kaasujen termodynaamisia prosesseja. Olen kuitenkin rajannut paineen ja työ-käsitteen oppikirja-analyysini tarkastelun ulkopuolelle, koska paine on käsitteeltään hyvin erilainen kuin lämpökäsite ja työn käsite kuuluu varsinaisesti mekaniikkaan. Viimeisenä lukuna oppikirjoissa esiintyy energiavaroihin liittyvää pohdintaa ja fysiikkaa, jossa ei ole tarpeellista käyttää lämmön mikrotason mallia. Kokonaisuudessaan oppikirja-

analyysistäni jäävät pois oppikirjojen ensimmäiset ja viimeiset luvut sekä puhtaasti painetta käsittelevät osiot.

### **Physica**

WSOY:n kustantaman Physica-kirjasarjan lämpöoppi on jaettu kahdeksaan lukuun, joista neljä käsittelee erityisesti lämmön fysikaalisia ilmiöitä. Kirjassa määritellään ensin lämpöopin peruskäsitteitä, minkä jälkeen esitellään lämmön kolme eri siirtymistapaa. Kolmantena pääaiheena ovat kaasujen tilanyhtälöt, johon sisältyy lämmön kineettinen malli. Vasta kuudennessa luvussa esitetään lämmön määritelmä, jonka lisäksi tutustutaan lämpökapasiteettiin sekä aineen olomuotoihin. Lämpöä käsittelevien lukujen viimeisenä aiheena esitellään lämpöopin pääsäännöt (Hatakka et al. 2005).

### **Fysiikka**

Tammen kustantaman Fysiikka-kirjasarjan sisältö on pääosin hyvin samankaltainen kuin Physica-sarjan. Fysiikan lämpöoppi on kuitenkin jaettu suurempiin kokonaisuuksiin, joten lukuja on vain kuusi, joista erityisesti lämpöä käsitteleviä lukuja on neljä. Aluksi on esitelty lämpöopin peruskäsitteistä lämpötila ja termodynaaminen systemi yhdessä paineen kanssa. Lämpölaajeneminen ja lämmön kineettinen malli on yhdistetty samaan lukuun. Tämän jälkeen käsitellään aineen olomuotojen fysiikkaa. Laajaan viimeiseen lämpöä käsittelevään kappaleeseen on sisällytetty lämmön määritelmä ja lämpökapasiteetti, joista edetään lämpöopin pääsääntöihin sekä lämmön siirtymismuotoihin (Lehto et al. 2005).

### **Fotoni**

Otavan Fotoni-kirjasarja edustaa valikoiman perinteisintä linjaa. Tietosisällöltään kirja on selkeästi edeltäjiään laajempi. Sen sisältöön kuuluu myös sellaista syventävää tietoa, jota ei yleensä vielä lukiokursseihin sisällytetä. Oppikirja on jaettu seitsemään osaa, joista lämpöilmiöitä käsittelee viisi lukua. Kirja alkaa lämpöopin peruskäsitteistä. Fysiikka-kirjasarjan tapaan paine on sisällytetty tähän osioon. Tämän jälkeen käsitellään aineiden tilanyhtälöitä kahden luvun verran, minkä jälkeen vuorossa ovat aineen olomuodot. Vasta kuudennessa luvussa esitetään lämmön määritelmä ja selitetään siihen liittyvät fysiikan periaatteet kuten lämpöopin pääsäännöt. Fotoni-kirjasarja eroaa sekä rakenteellisesti että sisällöllisesti analyysin muista oppikirjoista (Eskola et al. 2000).

## **6.3 Yleiset lähestymistavat**

### **Physica**

Oppikirja sisältää paljon värikkäitä kuvia ja on ulkoisesti viihdyttävä, mutta oppikirjan lähestymistapa on kuitenkin pääosin teoreettinen. Fysiikan käsitteet ja mallit esitetään tiiviisti ja käytännönläheisiä esimerkkejä on melko vähän. Kirjassa esiintyy muutaman aiheen osalta ”tutki & kokeile” -osioita, joissa tutustaan ilmiöihin kokeellisin keinoin. ”Tutki & kokeile” -osiot vastaavat Fysiikka-kirjasarjan oppilastoita. Physica-kirjasarjassa niitä esiintyy harvemmin ja ne ovat laajuudeltaan suppeampia. Mainittavana lisänä oppikirjassa esiintyy kuvia tai kuvasarjoja kokeellisen työn etenemisestä vaihe vaiheelta.

Oppikirjan ulkoasu on jossain määrin viihdyttävä sen selkeyden kustannuksella. Kuvat ja kaaviot jäävät osittain enemmän koristeiksi kuin opetusta tukevaksi materiaaliksi. Muutenkin osa tekstikappaleista on epäselvästi jäsennelty, jolloin tärkeää tietoa saattaa jäädä lukijalta huomaamatta. Kappaleiden ydinasiat on kuitenkin erittäin hyvin tiivistetty ja esitetty tekstin loppuksi. Lukujen otsakkeet ovat hyvin valittuja, ja niissä tulee ytimekkäästi esille lukujen pääasiat. Kirja sisältää runsaasti laskuesimerkkejä, jotka ovat selkeästi ja perusteellisesti esitetty kappaleiden loppuksi.

## **Fysiikka**

Oppikirjaan on valittu varsin selvästi kokeellinen lähestymistapa. Ilmiöt esitellään oppilastöiden kautta. Oppilastöissä käsitellään yksinkertaisia asioita ja ilmiöitä jokapäiväisestä elämästä, ja niitä voidaan helposti tarkastella tai tutkia luokkahuoneessa. Oppilastyöt johdattavat oppilaan ajatukset käytännön kautta teoreettisiin käsitteisiin ja malleihin, ja niistä tehtyjen johtopäätösten avulla oppikirjan teksti etenee luontevasti fysiikan käsitteiden määritelmiin ja teoreettisiin malleihin. Yleensä vasta kappaleiden loppupuolella esitetään käsitteisiin kuuluvat matemaattiset kaavat sekä niihin liittyvien suureiden yksiköt.

Viimeisenä luvuissa on selkeästi esitetty aiheeseen liittyvät laskuesimerkit, joita kirjassa esiintyy kokonaisuudessaan hyvin vähän. Toisaalta tämä voi olla hyvä linjaus, koska lukion fysiikan tehtävissä ja kokeissa korostuvat liiankin usein laskut, mikä voi antaa oppilaille väärän kuvan fysiikasta tieteenä. Fysiikka on empiiristä ja teoreettista luonnon ilmiöiden tutkimusta. Laskuesimerkkien sisällön jätän tarkastelematta analyysissäni, koska ne eivät sisältäneet mikroskooppista lähestymistä asiaan. Mielestäni kirjan oppilastyöt ovat laajuudeltaan sopivia toteutettaviksi oppitunneilla. Lisäksi konkreettiset esimerkit valaisevat sopivasti esillä olevaa ilmiötä, minkä pohjalta on hyvä lähteä rakentamaan teoreettista mallia. Toisaalta kirjan tekijä olettaa monessa yhteydessä, että oppilastyöt käydään oppitunnilla opettajajohtoisesti läpi. Esimerkiksi teoriaosuudessa sekä laskuesimerkeissä viitataan monesti oppilastöihin.

Tyyllillisenä epäkohtana kirjassa on sen teoriaosan epäselvä esitystapa, jossa teorian ydinkohdat jäävät muun kerronnan taustalle. Vain kaavat sekä muutama perusperiaate tuodaan korostetusti esille. Fysiikan historiaa käsittelevät lisäkappaleet ovat mukava lisä.

## **Fotoni**

Oppikirjassa perehdytään asioihin fysiikan arkisten ilmiöiden kautta hyvin laajasti. Kirjassa esitellään paljon eri fysiikan ilmiöihin liittyviä sovelluksia, mikä saattaa olla osalle oppilaista mielenkiintoista ja motivoivaa. Oppilas johdatellaan teoreettisiin käsitteisiin mallitöiden avulla, joissa kokeellisten töiden mittaukset, laskut ja kuvaajat on jo valmiiksi ratkaistu ja esitetty. Näin ollen oppilaan ei välttämättä tarvitse itse tehdä kokeellista työtä, vaan hän voi todeta niiden toimivuuden suoraan kirjan esimerkkien perusteella. Tällainen tarkastelu on ajankäytöllisesti edullista, mutta oppilaiden olisi kuitenkin tärkeää päästä itse kokeilemaan käytännössä teorian toimivuutta. Kokeellista tutkimusta ei voi oppia ilman käytännön kokemusta. Kirjan esitystapa on joka tapauksessa mielenkiintoinen ja muista kirjoista poikkeava. Kokeellisuus ja teoria on yhdistetty toisiinsa, ja siten kokeellisuuden rooli teoriaa rakentavana tutkimusmenetelmänä korostuu. Toisaalta kirjan sisältö kasvaa tämän vuoksi turhankin laajaksi.

Teoriaosuus mallitöineen esitetään pitkinä kappaleina, eikä ydinasioita mielestäni korosteta riittävästi. Fysiikka-kirjasarjan tapaan vain kaavat ja peruseriaatteet ovat korostettuja. Kirjan ulkoasu on edeltäjiään kuivempi, tekstisisältöä on runsaasti. Lisätietoa asioista tarjotaan selvästi edeltäjiään enemmän. Syventävät kappaleet sisältävät osittain korkeakoulutasoista fysiikkaa, eikä oppilaille ole lähtökohtaisesti valmiuksia sisäistää kaikkea tarjolla olevaa tietoa. Syventävät kappaleet tarjosivat kuitenkin mielenkiintoista ja hyödyllistä lisätietoa asioista. Hyvänä esimerkkinä on aineen hiukkasmallia käsittelevä kappale, jonka ymmärtäminen vaatii hiukkasmallin laajaa ymmärtämistä. Mielestäni kirjan muu hiukkasmallia koskeva esitys jää hyvin valjuksi ilman tätä syventävää kappaletta. Laskuesimerkkejä on kohtuullisen paljon, mutta ne on esitetty sekalaisesti kappaleiden keskellä tai lopuksi ja muutenkin niiden esitystapa on muihin kirjasarjoihin nähden epäselvä. Kirjan vahvuutena on sen monipuolisuus mutta heikkoutena ydinasioden puutteellinen korostaminen.

## 6.4 Mikrokooppisen lähestymistavan esiintyminen

Oppikirjoissa aineen hiukkasmallia koskevaa tietoa esiintyy eri tavoin ja eri asiayhteyksissä. Yhtenä mielenkiinnon kohteena oppikirja-analyyseissäni on hiukkasmallia koskevan teorian esiintymisjärjestys. Missä vaiheessa oppikirjaa otetaan ensimmäistä kertaa esille lämmön hiukkasmallia koskeva käsitys, jota kutsutaan myös hieman suppeammin lämmön kineettiseksi malliksi? Miten usein, ja missä eri asiayhteyksissä se tulee esille? Keskittyykö sen käyttö vain tiettyihin kappaleisiin tai kirjan alku-, keski- tai loppuosaan? Samalla kun käyn läpi kaikki mikrotason esitykset niiden esiintymisjärjestyksessä, pohdin myös hieman niiden sisältöä ja perusteita. Erityisesti kiinnitän huomiota esille nouseviin epäkohtiin.

### Physica

Lämpöopin käsittely alkaa lämpöopin käsitteillä, joista erityistä painoa on käsitteillä lämpötila, lämpö, termodynaaminen tila sekä sisäenergia. Erillisessä alaluvussa nostetaan esille mikro- ja makromallit. Siinä selitetään konkreettisin esimerkein nämä kaksi eri tapaa lähestyä lämpöopin ilmiöitä ja niiden välinen yhteys tuodaan hyvin esille: ”Atomilla ei ole lämpötilaa eikä painetta, mutta mikrokooppisten rakenneosien ominaisuuksilla voidaan selittää nämä makrotason ominaisuudet”. Mikro- ja makrotasojen erosta on laadittu myös selitystehtävä esimerkkitehtäväksi. Nykyisten fysiikan opetuskäsityksien mukaan oppilailta tulisikin vaatia enemmän ymmärrykseen pohjautuvia selityksiä kuin perinteisesti arvostettuja laskennallisia taitoja. Laskutehtävät olisi hyvä suunnitella siten, että niiden ratkaiseminen vaatii myös fysiikan periaatteiden ymmärtämistä. Lämpöopissa tämä tarkoittaisi usein mikrotason mallin periaatteiden ymmärtämistä. Kyseinen kirjan tehtävä oli kuitenkin ainut laatuaan, eikä vastaavanlaisia esimerkkejä esiintynyt myöskään muissa analysoiduissa oppikirjoissa.

Mikro- ja makromalleja hyödynnetään heti sisäenergian määrittelyssä. Sisäenergian muutos esitetään korostetusti sekä makro- että mikrotasolla. Lisäksi asiayhteydessä mainitaan, että systeemin rakenneosien liike on etenevää, pyörivää ja värähtelevää, mikä on jatkoa ajatellen tärkeää. Oppilaiden oletetaan selvästi tunnevan jonkin verran aineen rakenneosiin liittyvää fysiikkaa, sillä asiaa ei tarkastella kovinkaan syvällisesti.

Välttämättömin eli lämpöliikkeen luonne tulee aikaisin esille toisin kuin Fysiikka-sarjassa.

Oppikirja määrittelee lämpöenergian ja lämmön hienovaraisesti: ”Mikrotasolla sisäenergian sitä osaa, jonka muodostaa rakenneosien liike-energia, kutsutaan systeemin lämpöenergiaksi. Makrotasolla, jolloin tarkastelun kohteena on koko kappale, eikä sen mikro-osat, lämpöenergiaa ei voida määritellä. Lämpötilaerojen takia kahden systeemin välillä voi siirtyä energiaa. Tätä siirtyvää energiaa kutsutaan lämmöksi”. Kirjassa esitetty määritelmä lämmölle onkin hyvä ja täsmällinen. Jatkona kyseiselle kappaleelle on laaja taulukko, joka sisältää kuvia mikroskooppisista tasoista, lämpöopin käsitteet sekä niiden mikroskooppiset että makroskooppiset selitykset. Tämä on ehdottomasti paras näkemäni esitys lämpöopin käsitteistä. Taulukon anti on ytimekäs, selkeä, laaja ja havainnollistava. Lisäksi taulukon kuvatekstissä kerrotaan asian ydin: ”lämpöopissa makrotason malli kuvaa ilmiöitä ja mikrotason malli selittää niitä.

Lämpöopin käsitteiden jälkeen vuorossa ovat lämmön siirtymistavat. Näistä lämmön johtuminen selitetään lyhyesti aineen rakenneosasten värähtelyn avulla. Kirjassa on myös kuva kylmän ja kuumen veden sekoittumisesta. Valitettavasti kuva on pelkistetty siten, että vesimolekyylit ovat esitetty toisistaan irrallisina, ja lisäksi kuumen veden molekyylit näyttävät liikkuvan kuvassa samalla nopeudella (pitempi nuoli) kuin kylmän veden molekyylit (lyhyempi nuoli). Esityksestä muodostuu harhaanjohtava kuva kylmistä ja kuumista molekyyleistä, jotka liikkuvat eri nopeuksilla. Oppilaille olisi tärkeää painottaa, että lämpötiloissa on kyse suurten molekyyliryököjen keskimääräisistä nopeuksista. Yksittäisten molekyylin nopeudet eroavat toisistaan reilusti, vaikka makroskooppisesti mitattuna niistä muodostuu sama lämpötila.

Aineen lämpölaajeneminen voidaan kuvata mielenkiintoisella tavalla aineen hiukkasmallin avulla. Oppikirjat eivät jostain syystä kuitenkaan pyri tekemään näin. Kirjat luottavat enemmän kokeellisuuteen ja käytännön esimerkkien kuvailuun. Physica käsittelee teoreettisessa osuudessa lämpölaajenemista ensin yleisesti. Mikroskooppista lähestymistä käytetään tekemään konkreettisesti ero eri olomuotojen ominaisuuksien välille. Molekyylin liike ja niiden väliset vuorovaikutukset mainitaan lyhyesti eikä kirjassa selitetä tarkemmin aineen rakenneosasten käyttäytymistä pituuden ja tilavuuden lämpölaajenemisessa.

Kirjan viides luku käsittelee kaasun tilanyhtälöitä eli kaasulakeja. Luvun aluksi määritellään lyhyesti ideaalikaasumalli, jonka mukaan sen atomit ovat pistemäisiä, eikä niiden välillä vaikuta muuta kuin törmäysten aikaisia vuorovaikutuksia. Vasta kun tilanyhtälöt on täysin käsitelty, käydään kirjassa läpi kineettinen kaasuteoria, joka selittää kyseiset kaasulait. Kirjassa on jo aiemmin selitetty lämpöilmiöitä aineen rakenneosasten liikkeen avulla, mutta vasta tässä vaiheessa selitetään eri olomuodoissa olevien aineiden lämpöliike. Selitys on kattava ja täsmällinen ja lisäksi typpikaasun molekyylin etäisyyksiä havainnollistava kuva vahvistaa hyvin kaasun molekyylin ”vapaan” liikkeen ymmärtämistä.

Luvussa käsitellään myös tarkemmin ideaalikaasun ja reaalikaasun erot mikroskooppisella tasolla. Parasta kappaleessa ovat kuitenkin kaasulakien mikroskooppiset selitykset, jotka on jäsenelty selvästi ja esitetty ytimekkäästi. Oppilas kaipaa juuri tällaista selittävää tietoa, jonka avulla hän voi jatkossa itse päätellä,

minkälaisia prosesseja kaasuihin liittyy. Selitykset pohjautuvat ideaalikaasumalliin. Reaalikaasujen rakenneosat eivät käyttäydy aivan vastaavanlaisesti, joten reaalikaasujen makroskooppiset prosessit poikkeavat hieman kaasulaeista.

Ekstra-kappaleessa on esitetty matemaattisesti kaasumolekyylin keskimääräisen liike-energian ja lämpötilan yhteys sekä ideaalikaasun sisäenergia. Kappaleeseen kuuluu lisäksi laskuesimerkki sekä kaasumolekyylien tyypillinen jakauma matalassa ja korkeassa lämpötilassa. Mielestäni oppilaiden on hyvä kohdata tämänkaltaisia laskuja, sillä ne vahvistavat heidän käsityksiään rakenneosasten liikkeen nopeuksien ja lämpötilan sekä sisäenergian välisistä riippuvuuksista eli mikroskooppisten ja makroskooppisten ilmiöiden välisistä riippuvuuksista.

Lämpöä ja sen vaikutusta aineen olomuotoihin käsitellään kirjan kuudennessa kappaleessa. Alussa lämpö käydään läpi siirtyvänä energiana, minkä jälkeen käsitellään lämpökapasiteetti. Mikroskooppinen lähestyminen nousee esille aineen olomuotojen yhteydessä. Latenttilämpö on vanhahtava nimitys aineen olomuodon muutokseen liittyvästä entropian muutoksesta. Nimitystä käytetään edelleen, mutta kuvaavampi vastine voisi olla olomuodonmuutoslämpö. Kirjassa mainitaan kummatkin. Kirjassa kerrotaan, että sana latentti tarkoittaa piilevää, ja koska olomuodonmuutos ei näy lämpenemisenä, on energia ”piilossa” aineen rakenneosien energiana. Nykyään aineen rakenneosasten väliset vuorovaikutukset tunnetaan hyvin, mutta kirjan tekijät ilmeisesti olettavat, etteivät oppilaat tunne aineen hiukkasmallia, jolloin on syytä korostaa ”piilevää” energiaa.

Kappaleen lopuksi käsitellään olomuodonmuutoksen mikroskooppinen malli täydentävän kuvan kera. Selitys on välttävä, mutta aineen mikroskooppista mallia voitaisiin hyödyntää kattavammin. Esimerkiksi höyrystymistä ja sulamista voitaisiin käsitellä erillisinä prosesseina mikroskooppisella tasolla. Höyrönpaineen ja haihtumisen yhteyteen on lisätty kuvia, jotka eivät kuitenkaan havainnollista riittävästi ilmiöitä. Kuvatekstit sen sijaan antavat tarpeellista täydentävää tietoa.

Kirjan viimeisessä lämpöoppia käsittelevässä luvussa pääaiheena ovat lämpöopin pääsäännöt eli termodynamiikan lait. Sisäenergian luonne todetaan alkuvaiheessa sekä mikroskooppisesti että makroskooppisesti. Sama asia on ilmaistu heti perään korostetusti täysin samoin sanoin: ”Sisäenergia on rakenneosasten liike- ja potentiaalienergiaa”. Lämpöopin ydinkäsitteistä viimeisenä esitellään entropia. Mikroskooppisessa lähestymisessä systeemin järjestyksen astetta verrataan mikroskooppisten rakenteiden järjestykseen, mikä on hyvin havainnollistettu myös jääpalan rakenneosasten järjestystä esittävässä kuvassa. Lämpöopin toista pääsääntöä havainnollistaa myös kuvasarja väriaineen sekoittumista vesilasiin. Kuvasarja vastaa Fysiikka-kirjasarjan oppilastyötä samasta aiheesta.

Entropian yhteydessä kirjassa kerrotaan myös energian huononemisesta. Aihetta kuvaa pallon pomppiminen, jossa systeemin sisäenergian muutos liittyy lattian lämpöliikkeen lisääntymiseen. Kuvaus on osuva, koska se on sekä fysikaalista ymmärrystä kehittävä että ilmiötä havainnollistava esimerkki. Lisäksi kuvaukseen yhdistyy mikroskooppinen lähestyminen aivan uudella tavalla. Samanlaisen esimerkin voisi esittää myös kitkan aiheuttamasta lämmöstä. Entropian jatkoksi mahdoton prosessi on selitetty rakenneosasten lämpöliikkeen satunnaisuudella. Olisi äärimmäisen

epätodennäköistä, että lattian rakenneosasten lämpöliike olisi hetkellisesti samansuuntainen ja aiheuttaisi siten levossa olevan pallon ylös lentämisen.

Physica-kirjasarjan lämpöoppi on sekä ulkoisesti että sisällöllisesti moderni. Mikroskooppisen lähestymisen tarjoavia selityksiä on normaalia enemmän, tosin ne ovat sisällöltään melko suppeita. Mikrotason selityksiä esiintyy tasaisesti eri ilmiöiden yhteyksissä, mutta Fysiikka-kirjasarjan tapaan se on joissakin tärkeissä asiayhteyksissä kokonaan unohdettu. Kirjassa mikroskooppinen malli esitetään aina kappaleiden lopuksi. Tämä järjestely on hyvä siinä mielessä, että selitykset ovat yleensä ytimekkäitä, johdonmukaisia ja hyvin jäsenneiltyjä. Jos selitykset esiintyisivät muun teorian ohella, saattaisi tieto olla vaikeasti havaittavissa. Toisaalta tästä välittyy piiloviesti, että mikroskooppisella mallilla on vähemmän arvoa kuin muulla tiedolla. Mikroskooppista lähestymistä ei korosteta riittävästi, eikä ilmiöiden esittely tai käsittely perustu siihen. Historiallisesta näkökulmasta tämä on hyvin ymmärrettävää, koska olemme tottuneet käsittelemään lämpöopin ilmiöitä puhtaasti makroskooppisina. Käsitämme mikrotason fysiikan jonain muuna kuin klassisena lämpöoppina.

Huomioitavaa kirjassa on se, ettei mikroskooppista mallia ole liiaksi rajattu kineettisen kaasuteorian yhteyteen. Lämpöliikkeen selitys olisi voinut tulla esiin jo kirjan alussa, koska siihen viitattiin kirjan alusta saakka monessa asiayhteydessä. Lämpöliike ei ole pelkästään osa kineettistä kaasuteoriaa, vaan sen avulla voidaan yleisesti selittää lämpöopin ilmiöitä. Parasta Physica-kirjasarjan lämpöopissa on sen tapa tuoda lämpöopin ydinasiat ytimekkäästi ja johdonmukaisesti esille, mikä tulee ilmi myös mikroskooppisen lähestymisen osalta.

## **Fysiikka**

Mikroskooppinen lähestyminen esiintyy ensimmäistä kertaa heti toisen luvun alussa lämpötilan yhteydessä. Lämpötila ja absoluuttinen nollapiste ovat määritelty aineen rakenneosasten liikkeen avulla. Kolmannessa luvussa veden suurimman tiheyden yhteydessä mainitaan vesimolekyylien järjestäytyminen: ”...vesimolekyylit ryhmittyvät vähemmän tilaa vievään järjestykseen”. Maininta tulee vasta sen jälkeen, kun lämpölaajenemisen teoria on jo täysin käsitelty.

Tämän jälkeen mikroskooppinen malli nousee esille kineettistä kaasuteoriaa käsittelevässä kappaleessa ideaalikaasun yhteydessä. Kineettinen kaasuteoria perustuu ideaalikaasuun, joka on idealisoitu malli luonnossa esiintyvistä kaasuista siten, että sen termodynaamisia ominaisuuksia on helppo tarkastella. Ideaalikaasu ei siis liity suoraan lämmön kineettiseen malliin. Niinpä mikrotason lähestyminen tässä yhteydessä tarkoittaa ideaalikaasun mikroskooppisen rakenteen määrittelyä.

Usein oppikirjat vertaavat ideaalikaasun ja luonnossa esiintyvien kaasujen eroja aineen hiukkasmallin avulla, mikä tuokin hyvin esille ideaalikaasun mallin periaatteet. Ilman aineen hiukkasmallia on mahdotonta selittää ideaalikaasun ja luonnossa esiintyvien kaasujen fysikaalisia eroja. Aineen hiukkasmallin esiintyminen ideaalikaasun yhteydessä luo oppilaille käsitystä aineen hiukkasmallista, mutta ehkä hieman epäoleellisessa asiayhteydessä lämpöä ajatellen. Fysiikka-kirjasarja käy reaalikaasun ja ideaalikaasun erot läpi perusteellisesti sekä makroskooppisesta että mikroskooppisesta näkökulmasta. Samassa yhteydessä mainitaan uudestaan myös lämpötilan kineettinen tulkinta.

Aineen olomuotoihin liittyvä fysiikka voidaan esittää havainnollisesti ja loogisesti hiukkasten lämpöliikkeen avulla. Oppikirjoissa mikroskooppista lähestymistä hyödynnetäänkin kiitettävän paljon aineen olomuotojen muutosten kuvauksissa ja selityksissä. Fysiikka-kirjasarja ei ole poikkeus. Mikroskooppinen lähestyminen tulee jo heti aluksi esille, ja oppikirjan tarjoama asiasisältö on riittävän laaja ja täsmällinen. Selityksen tukena on lämpöliikettä havainnollistava kuva. Kappaleen lopussa esiintyy myös kuva Brownin liikkeestä. Harmittavasti kuva ja siihen liittyvä kuvateksti ovat vaikeasti ymmärrettäviä.

Nesteen haihtumisen yhteydessä kirjassa mainitaan molekyylien irtoaminen nesteen pinnalta. Samaan aiheeseen liittyen kriittinen piste selitetään aineen molekyylien avulla. Kun lämpötila nousee yli kriittisen pisteen, ei kaasua saada enää nesteytettyä puristamalla sitä kokoon. Tämä johtuu siitä, että molekyylien kineettinen energia on niin suuri, etteivät molekyylien väliset vetovoimat kykene sitomaan niitä toisiinsa. Aineen olomuotojen ja siihen liittyvien ilmiöiden yhteydessä kirja hyödyntää kokonaisvaltaisesti mikroskooppista lähestymistä niin, että se kulkee koko ajan rinta rinnan muun teorian kanssa.

Kirjan viides luku on nimeltään ”Lämpö on energiaa”. Kappale ei ole väärin nimetty, mutta siitä saattaa oppilaille syntyä heti väärä kuva lämmön luonteesta kuten jo olemme todenneet väärinkäsityksiä käsittelevien tutkimuksien perusteella. Luvun ensimmäisessä kappaleessa onneksi jo korostetaan: ”Lämpö  $Q$  on energiaa, joka siirtyy lämpötilaeron vuoksi systeemistä toiseen”. Lämpö on siis siirtyvää energiaa kuten työ ja se voi muuttaa energian muotoa. Kirja ilmaisee lämmön mikroskooppisen määritelmän heti seuraavaksi: ”Lämpö on aineen rakenneosasten liike-energiaa, joten se on myös yksi energiamuoto”. Lauseessa sekoittuvat jälleen harhaanjohtavasti käsitteet lämpö ja lämpöenergia. Rakenneosasten liike-energiaa kutsutaan lämpöenergiaksi, joka on osa systeemin sisäenergiaa. Lämpö puolestaan siirtää lämpöenergiaa kuten työ siirtää mekaanista energiaa. Lämmön voi ymmärtää mikrotason ilmiönä, mutta sitä on hyvin vaikea määritellä hiukkasmallin mukaisesti.

Lämpökapasiteetin ja ominaislämpökapasiteetin jälkeen kirjassa kerrotaan ominaissulamislämmöstä, jonka yhteydessä esille nousee sama mikroskooppinen selitys kuin jo aikaisemmin aineen olomuotojen yhteydessä. On kuitenkin tärkeää, että asia esille mahdollisimman monen eri fysiikan käsitteen yhteydessä, koska tämä vahvistaa oppilaiden käsityksiä mikrotason mallista lämpöopin ilmiöitä selittävänä mallina.

Sisäenergia on termodynamiikan käsitteistä hankalimpia. Mikroskooppinen näkökulma tekee siitä kuitenkin jonkin verran konkreettisemmän käsitteen. Fysiikka-kirjasarjassa mikroskooppinen näkökulma tarjotaan heti oppilastyön ja siihen liittyvien esimerkkien jälkeen. Jälleen kerran selitys on hyvin niukka, ei edes kuudesosaa kappaleesta. Lisäksi jonkinlaista havainnollista kuvaa sisäenergian mikroskooppisesta luonteesta jää kuitenkin kaipaamaan.

Entropia on abstrakti käsite, joka ilman sen mikroskooppista selitystä jäisi vaille perusteellista selitystä kuten myös termodynamiikan toinen laki. Mikroskooppinen lähestyminen antaa selityksen havainnoille, jonka 1700- luvun fyysikot tekivät, tai käsitteelle, joka nousi esiin Clausiuksen johtamassa matemaattisessa kaavassa. On siis



perusteltua, että näiden määritelmien opetuksessa on otettava mikroskooppinen maailma huomioon.

Verrattuna muihin Fysiikka-kirjasarja onnistuu entropian mikrotason esityksessä mielestäni heikokosti. Mikroskooppiseen malliin viitataan kokeellisessa työssä selittämättä kunnolla sen merkitystä. Teoriaosuus on puolestaan makroskooppisten määritelmien valtaama. Oppilastyössä otetaan esille sinisen kuparisulfaattiliuoksen sekoittuminen vettä sisältävään astiaan ja kerrotaan ionien jakautumisesta kyseisessä prosessissa. Koe havainnollistaa konkreettisesti entropian luonnetta, mutta sen yhteys lämpö-käsitteeseen jää hämäräksi. Myöhemmin kirjassa todetaan, että ”mikroskooppisen pieni osa ainemäärästä (atomeista) saattaa hetkellisesti rikkoa toista pääsääntöä, koska se ilmaisee tapahtumien todennäköisen kulun”. Tapahtumien todennäköinen kulku tulee mikroskooppisista poikkeamista huolimatta ilmi makroskooppisessa maailmassa. Entropian mikroskooppista luonnetta ei mainita, eikä aiheesta esitetä havainnollistavia kuvia.

Viimeisenä lämpöä käsittelevistä aiheista on lämmön siirtymistavat. Lämmön johtuminen selitetään lyhyesti mikrotason mallin mukaisesti rakenneosasten värähtelyllä ja värähtelyn etenemisellä aineessa. Tämä on ensimmäinen kerta, kun rakenneosasten värähtely mainitaan oppikirjassa. Oppilaat eivät välttämättä osaa yhdistää värähtelyä lämpöliikkeeseen tai ymmärtää värähtelyn etenemistä. Aaltoliike ja värähtely käsitellään vasta seuraavalla lukiokurssilla.

Oli positiivista huomata, että Fysiikka-sarjan lämpöopin oppikirja tarjoaa mikroskooppisen lähestymisen laaja-alaisesti käsittäen oleellisesti koko kurssin sisällön. Valitettavasti selitykset ovat usein hyvin lyhyitä, hieman puutteellisia ja tyyliään toteavia. Selitykset on sijoitettu pääosin kappaleiden loppuosiin muun tekstin jatkoksi. Kirjan ydinajatuksukset ovat selvästi makroskooppisia, ja mikroskooppiset näkökulmat jäävät väkisin niiden varjoon. Lukija ei osaa välttämättä arvostaa mikroskooppisten selitysten tärkeyttä.

Mitään oppikirjan mikrotason selitystä ei voi kutsua tyhjentäväksi. Monipuolisin esitys tulee ideaalikaasun yhteydessä, joka ei kuitenkaan liity suoraan lämpöilmiöihin. Tuntuu siltä, että oppikirjan tekijä olettaa oppilaan jo ennestään tuntevan aineen hiukkasmallin, joten kirjassa tyydytään vain mainitsemaan sen ja lämpöilmiöiden välinen yhteys. Aineen rakenneosasten liike ja kineettinen energia mainitaan usein, mutta missään vaiheessa ei käydä läpi, minkälaista rakenneosasten liikettä on olemassa tai minkälaiset sidokset pitävät niitä koossa. Luotetaanko liaksi siihen, että oppilaat oppivat tuntemaan nämä asiat kemian tunneilla?

## **Fotoni**

Fotoni-kirjasarja lähtee liikkeellä lämpöopin peruskäsitteistä, mutta muista kirjoista poiketen kirjassa käytetään ilmaisuja termodynaaminen tila ja termodynaaminen systeemi. Kirjan alku on vaikeaselkoinen ja heti ensimmäinen mikroskooppisen tason kuvaus on harhaanjohtava. Kirjassa sanotaan: ”...energian tasanjakaantumisen periaatteen mukaan systeemin kaikki molekyylit jakavat energiansa keskenään törmätessään siten, että niille kaikille tulee sama keskimääräinen energia eli myös lämpötila”. Tasanjakaumaperiaatteen eli ekvipartitioperiaatteen mukaan näin voidaan ajatella, mutta yksittäisillä molekyyyleillä ei ole lämpötilaa. Tasanjakaumaperiaatteen

mukaan yksittäisen molekyylin keskimääräinen energia riippuu vallitsevasta lämpötilasta, joka on makroskooppinen suure. Koska oppilaat eivät ole tutustuneet tasanjakaumaperiaatteeseen, asia ymmärretään helposti väärin siten, että yksittäisillä molekyyileillä olisi todellisuudessa keskenään sama energia ja näin ollen myös sama nopeus.

Seuraavaksi kirjassa käsitellään paineeseen liittyvää fysiikkaa sekä lämpötilakäsittettä. Lämpötilan mikroskooppista mallia ei kuitenkaan edes mainita, vaikka kirja käsittelee lämpötila-asteikkojen historiaa ja lämpötilan mittaamista hyvin laajasti.

Kolmannen luvun aiheena ovat kiinteän aineen ja nesteen tilanyhtälöt. Lukuun on sisällytetty myös pituuden ja tilavuuden lämpölaajeneminen. Luvun alussa lämpölaajeneminen on selitetty mikroskooppisella tasolla epätasällisesti: ”Kiinteän tai nestemäisen aineen lämpölaajeneminen johtuu aineen atomien ja molekyylien liikkeestä. Lämpimämpi molekyyli liikkuu tai värähtelee nopeammin kuin kylmä ja näyttää sen takia ulospäin suuremmalta, eli se vaatii tilaa enemmän kuin kylmempänä”. Esitys on hyvin kömpelö ja virheellinen, koska aineen rakenneosalla eli tässä tapauksessa yksittäisellä atomilla tai molekyyllillä ei ole lämpötilaa eikä lämpötilasta riippuvaa tilavuutta. Lämpötila on aineen makroskooppinen ominaisuus, joka voidaan selittää aineen rakenneosasten liikkeen avulla. Atomeilla ja molekyyileillä on tilavuus, mutta lämpölaajeneminen liittyy kiinteän aineen, nesteen tai kaasun makroskooppisen tilavuuden kasvuun, joten se ei vaikuta mitenkään yksittäisen molekyylin tilavuuteen.

Kirjan neljännessä luvussa käsitellään erikseen kaasujen tilanyhtälöt, mihin kuuluu oleellisena aiheena ideaalikaasumalli. Ideaalikaasu esitellään kuitenkin vasta luvun lopuksi. Mikroskooppisella tasolla selitys on tällä kertaa täsmällinen mutta suppea. Luvun lopuksi mainitaan, että asiaan syvennyttään tarkemmin kineettisen kaasuteorian yhteydessä luvussa kuusi.

Viides luku käsittää kokonaisuudessaan olomuodonmuutosten fysiikkaa kuitenkin siten, että olomuodonmuutoksiin palataan vielä kahdessa seuraavassa luvussa. Kirjan rakenteesta kertoo hyvin paljon se, että luvun yksi kokonainen sivu on käytetty kuvailemaan ilmiön esiintymismuotoja luonnossa ja toinen sivu kertomaan olomuodonmuutosten tutkimisen historiaa. Kirjassa käytetään paljon käytännönläheistä lähestymistä fysiikan ilmiöihin, minkä jälkeen siirrytään teoreettisempiin fysiikan malleihin. Tässä luvussa mikroskooppinen lähestyminen tulee esille vain mainintana haihtumisen yhteydessä.

Lämpöenergia on seuraavan luvun pääaiheena, mutta luvussa käsitellään myös aineen olomuodonmuutoksia erityisesti matemaattisin esimerkein. Luvun alussa lämpökäsite kuvataan seuraavasti: ”Nykyisen käsityksen mukaan lämpö on aineen rakenneosasten liike-energiaa ja sellaisena siis yksi energiamuoto. Lämpöenergiasta käytetään omaa tunnusta  $Q$ ”. Kirjan kuvauksen mukaan lämpö ja lämpöenergia ovat merkitykseltään yhtäläisiä. Täsmällisemmin pitäisi sanoa, että mikrotasolla aineen rakenneosasten liike-energia on se sisäenergian osuus, jota kutsutaan lämpöenergiaksi. Lämpö puolestaan on siirtyvää energiaa. Kirjan esityksen perusteella voidaan todeta, että lämpöä ja lämpöenergiaa ei sekoiteta toisiinsa ainoastaan käsitteinä, vaan niiden mikrotason kuvauksetkin sekoittuvat keskenään. Kirjoissa esiintyy epätasällistä ja ristiriitaista tietoa lämmön luonteesta.

Ominaislämpökapasiteetti on tärkeä käsite lämmön siirtymisprosesseissa, mihin liittyen oppikirjassa on tärkeä mikroskooppisen tason maininta: ”Eri aineiden ominaislämpökapasiteetit vaihtelevat erittäin paljon riippuen niiden molekyyli- ja kiderakenteista”. On kuitenkin valitettavaa todeta, että jälleen kyseessä on vain lyhyt loppumaininta. Mikroskooppisen tason mallia voitaisiin käyttää selittämään käsitteeseen liittyviä fysikaalisia prosesseja laajemmin.

Seuraavan kappaleen alaluvun otsikkona on lämpö ja olomuodot. Kuten muistamme, edellä analysoidut kirjasarjat käyttivät olomuodonmuutosten selityksiin yksittäisistä aihealueista eniten mikroskooppista lähestymistä. Vaikka fotonikirjasarjan teoksessa onkin jo esitelty olomuodonmuutosten fysiikka, ei se kuitenkaan poikkea valtavirrasta. Olomuotojen mikroskooppisen tason selitys on vain jätetty tähän viimeiseen olomuotoja käsittelevään alalukuun. Yllätyksenä kyseessä onkin hyvin kattava kuuden sivun osuus mikrotason lämpöoppia, joka käsittää kineettisen kaasuteorian, reaalikaasun ja Brownin liikkeen.

Luku tarjoaa hyvin laaja-alaisen mikroskooppisen näkökulman lämpöoppiin ja on ehdottomasti kirjan parasta antia tässä suhteessa. Voidaankin kysyä, miksi luku esitetään vasta nyt ja miksi se esitetään nimenomaan olomuotojen yhteydessä. Luku käsittää lämpöliikkeen kuvailun ja lämpötilan mikroskooppisen määritelmän, joten hyvin laajoja osia siitä olisi voitu jakaa jo aikaisempien lukujen yhteyteen. Tällaisenaan lämmön mikroskooppinen tarkastelu jää irralliseksi muusta teoriasta. Yksi kiteytetty luku ei voi millään korvata ilmiöiden kokonaisvaltaista mikrotason kuvailua joka osa-alueella, vaikka periaatteessa siinä tulisivin esille kaikki oleellinen tieto.

Luvusta voidaan poimia muutamia loistavia selityksiä ja määritelmiä. Lämpötilaa koskien kirjassa on seuraavanlainen ytimekäs kuvaus: ”Aineen lämpötila riippuu sen rakenneosasten liikkeestä, jota kutsutaan lämpöliikkeeksi. Se on molekyylien, ionien ja atomien satunnaista liikettä”. Tämän jälkeen aineen eri olomuotoihin liittyvää lämpöliikettä kuvataan tarkasti. Atomi- ja molekyyliarakenteet ja niihin liittyvät vuorovaikutukset käydään läpi, minkä yhteydessä tehdään tärkeä ero makro- ja mikrotasolle: ”...makroskooppiset ominaisuudet ovat suuren molekyylijoukon ominaisuuksien tilastollisia keskiarvoja”. Paikoin kirja sortuu käyttämään oppilaille vielä suhteellisen vieraita termejä kuten energiajakauma ja tilastolliset menetelmät. Luku vaikuttaakin sisällöltään syventävältä luvulta, jonka opettajat mieluusti jättävät oppilaille omatoimisesti opiskeltavaksi. Osittain kirja sivuaa yliopistotason fysiikkaa kuten ilmauksissa: ”Tilastollisessa mekaniikassa lämpötila määritellään energiajakauman muodon avulla.” ja ”Systeemin energia on pienin, kun mahdollisimman monien atomien välimatkat ovat lähellä tasapainoetäisyyttä”. Näin ollen osa tärkeästä mikrotason kuvailusta hukkuu vaikeaselkoisten määritelmien sekaan. Näin käy esimerkiksi absoluuttisen nollapisteen, paineen ja lämpölaajenemisen mikrotason selityksien kohdalla. Luku on hyvä ja täynnä oleellista mikrotason kuvausta. Se pitäisi esittää oppilaiden pohjatiedot huomioiden ja jäsenellä paremmin. Lisäksi sen sisältöä pitäisi jakaa kirjan muihin lukuihin.

Lämpöopin osuus päättyy kirjassa lämpöopin pääsääntöihin. Ensimmäisen pääsääntöön liittyy oleellisesti sisäenergia, jolle kirja antaa täsmällisen mikrotason määritelmän. Erityisen hyvää kirjan esityksessä on se, että kineettinen energia mainitaan erikseen eri lämpöliikkeiden eli rakenneosasten etenemis- pyörimis- ja

värähdysliikkeiden energioina. Lämpöopin pääsääntöjen yhteydessä kerrataan osuvasti lämpötilan mikroskooppinen määritelmä: ”Lämpötila on tilastollinen suure, joka on rinnastettavissa systeemin osien keskimääräiseen kineettiseen energiaan”.

Entropiaa ei ole kuvailtu mikrotasolla yhtä monipuolisesti ja laajasti kuin muissa analysoitavissa oppikirjoissa. Kirjassa entropiaa kuvaillaan tilan todennäköisyytenä, minkä yhteydessä mainitaan entropian olevan myös atomaarisen epäjärjestyksen mitta. Maininta on vaikeatajuinen, joten yksityiskohtaisempi mikrotason tarkastelu ja kuvien käyttö olisi tarpeen. Lämpöopin toinen pääsääntö onkin sitten esitetty kunnolla myös mikrotason mallia hyödyntäen. Lämmön ja mekaanisen energian luonteita verrataan osuvasti: ”Mekaaninen energia on järjestäytyntä energiaa, kun taas lämpöliikkeessä hiukkaset liikkuvat järjestymättömästi kaikkiin suuntiin”. Valitettavasti lämpö erehdytään jälleen esittämään energiana: ”Lämpö on käytön kannalta huonolaatuisempaa energiaa, koska se ei voi itsestään muuttua takaisin mekaaniseksi energiaksi”. Hauskana huomiona kirjan lisäkappaleessa käsitellään toisen pääsäännön historiallista kehitystä ja muun muassa Maxwellin demonia.

Viimeisenä epäkohtana lämmön siirtymistä käsittelevässä lisäkappaleessa on harhaanjohtavasti käytetty mikrotason kuvailua: ”...kuumemmat atomit luovuttavat liike-energiaa kylmemmille, kunnes kaikilla atomeilla on sama energia”. Kuten jo aikaisemmin on mainittu, atomeilla ei ole lämpötilaa, vaan kirjassa kuumemmilla tarkoitetaan nopeammin liikkuvia, värähteleviä tai pyöriviä atomeja. Atomeilla ei näin ollen ole myöskään sama energia.

Fotoni-kirjasarjassa esiintyi huomattava määrä epätasmoista ja jopa väärää tietoa. Lämpö mainitaan kirjassa usein energiaksi. Lukuun ottamatta mainittua syventävää olomuotojen atomirakennetta käsittelevää lukua atomeilla on kirjan mukaan lämpötila, ja lämpölaajeneminen liittyy yksittäisen molekyylin tilavuuteen. Valitettavasti opettajat jättävät usein vaikeina pidetyt syventävät asiat oppilaiden itsenäisesti opiskeltaviksi, jolloin kirjan ristiriitainen tieto vaikeuttaa huomattavasti oppimisprosessia. Kirjan alkupuolella kirjaa mikrotason kuvailua on käytetty hyvin rajallisesti ja valitettavasti valtaosa niistä on esitetty epätasmoisesti tai virheellisesti. Oppilaat eivät voi saada kirjan pohjalta riittävää mikrotason kuvailua lämpöopin ilmiöistä. Suurin osa oleellisesta mikroskooppisesta lähestymisestä tulee esille yhdessä laajassa alaluvussa, jossa asiat on esitetty täsmällisesti. Luvussa ongelmaksi nousevat puolestaan vaikeat ”korkeakoulutason” käsitteet, jäsentelyn puutteet ja luvun laajuus. Yksinkertaisesti sanottuna luku on liian vaikeaa fysiikkaa lukiotasolle. Oppimisprosessia tukisivat paremmin ilmiöiden yhteydessä esitettävät selvät ja ytimekkäät selitykset, joita havainnollistaisi prosessien mikrotasoa esittävät kuvat tai kaaviot. Loppua kohden kirjan mikrotason esitykset paranevat ja ne tukevat aidosti makroskooppisten ilmiöiden ymmärtämistä. Valitettavasti kirjan mikroskooppisen lähestymisen anti on ilman tuota yksittäistä laaja lukua hyvin vähäinen, ja mikrotason selitykset ovat tyyliältään karkean toteavia. Kirja ei onnistu tuomaan esiin lämmön mikroskooppisen luonteen tärkeyttä sen makroskooppisten ilmiöiden selittäjänä.

## 6.5 Mikrotason näkökulmia lämpöopin tärkeisiin aiheisiin

Edellä on käsitelty oppikirjojen sisältöä, yleistä lähestymistä fysiikan ilmiöihin ja käyty läpi kokonaisuudessaan mikrotason esitykset. Analyysi on koskenut pääosin yleisiä piirteitä ja laajaa sisältöä, joten kirjojen välinen vertailu on jäänyt vähäiseksi. Oppikirjojen tietosisältö on runsas, ja vain pieni osa siitä koskettaa mikrotason mallia, mistä johtuen tarkempaa analyysiä varten on syytä valita kirjoista asiasisältö, joka käsittää normaalia enemmän mikrotason kuvailua. Oppikirjojen vertailu on mielekästä vain, jos niiden sisältöä voidaan tarkastella tutkimusten antaman tietämyksen valossa. Nämä asiat huomioonottaen olen valinnut tarkempaan analysointiin seuraavat aiheet: Aineen hiukkasmalli ja olomuotojen rakenne, lämpö ja lämpötila, olomuodonmuutokset, lämmön siirtyminen ja lämpöopin perussäännöt. Aiheiden järjestys perustuu näkemykseni siitä, missä järjestyksessä nämä lämpöopin aiheet tulisi opettaa. Analyysin pohjalta on tarkoitus myös luoda yksinkertaiset sisällölliset opetusmallit mikroskoppisesta lähestymisestä kyseisiin aiheisiin. Opetusmallit perustuvat tutkimuksiin oppilaiden väärinkäsityksistä, lämpöopin opetuksesta sekä oppikirjojen esitystapaan.

## 6.6 Aineen hiukkasmalli ja olomuotojen rakenne

Valtakunnallisen opetussuunnitelman mukaan aineen hiukkasmalli opetetaan vasta lämpöopin jälkeen modernin fysiikan yhteydessä. Peruskoulun fysiikassa käydään pintapuolisesta läpi aineen hiukkasrakennetta. Lukion kemiassa atomin ja molekyylin rakenteet ovat tärkeässä roolissa, koska niiden avulla selitetään kemian reaktioita. Vesi on tärkeä elementti, joka esiintyy fysiikan ja kemian opetuksessa alaluokilta lähtien. Etenkin kemiassa veden ominaisuuksia käsitellään laajasti, ja veden olomuodonmuutokset selitetään jopa mikrotasolla. Onkin outoa, että fysiikan lämpöopin oppikirjat tarjoavat vain vähän mikrotason tietoa aineen hiukkasrakenteesta. Lukion oppikirjojen tekijät saattavat olettaa, että aineen hiukkasrakenne on oppilaille jo entuudestaan tuttu asia, mikä osittain onkin totta. Oppilaat tuntevat atomin ja molekyylin rakenteen. On kuitenkin syytä muistaa, että oppilaat eivät osaa yhdistää aineen hiukkasrakennetta lämpöopin ilmiöihin, ellei sitä erikseen opetuksessa korosteta. Ja vaikka aineen hiukkasrakenne olisikin oppilaille tuttu asia, ei opetuksessa ole vielä käsitelty aineen hiukkasten fysikaalisia ominaisuuksia kuten liikettä, jonka ymmärtäminen on edellytyksenä lämmön kineettisen mallin oppimisille.

Kaikista kolmesta analysoidusta kirjasta puuttui lähes täysin aineen hiukkasrakenteen esittely tai kertaus. Aineen hiukkasmalli nähdään selkeästi lämpöopista erillisinä aiheena tai ainakin vain osana lämmön kineettistä teoriaa. Kineettinen teoria esitetään kirjoissa puolestaan siten, että sillä on vain vähän kiinnekohtaa lämpöopin ilmiöihin. Israelilaisessa termodynamiikan opetusta koskevassa tutkimuksessa todettiin, että aineen hiukkasmallin käsittelyllä ennen muita termodynamiikan aiheita on positiivinen vaikutus oppimistuloksiin (Ma-Naim, Bar, Finkental, 2001). Jos aineen hiukkasmallia halutaan korostaa lämpöopin opetuksessa, olisi ensimmäiseksi hyvä kerrata aineen hiukkasrakenne sekä aineen ominaisuuksia, mistä voitaisiin luonnollisesti jatkaa hiukkasten liikkeen käsittelyyn. Kun oppilailla on mielessään selkeä kuva hiukkasten rakenteesta sekä niiden mahdollisista liikkeistä, on heidän helpompi ymmärtää hiukkasten rooli lämpöilmiöissä.

Oppilaat oppivat varhaisessa vaiheessa aineen kolme olomuotoa eli kaasun, nesteen ja kiinteän aineen, mutta heillä ei ole kunnollista mielikuvaa hiukkasten roolista aineiden olomuotojen yhteydessä. Oppikirjoissa olomuodot mainitaan vasta olomuodonmuutosten yhteydessä, kun lämpöopin teorian opetuksessa on edetty jo pitkälle. Mielestäni aineen olomuotojen mikrotason selitys tulisi antaa ennen lämmön fysikaalista määrittelyä. Selitys saattaisi estää lämmön aineellistamiseen viittavien väärinkäsitysten syntyminen tai vankistumisen. Oppikirjoissa tulisi heti aluksi esittää aineen hiukkasrakenne ja mikrotasolla aineen olomuodot siten, että oppilaille selviää, miten hiukkaset ovat sidoksissa toisiinsa eri olomuodoissa ja miten ne pääsevät liikkumaan. Useat tutkimukset puoltavat kuvien ja muiden havainnollistamismenetelmien käyttöä fysiikan opetuksessa (esim. Clark & Jorde, 2004). Aineen hiukkasmallin sekä aineen olomuotojen esittäminen kuvien avulla on helppoa ja oppimisprosessia ajatellen erittäin hyödyllistä.

Opetusmalli sisältäisi näin ollen yksinkertaiset atomi- ja molekyyylimallit sekä aineen eri olomuotojen hiukkasmallin korostaen niissä vallitsevia sidostyyppisiä sekä hiukkasten liikkeitä aineen eri olomuodoissa. Yhdessäkään analysoidussa oppikirjassa ei esiinny sen alkuosassa aineen rakenteen eikä olomuotojen mikrotason kuvailua. Häiritsevästi kyseinen tieto, jos sitä esiintyy, on jakaantunut kirjan eri lukuihin tai aihealueisiin. Esimerkiksi kaasun rakennetta käsitellään usein toisessa yhteydessä kuin nesteen ja kiinteän aineen rakennetta, mikä hankaloittaa olomuotojen hiukkasrakenteen johdonmukaista oppimista.

Physica-oppikirjassa on taulukomuodossa esitetty suppeasti kuvien kera aineen rakenneosaset ja rakenneosien liike- ja potentiaalienergiat. Lämpöliikettä ja olomuotojen mikrotason rakennetta on kuvailtu kineettisen kaasuteorian yhteydessä, jossa kaasujen rakenne käydään myös tarkemmin läpi, jotta ideaalikaasun ja reaalikaasun rakenteelliset erot tulevat selvästi esille.

Fysiikka-oppikirjassa on aineen olomuodoille oma luku, jossa olomuotojen rakennetta kuvaillaan olomuodonmuutoksiin ja lämpöliikkeeseen liittyen. Kaasun rakenneosasten kuvailua käytetään laajasti selventämään reaalikaasun ja ideaalikaasun eroja. Samassa asiayhteydessä eli kineettistä kaasuteoriaa käsittelevässä luvussa kuvaillaan tarkasti kaasumolekyylien yleistä rakennetta. Nesteiden ja kiinteän aineen rakennetta ei oppikirjassa erikseen käsitellä.

Fotoni-oppikirjassa on hyvin laaja mikrotason fysiikkaa käsittelevä alaluku nimeltään "Olomuodot ja atomirakenne". Tietosisältöönä nähden alaluku on esitetty myöhäisessä vaiheessa ja on luonteensa vuoksi niin sanottua syventävää tietoa. Joka tapauksessa alaluku sisältää paljon tärkeää tietoa koskien olomuotojen rakennetta sekä lämpöliikettä. Atomi- ja molekyyli-rakennetta luvussa ei kuitenkaan käsitellä. Olomuotojen mikroskooppista rakennetta kuvataan seuraavasti: "Kaasussa molekyylit etenevät lähes suoraviivaisesti, kunnes ne törmäävät toiseen molekyyliin. Nesteessä molekyylit tai ionit liikkuvat toistensa ohi ollen jatkuvassa vuorovaikutuksessa. Kiinteässä aineessa hiukkaset eivät pääse sidoksista johtuen enää liikkumaan toistensa ohi". Kirjan selitys on selkeä, mutta erilaisten sidosten ominaisuuksia ja niiden yhteyttä eri aineisiin olisi myös aiheellista käsitellä. Kiinteän aineen hiukkasten liikkeestä on mainittu kirjassa seuraavaa: "Kiinteässä aineessa hiukkaset ovat sidottuja kidehilan tiettyihin tasapainoasemiin, mutta värähtelevät sen ympärillä. Hiukkaset voivat olla myös pyörimisliikkeessä massakeskipisteensä ympärillä". Kidehilan mikrotason muutoksesta

sulamiseen ja höyrystymiseen liittyen on myös yksinkertainen kuvasarja, jota ei ole kuitenkaan selitetty. Kirjan esitys on käyttökelpoinen esimerkki mikrotason kuvailusta olomuotojen yhteydessä. Sidosten fysikaalisen luonteen esitystä tulisi kuitenkin tarkentaa ja kuvien käyttöä lisätä. Oppilaiden tulisi ainakin tuntea vesimolekyylien välisten sidosten erot veden eri olomuodoissa. Heidän tulisi pystyä selittämään mikrotasolla veden olomuotojen tiheyserot. Lisäksi aineen ominaisuuksien ja sidostyyppien välinen riippuvuus olisi hyvä esitellä kyseisessä asiayhteydessä. Vesi on nimittäin monella tapaa muista aineista poikkeava yhdiste, mikä selittyy nimenomaan sen sidosten ominaisuuksien perusteella. Perinteisesti tällainen kuvailu kuuluu modernin fysiikan tai kemian kurssille, jossa lämmön fysikaalinen rooli ei kuitenkaan ole esillä.

## 6.7 Lämpö ja lämpötila

Lämpö ja lämpötila ovat jokapäiväisen elämämme peruskäsitteitä ja myös lämpöopin peruskäsitteitä, joihin nojaten lämpöoppi on rakentunut. Termodynamiikan tutkimukset perustuvat lämmön siirtymiseen ja mitattavissa oleviin lämpötilojen, paineen ja ainemäärän muutoksiin. Fysiikan opetuksen tutkimusten perusteella on kuitenkin ilmennyt, että oppilailta on alaluokilta lähtien yliopistoihin saakka vaikeuksia ymmärtää lämmön ja lämpötilan fysikaaliset luonteet. Lämpö ja lämpötila ovat makroskooppisia suureita, mutta niiden luonnetta on vaikea ymmärtää ilman mikrotason selitystä. Oppikirjoissa lämpö ja lämpötila kuvaillaan usein painottaen niiden makroskooppisia ominaisuuksia, mikä vuoksi oppilaille saattaa syntyä käsityksiä muun muassa lämmön aineellisuudesta, mikä puolestaan vaikeuttaa muiden lämpöopin aiheiden omaksumista (Sözbilir, 2003). Lisäksi lämmön ja lämpötilan käsitteet sekoitetaan usein keskenään (Duit, 1988; Roon, 1992). Makroskooppinen kuvailu ei siis yksinkertaisesti riitä, vaan lämpö ja lämpötila tulisi opettaa myös mikroskooppisesta näkökulmasta, jolloin aineen, lämmön ja lämpötilan luonteet esiintyisivät selkeästi erilaisina.

Physica-oppikirjassa lämpötila on esitetty vain makroskooppisesta näkökulmasta: “Jonkin ajan kuluttua lämpömittarin ja kahvin lämpötila on sama. Tällöin mittari ja kahvi ovat lämpötasapainossa. Lämpötila voidaan lukea, kun tasapainotila on saavutettu”. Kirjassa todetaan siis lämpötilan mittauksen perustuvan termiseen tasapainoon. Selitys on pintapuolinen, arkinen kuvaus, joka ei kerro riittävästi lämpötilan luonteesta. Lämpö voidaan määritellä lyhyesti; se on siirtyvää energiaa. Physica-oppikirjassa määritellään erikseen lämpö ja lämpöenergia: “Mikrotasolla sisäenergian sitä osaa, jonka muodostaa rakenneosien liike-energia, kutsutaan systeemin lämpöenergiaksi”. Lämpö esitetään puolestaan lämpötilaeroista johtuvasta kahden eri systeemin välisenä energian siirtymisenä. On vaarallista puhua lämpöenergiasta, mutta mikrotasolla se lieneeärkevin keino esittää tiivistetysti lämmön luonne. Opetuksessa tulee tällöin korostaa, että lämpöenergia on ainoastaan mikrotason käsite. Lämpöenergiaa parempi ilmaisu voisi olla lämpöliikkeen energia, jolloin se viittaa selvemmin mikrotason ilmiöön.

Fysiikka-oppikirjan teoreettinen lähestyminen lämpötilaan painottuu mikrotasolle: “Lämpötila on tilastollinen suure, jonka arvo riippuu kappaleen rakenneosasten lämpöliikkeestä johtuvasta keskimääräisestä liike-energiasta”. Lämpötilan kineettinen tulkinta tulee myös kertauksena kineettisen kaasuteorian yhteydessä. Hieman epäloogisesti lämmön ja lämpötilan määrittelyt esiintyvät eri luvuissa. Lämmöstä kirja sanoo seuraavaa: “Lämpö  $Q$  on energiaa, joka siirtyy lämpötilaeron vuoksi systeemistä

toiseen” ja mikrotasolla “Lämpö on aineen rakenneosasten liike-energiaa, joten se on myös yksi energian muoto”. Kirja ei siis tee erottelua lämmön ja lämpöenergian välillä, eikä kirjassa mainita lämmön olevan siirtyvää energiaa. Joka tapauksessa mikrotason selitykset etenkin lämpötilan osalta ovat hyviä. Physicaan nähden puutteena kirjassa on selkeä makro- ja mikrotason erittely sekä kuvien vähyys.

Fotoni-oppikirjassa lämpötilan määritelmä esiintyy lämmöstä erillään myöhäisessä vaiheessa. Lämpötila tai paremminkin lämpötilan mittaaminen esitetään termisen tasapainon avulla. Kirja ei tarjoa mikrotason selitystä, vaan se keskittyy enemmän lämpötilan mittaamiseen ja lämpötila-asteikkoihin. Lämpö puolestaan esitetään Fysiikka-oppikirjan tavoin: “Nykyisen käsityksen mukaan lämpö on aineen rakenneosien liike-energiaa ja sellaisenaan siis yksi energiamuoto. Lämpöenergiasta käytetään omaa tunnusta  $Q$ ”, joten siihen pätevät myös samat kommentit. Kirjassa on epämääräinen mikrotason kuvaus lämpöenergiasta koskien kitkavoiman tekemän työn muuttumista lämmöksi: “Kineettisen energian muutos ilmenee molekyylien lämpöenergian kasvuna eli viimekädessä molekyylien liike-energian kasvuna”. Lause tulisi korjata siten, että lämpöenergia on molekyylien liike-energiaa. Lämpöenergia on makroskooppinen käsite, joten on epäloogista puhua molekyylien lämpöenergiasta. Fotoni-oppikirjan esitys on hieman muita oppikirjoja epätasaisempi ja puutteellisempi.

Toisaalta Fotoni-oppikirjan mikrotason esitykset on nidottu yhteen ainoaan jo edellä mainittuun alalukuun. Tämä onkin kirjan suurimpia heikkouksia. Alaluvussa heti aluksi mainitaan seuraavaa: “Aineen lämpötila riippuu sen rakenneosasten liikkeestä, jota kutsutaan lämpöliikkeeksi”. Myöhemmin jatketaan: “Lämpötila kuvaa lämpöliikkeen vilkkautta. Aineen kylmetessä lämpöliike vähenee, ja absoluuttisessa nollassa se loppuisi kokonaan”. Kirja tarjoaa loppujen lopuksi mikrotason määritelmän lämpötilalle, mutta väärässä asiayhteydessä, olomuotojen rakennetta käsittelevässä alaluvussa. Koska lämpö ja lämpötila sekoitetaan käsitteinä usein toisiinsa, tulisi niiden fysikaalisten määritelmien erot esittää oppikirjoissa täsmällisesti mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.

## 6.8 Olomuodonmuutokset

On todettu, että oppilaiden käsityksiä aineen olomuodonmuutoksista ohjaa uskomus lämmön aineellisuudesta ja tämän “aineen” siirtymisestä kappaleesta toiseen (Kesidou & Duit, 1988). Oppilaat olettavat, että lämmön (“aineen”) siirtyminen jatkuu kappaleiden saavuttaessa termisen tasapainon. Lisäksi oppilaat päättelevät usein, että lämmön siirtyminen johtaa aina lämpötilan kasvuun, vaikkei näin todellisuudessa ole esimerkiksi aineen saavuttaessa sen kiehumis- tai sulamispisteen. Opetuksessa ja oppikirjoissa korostetaan kyllä riittävästi kiehumis- ja sulamispisteen roolia lämmön siirtymisessä, mutta se vaatii oppilailta muistamista. Oppilaiden oma päättely puolestaan ajaa heidät väärin johtopäätöksiin, koska he eivät ymmärrä lämmön ja lämpötilan todellista luonnetta.

Olomuodonmuutokset on helppo aihe opettaa mikrotasolla. Kun oppilaat ymmärtävät aineen hiukkasrakenteen ja mikrotasolla aineen olomuodot, on heille johdonmukaista selittää mikrotasolla hiukkasten liikkeen lisääntymisen vaikutus hiukkasten välisiin sidoksiin. Mikrotason kuvailu on looginen ja tarpeeksi yksinkertainen,



joten mikroskooppisen ja makroskooppisen tapahtuman välinen yhteys on ilmeinen. Oppilaiden ymmärtäessä olomuodonmuutosten mikrotason selitys alkavat he pikkuhiljaa käyttää samankaltaista päättelyä ratkaistessaan muita lämpöopin ongelmia.

Opetusmalliksi ehdotan kuvasarjaa selityksineen, jossa lämpölähteen vaikutuksesta (esim. kynttilä) ilman molekyylit alkavat liikkua kiivaammin ja niiden kohdatessa jään alkavat myös jääkiteen molekyylit värähtelemään nopeammin. Jään molekyyliin värähtelyn kasvaessa pitkähköt sidokset katkeavat, jolloin veden tapauksessa molekyylit pääsevät lähemmäksi toisiaan, ja jää sulaa nesteeksi. Molekyyliin välillä on vielä sidosvoimia, mutta pidettäessä lämpölähdettä tarpeeksi kauan veden lähellä, alkavat myös lyhyet sidokset katkeamaan, ja molekyylit erkanevat toisistaan erillisiksi kaasumolekyyleiksi, jolloin vesi höyrystyy. Jään ja vesimolekyyliin sidosten erilaisuutta tulisi korostaa kuten tehtiin myös olomuotojen opetusmallissa. Vesi on ominaisuuksiltaan poikkeuksellinen. Veden molekyylit ovat lähimpänä toisiaan neljän celsiusasteen lämpötiloissa, jolloin vesi on tiheintä. Pääsääntöisesti aineiden nestemäinen olomuoto on harvempaa kuin kiinteä olomuoto. Mikrotasolla on syytä kuvailla myös, miksi höyrystyminen ja sulaminen eivät vaadi koko kappaleen tai nesteen olemista kiehumis- tai sulamispisteessä. Lämpölähdettä lähinnä olevat molekyylit saavat keskimääräistä suuremman nopeuden, jolloin niillä on tarpeeksi energiaa irrota sitä ympäröivistä sidosvoimista. Pinnalla olevien molekyyliin irtoamista helpottaa myös sidosten lukumäärän vähyys verrattuna pinnan alla oleviin molekyyleihin.

Physica-oppikirjassa on erillinen alaluku, joka käsittelee olomuodon muutoksen mikroskooppista mallia. Selitys on suppea, eikä siinä käsitellä laisinkaan aineen olomuotojen erilaisuutta mikrotasolla. Selitys on muutenkin hieman ontuva: “Olomuodon muutoksessa aineen lämpötila ei nouse, vaikka energiaa tuodaan siihen koko ajan lisää. ... Koska lämpötila ei muutu, ei rakenneosasten lämpöliike kasva. Tuotava energia menee siis rakenneosasten potentiaalienergian muutokseen. Osien potentiaalienergiat kasvavat, kun ne irtautuvat toisistaan ja rakenne rikkoutuu”. Ensinnäkin oppilaat eivät ymmärrä lämpötilan ja rakenneosasten lämpöliikkeen yhteyttä, koska sitä ei olla aiemmin kirjassa selitetty. Toiseksi osien keskimääräiset potentiaalienergiat kasvavat koko ajan energiaa tuotaessa lisää. Rakenteen rikkouduttua potentiaalienergia muuttuu joko liike-energiaksi tai lyhyemmän kantaman sidosten potentiaalienergiaksi. Makroskooppisesta näkökulmasta olomuodonmuutos ei liity lämpötilan muutokseen vaan entropian kasvuun

Fysiikka-oppikirjassa on mainittu aikaisessa vaiheessa ja kerrataan myös olomuotojen muutosten yhteydessä, että kappaleen lämpötila riippuu sen rakenneosasten liikkeestä. Lisäksi kiinteän aineen, nesteen ja kaasujen mahdollinen liikkuminen on kerrottu lyhyesti. Kirja kuvailee mikrotasolla olomuodonmuutoksia seuraavaasti: “Jos kiinteässä aineessa lämpövärähtely voimistuu riittävästi, rakenneosasten sähkömagneettiset sidokset heikkenevät”. Kiinteä aine muuttuu nesteeksi: “Atomit ja molekyylit pääsevät liikkumaan toistensa suhteen. Neste muuttuu kaasuksi: “Kun neste lämpenee, rakenneosaset saavat lisää energiaa ja niiden väliset sidosvoimat heikkenevät edelleen”. Viimeinen lause voidaan esittää täsmällisemmin, sillä sidosvoimat eivät suinkaan heikkeneenergian lisäyksen johdosta, vaan koska rakenneosilla on enemmän liike-energiaa pääsevät ne liikkumaan kauemmaksi toisistaan, jolloin sidokset, joiden vaikutus riippuu rakenneosasten välisestä etäisyydestä, katkeavat. Kirja käsittelee erikseen nesteen haihtumista ja kiehumista. Haihtumisesta kirja sanoo: “Nesteen sanotaan

haihtuvan, kun sen pinnalta irtoaa molekyyliä ja siitä syntyy höyryä. Kiehumisesta ei ole mikrotason mainintaa. Vaikka kirjan olomuodonmuutosta käsittelevät mikrotason selitykset ovat heppoisia ja niistä puuttuu rakenneosasten sidosten tarkempi kuvailu, on luvun kokonaisuus mielestäni hyvä. Etenkin lämpöliikkeen ja olomuotojen yhteys on tärkeä käydä mikrotasolla läpi ennen olomuodonmuutosten liittyvän fysikaan käsittelyä.

Fotoni-oppikirjassa olomuotojen muutosten mikroskooppista luonnetta käydään tarkasti mutta vaikeatajuisesti läpi “olomuodot ja rakenne”-alaluvussa. Selitys on alusta saakka vaativaa teoreettista kuvailua ilman asiaa selventäviä kuvia. Aluksi luvussa puhutaan lämpötilan ja paineen vaikutuksesta aineen rakenneosasten välisiin vuorovaikutuksiin. Kappaleessa käytetään paljon vieraita käsitteitä kuten atomiparin potentiaalienergian arvo sekä tasapainoetäisyys. Selityksessä ei sinänsä ole mitään vikaa, mutta se saattaa olla oppilaalle hyvin vaikeasti ymmärrettävä. Otetaan esimerkiksi lauseet: “Kun kahden atomin välisen vuorovaikutuksen potentiaalienergialla on alin arvo, ovat atomit tasapainoetäisyydellä toisistaan” ja “Jos atomiparilla on positiivinen kokonaisenergia, pari ei pysy yhdessä”. Vaikeudet jatkuvat, kun kirja lähestyy tämän pohjalta olomuodonmuutoksia: “Alhaisessa lämpötilassa vuorovaikutukset sitovat atomit tai molekyylit kiinteisiin tasapainoasemiin, jolloin aine on kiinteää”. Lauseessa olisi syytä tehdä ero nesteiden ja kiinteiden aineiden välillä. Eli nesteessä vuorovaikutukset sitovat atomeja, mutta ne pääsevät liikkumaan vapaammin ja jopa toistensa ohi. Kirja esittää asian seuraavasti: “Kun atomien kineettinen energia saavuttaa riittävän korkean arvon, kiinteät tasapainoasemat katoavat, ja aine sulaa. Atomien välinen vetovoima ei kuitenkaan päästä niitä etääntymään lopullisesti toisistaan”. Kirjassa kiinteän aineen, nesteen ja kaasun erot kuvataan hiukkasparien kokonaisenergialla: “Kiinteässä aineessa ja nesteessä kokonaisenergia on negatiivinen ja kaasulla positiivinen”. Kaiken kaikkiaan kirjan kuvailu on kattava ja siinä tulee esille hiukkasten väliset vuorovaikutukset. Valitettavasti asia on esitetty vaikeasti, eikä siinä nouse tarpeeksi selvästi esille olomuodonmuutosten fysiikka. Sisältö muutettuna selkeälukuisemmaksi ja tuettuna kuvilla on kuitenkin lähellä ehdottamaani opetusmallia.

## 6.9 Lämmön siirtyminen

Lämpö siirtyy konvektiossa aineen virtauksen mukana, johtumalla aineen rakenneosasten vuorovaikutuksesta tai säteilemällä sähkömagneettista säteilyä. Konvektiossa on kyse makroskooppisista massavirroista, ja säteily puolestaan kuuluu moderniin fysiikkaan. Lukion lämpöopin suurin huomio on lämmön johtumisessa, joka tarkoittaa aineen sisällä tapahtuvaa lämmön siirtymistä. Termodynaamisissa prosesseissa kuvataan usein lämmön siirtymistä systeemistä toiseen, jolloin toisen systeemin sisäenergia kasvaa. Lämmönsiirto voi tapahtua johtumalla kiinteä aineen rakenneosasten vuorovaikutuksesta, ilmassa mukana esimerkiksi paine-eroista johtuen ja aina tietenkin myös säteilemällä, joka ei vaadi minkäänlaista väliainetta. Konvektioon ei liity opetuksellisesti oleellista mikrotason fysiikkaa. Sähkömagneettisella säteilyllä on sekä aalto- että hiukkasluonne, joiden käsittely ei kuitenkaan ole lukion lämpöopin yhteydessä mielekäästä. Lämmön johtuminen on puolestaan välttämätön esittää mikrotasolla, jotta sen fysikaalinen luonne voitaisiin ymmärtää.

Oppilailla on tutkitusti useita epätasomaisia käsityksiä lämmön johtumisesta ja aineen lämmönjohtavuusominaisuuksista. Oppilaat uskovat esimerkiksi, että eri

materiaalit vetävät puoleensa ja säilyttävät lämpöä eri tavoin (Kesidou & Duit, 1988; Grayson, 1995). Oppilaille on tapana ajatella samoin myös eristeiden ja johteiden ominaisuuksien kohdalla (Lewis & Linn, 1994). Osa väärinkäsityksistä selittyy lämpökäsitteen epätäsmällisestä ymmärryksestä. Joko oppilaat pitävät ajatuksissaan kiinni lämmön aineellisuudesta tai olettavat lämmön olevan säilyvää energiaa. Oppilaillehan opetetaan lämpökapasiteettiin liittyen eri aineiden ominaisuuksista varastoida ja luovuttaa energiaa. Tutkimuksissa on kuitenkin myös todettu, että lukiolaiset luulevat, että kylmältä tuntuvat kappaleet ovat huoneenlämpötilaa alhaisemmassa lämpötilassa. Näin ollen voidaan myös päätellä, että oppilaiden on vaikea ymmärtää lämmön johtumismekanismia, joka perustuu aineen hiukkasten vuorovaikutuksiin. Opetuksessa ja oppikirjoissa tulisi näin ollen korostaa mikrotason esitystä selitettäessä lämmön johtumisen mekanisme. Oppikirjoissa lämmön johtuminen selitetään kuitenkin usein vain makroskooppisesta näkökulmasta, kuten tehdään lämmön kuljetuksen ja säteilyn kohdalla.

Physica-oppikirja antaa lyhyen ja ytimekkään mikroskooppisen kuvailun lämmön johtumiselle: ”Kuumassa kappaleessa mikroskooppiset rakenneosat värähtelevät enemmän kuin kylmässä ja tämä värähtely etenee aineessa”. Aineen mikroskooppisten rakenteiden vaikutuksesta kyseisen aineen lämmönjohtamiskykyyn ei ole mainittu, eikä myöskään minkäänlaista analogiaa aineen sähkönjohtavuuteen.

Fysiikka-oppikirjassa esiintyy samankaltainen lyhyt toteamus lämmön johtumisesta: ”Tämä (johtuminen kiinteässä aineessa) aiheutuu siitä, että aineen rakenneosasten värähtely kasvaa ja etenee aineessa”. Heti perään mainitaan lämmönjohtavuuden olevan kullekin aineelle ominainen piirre. Esityksessä on samat puutteet ja heikkoudet kuin Physicassa.

Fotoni-oppikirjassa on esitetty arkinen kuvaus saunatilanteesta, jossa kosketus lauteissa oleviin naulankantoihin tuntuu polttavalta, vaikka ne ovatkin samassa lämpötilassa. Tämä johtuu tietenkin metallin paremmasta lämmönjohtavuudesta. Toisin sanoen metallista siirtyy puuta tehokkaammin energiaa ihoon. Kirjassa ei esiinny mikrotason kuvausta lämmönjohtumisesta eikä mainintaa lämmönjohtavuuteen vaikuttavasta aineen mikroskooppisesta rakenteesta.

Oppikirjojen mikrotason sisältö lämmön johtumisesta on hämmästyttävän vähäinen johtuen selityksen vaikeudesta. Sähköopin useimmiten opetetaan metallin hyvän sähkönjohtavuusominaisuuden johtuvan metallissa olevista niin sanotuista vapaista elektroneista. Lämpöopin oppikirjat eivät hyödynnä sähkön ja lämmön johtavuuden välistä analogiaa, eivätkä selvästikään anna tarpeellista mikrotason kuvailua. Lämmön johtuminen voidaan selittää lukiolaisille ymmärrettävällä tasolla mikroskooppisesta näkökulmasta. Selitykseen on myös mahdollista yhdistää sitä tukevia kuvia. Opetusmalli voisi liittyä arkiseen esimerkkiin kuten kattilassa olevan veden lämpenemiseen hellalla. Lämmön johtumisen mikrotason kuvailu tulisi yltää samalle tasolle kuin teoriaosassa käsittelemäni kuvaus lämmön johtumisesta. Lisäksi olisi syytä korostaa eri aineiden välisiä eroja mikrotasolla, kuten yleensä sähkön johtuvuuden yhteydessä tehdään. Lyhyesti tämä voitaisiin esittää esimerkiksi vertailemalla puun ja metallin eroja. Metallissa on vapaasti liikkuvia elektroneja, minkä vuoksi lämpöä siirtyy tehokkaasti koko metallikappaleesta siihen kontaktissa olevaan kappaleeseen. Puun molekyyli rakenne on sidoksissa, joten lämpöä ei siirry yhtä tehokkaasti. Käytännön

esimerkiksi voitaisiin ottaa kuuma sauna, jonka lauteissa olevat alumiininaulat tuntuvat polttavan kuumilta, vaikka niiden lämpötila on yhtä suuri kuin lauteiden lämpötila. Ihon tuntemus perustuu ihon pinnan alla oleviin hermosoluihin. Lämpö siirtyy kosketuksessa olevan ihon sekä kosketuspinnan välillä. Sitä enemmän lämpöä siirtyy kosketuspinnalta, mitä suurempi kosketuspinta-ala on kyseessä. Kosketettaessa sormenpäällä alumiininaulan pintaa tai puisen lauteen pintaa on kosketuspinta-ala yhtä suuri ja näin ollen yhtä suuri määrä hermosoluja saa ärsykettä. Alumiininaulan kohdalla hermosolujen saama ärsyke on kuitenkin suurempi, koska alumiinissa lämpö johtuu koko ajan tehokkaammin naulan muista osista kosketuspinnalle. Toisin sanoen alumiininaulasta johtuu lämpöä tehokkaammin sen pinnalle, josta se puolestaan siirtyy ihon pinnan alle ja vaikuttaa hermosoluihin.

Termisessä kontaktissa olevista kappaleista lämpö siirtyy kuumemmasta kappaleesta kylmempään, kunnes ne ovat saavuttaneet termisen tasapainon eli ovat samassa lämpötilassa. Se miten paljon lämpöä siirtyy, riippuu kappaleen lämpökapasiteetista. Lämpökapasiteetti riippuu kappaleen kyvystä sitoa energiaa, mikä puolestaan mikrotasolla riippuu sen molekyylien välisistä sidoksista. Lämpötila on suoraan verrannollinen molekyylien lämpöliikkeen energiaan, mutta energiaa sitoutuu myös molekyylien potentiaalienergiaksi. Aineen saama energia jakautuu siis molekyylien liike-energiaksi ja sidosten potentiaalienergiaksi sen molekyyli-rakenteesta riippuen. Täten sama lämpötilan muutos vaatii eri aineille eri energiamäärään poikkeuksena kuitenkin kiinteät aineet, joiden lämpökapasiteetit ovat approksimatiivisesti harmonisista vuorovaikutuksista johtuen pääsääntöisesti samansuuruiset. Jos kappaleella on suuri lämpökapasiteetti, tarkoittaa se siis, että energiaa sitoutuu paljon sen molekyylien sidosrakenteiden potentiaalienergiaksi. Mainitsen tämän siksi, että yhdessäkin oppikirjassa ei ole mikrotason mainintaa lämpökapasiteettia käsittelevissä luvuissa. Lisäksi lämpökapasiteettia kuvaillaan kirjoissa lämmön säilymisenä, lämmön varastoimisena tai lämpöenergian säilymisenä. Näistä jokainen ilmaisu hankaloittaa lämpökäsitteen täsmällistä ymmärtämistä. Lämpö ei varastoidu, vaan se on siirtyvä energiaa. Käsitettä lämpöenergia on myös vaarallista käyttää, joten olisi parempi puhua sisäenergiasta tai lämpöliikkeen energiasta. Jotta pahoilta väärinymmärryksiltä vältyttäisiin, tulisi mielestäni oppikirjoissa esittää lämpökapasiteetille selitys mikroskooppisesta näkökulmasta.

## 6.10 Lämpöopin pääsäännöt

Lämpöopin kolme pääsääntöä perustuvat 1700-1800 lukujen makroskooppiseen fysiikkaan. Ne olivat sekä kokeellisesti että matemaattisesti todettuja sääntöjä, joita ei osattu loogisesti selittää. Lämmön kineettisen mallin oivaltaminen mahdollisti pääsääntöjen takana olevan fysiikan selittämisen. Pääsäännöt ovat edelleen hyvin tärkeä osa koulujen lämpöoppia. Opetuksen sisältö etenee historian mallin mukaisesti ja on hyvin pitkälle jämähtänyt makroskooppiseen kuvailuun.

Oppilailla on alaluokilta yliopistoihin saakka vaikeuksia ymmärtää lämmön luonne (Erickson, 1985; Roon, 1992), mikä vaikuttaa myös ensimmäisen pääsäännön oppimiseen. Lämpöopin ensimmäinen sääntö voidaan esittää sisäenergian muutoksena: Systemin sisäenergia muuttuu yhtä paljon kuin siihen siirtyy tai siitä poistuu energiaa työnä ja lämpönä. Matemaattisesti tämä tulisi ilmaista:  $\Delta E = Q - W$  (Moore, 1993).

Prosessiluonteiset työ ja lämpö ovat täysin makroskooppisia käsitteitä, joten niille ei voi antaa mikrotason kuvausta, mutta niiden avulla voidaan korostaa mikro- ja makrotasojen yhteyttä, koska ne muuttavat sisäenergiaa, jolla puolestaan on selkeä mikrotason kuvaus.

Physica-oppikirjan ratkaisu on hyvä. Siinä esitetään täsmällisesti lämmön ja työn makroskooppinen kuvaus, jossa myös korostuu riittävästi niiden prosessiluonteisuus. Ensimmäisen pääsäännön matemaattinen muoto on myös täsmällinen eli edellä esitetyn mukainen. Sisäenergian luonne tulee selvästi esille rinnakkain makro- ja mikrotasolla. Kirjan esitys täyttää hyvän opetusmallin kriteerit. Lisänä voisi olla esimerkki mekaanisen energian muuttumisesta kitkan tekemän työn välityksellä lämmöksi ja edelleen systeemin sisäenergian kasvuksi. Aiheena voisi olla historiasta tuttu Joulen siipiras.

Fysiikka-oppikirja onnistuu hyvin sisäenergian mikrotason kuvauksessa. Siinä tulee järkevästi esille, miten sisäenergia eroaa gravitaatiokenttään liittyvästä potentiaalienergiasta ja koko systeemin etenevän liikkeen liike-energiasta. Kyse on nimenomaan makro- ja mikrotason eroista. Ensimmäisen pääsäännön matemaattinen muotoilu on esitetty oikein, mutta sanallinen kuvaus ontuu hieman, koska siinä lämpö esitetään lämpömäärän summana, jolloin lämmön prosessiluonteisuus ei tule kunnolla esille.

Myös Fotoni-oppikirjassa ensimmäinen pääsääntö on esitetty matemaattisesti oikein. Voidaan siis todeta, että nykyisissä suomalaisissa lämpöopin oppikirjoissa ei yleisesti enää käytetä muotoa:  $\Delta U = \Delta Q - \Delta W$ . Pääsäännön sanallisessa kuvauksessa on vastaavat ongelmat kuin Fysiikka-oppikirjassa. Lämmön prosessiluonteisuutta sekä sisäenergian makro-mikroluonteisuutta tulisi korostaa enemmän.

Termodynamiikassa on lukiotasolla tärkeä ymmärtää, miksi lämpö ei voi täysin muuttua mekaaniseksi energiaksi ja miksi lämpökoneen hyötysuhde ei voi olla yksi tai sata prosenttia. Toisin sanoen oppilaiden tulisi sisäistää syvällisesti tämä edellä kahdella eri tapaa ilmaistu lämpöopin toinen pääsääntö, eikä vain oppia ulkomuistista sanelemaan sen sisältöä. Toinen pääsääntö kertoo paljon termodynaamisten prosessien luonteesta: Termodynaamiset prosessit suuntautuvat kohti luonnollista tasapainoa ja termodynaamisissa prosesseissa entropia kasvaa. Entropian kasvu näkyy satunnaisen lämpöliikkeen kasvuna, mutta myös muunlaisten mikrotason prosessien kasvuna. Toisesta pääsäännöstä seuraa lämpöopin kolmas pääsääntö, jonka mukaan absoluuttista nollapistettä ei voi saavuttaa.

Oppikirjojen esitykset entropiasta vaihtelevat paljon, mutta on kuitenkin ilahduttavaa huomata, että niissä esiintyy mikrotason kuvailua. Jostain syystä entropian mikrotason kuvailu liittyy kuitenkin usein lämpöilmiöistä poikkeaviin ilmiöihin kuten mustepisaran leviämiseen vesiastiassa. Tämä johtunee siitä, että kirjantekijät ovat valinneet helposti ymmärrettäviä sekä havainnollistettavia esimerkkejä. Lämpöilmiöistä entropian kasvu tulee hyvin ilmi esimerkiksi olomuodonmuutoksissa, jossa lämpö lisää mikroskooppisten rakenteiden epäjärjestystä. Näin ollen opetuksessa voitaisiin käyttää myös entropian yhteydessä olomuodonmuutosten mikroskooppista mallia hyödyksi. Olomuodonmuutokset osoittautuvat erittäin hyödylliseksi työkaluksi lämpöopin mikrotason opetukseen, mikä lisää hämmästyksi oppikirjojen sisällön niukkuudesta niiden osalta.

Physica-oppikirja lähestyy entropian käsitettä mikroskooppisesta näkökulmasta kahden esimerkin avulla. Toinen on jo mainittu mustepisaraesimerkki ja toinen on pallon pomppimista kuvaava esimerkki, jossa tulee esille energian huononeminen pallon liike-energia muuttuessa lattian molekyylien satunnaiseksi lämpöliikkeeksi. Palloesimerkin avulla on myös selitetty mikrotasolla niin sanottu mahdoton prosessi, joka esimerkkiin liittyen tarkoittaisi levossa olevan pallon lähtemistä itsestään (lämpöliikkeestä johtuen) liikkeelle. Mikrotason kuvailuja on muutama, joista poimin kaksi osuvaa palloesimerkkiin liittyvää lausetta: ”Sisäenergian muutos liittyy lattian rakenneosasten lämpöliikkeen lisääntymiseen” ja ”Jotta pallo lentäisi ylös, lattian rakenneosien tulisi muuttua hetkellisesti yhdensuuntaiseksi liikkeeksi, mikä on hyvin epätodennäköistä”. Esitykset ovat selviä ja havainnollisia ja ne sisältävät paljon selityksiä tukevia kuvia, mutta niillä voisi olla enemmän yhtymäkohtia lämpöopin varsinaisiin perusilmiöihin.

Fysiikka-oppikirjassa on toista pääsääntöä koskien hieman yleisluontoisempaa mikrotason kuvailua: Jos tarkastellaan mikroskooppisen pientä ainemäärää, jossa on vähän atomeja, termodynamiikan toinen pääsääntö saattaa hetkellisesti rikkoutua. Sääntö ilmaisee tapahtumien todennäköisen kulun”. Entropiaa on mikrotasolla kuvailtu myös oppilastyössä mustepisarakokeen avulla. Yleisesti ottaen oppikirjan esitys on kapea-alainen, eikä tarjoa riittävää mikrotason näkökulmaa entropiaan ja sitä koskeviin lämpöilmiöihin.

Fotoni-oppikirjassa on esimerkkinä myös kahden eri liuoksen sekoittuminen, joka vastaa edellisten kirjojen mustepisaraesimerkkiä. Lisäksi kirjassa on hyviä mikrotason kuvailua toisesta pääsäännöstä, vaikka kuvat puuttuvatkin. Makro- ja mikrotason eroja on kuvailtu seuraavasti: ”Toinen pääsääntö koskee kaikkia makroskooppisia ilmiöitä. Atomaariselta kannalta se ilmaisee vain tapahtumien todennäköisen kulun. Makroskooppista ainemäärää tarkasteltaessa ei mikroskooppisilla poikkeamilla ole merkitystä.” Lämpöliikkeen ja toisen pääsäännön yhteys on myös esitetty osuvasti: ”Mekaaninen energia on järjestäytyneitä energiaa, kun taas lämpöliikkeessä hiukkaset liikkuvat järjestymättömästi kaikkiin suuntiin”. Lämpöliikkeen satunnaisuudesta johtuen lämpö ei voi muuttua täysin mekaaniseksi työksi toisin kuin mekaaninen työ voi muuttua täysin lämmöksi, ja siten entropia myös lisääntyy luonnollisissa prosesseissa. Fotoni-kirjasta löytyy paljon hyviä mikrotason kuvia, ne voisi tuoda monesti tiiviimmin ja yhteenvetomaisesti esille. Lisäksi havainnollistaminen tai paremminkin sen puute on heikkous.

## 7 PÄÄTELMÄT

Lämpöoppi on mielenkiintoinen ja haastava opetusaihe. Lämpöopin ilmiöt ovat jokaiselle tuttuja, mutta niiden fysikaalista luonnetta oppineempienkin on vaikea täysin ymmärtää. Lämpöoppi kuuluu perinteisesti klassiseen fysiikkaan, ja sitä opetetaan vähitellen jo alaluokilta saakka. Lukiossa lämpöoppi opetetaan toisessa kurssissa heti ainoan pakollisen fysiikan kurssin jälkeen. Verrattuna klassiseen mekaniikkaan lämpöoppiin sisältyy selkeästi enemmän abstrakteja aiheita, joihin liittyy paljon mikrotason fysiikkaa. Lukion mekaniikka kuvaa melko puhtaasti havainnoitavissa olevien makroskooppisten kappaleiden liikettä, kun lukion lämpöopissa puolestaan käsitellään näkymättömissä olevien hiukkasten satunnaista liikettä, josta seuraa erilaisia makroskooppisia ilmiöitä kuten lämpötila.

Oppilaiden oppimisvalmiudet on otettava huomioon suunnitelmassa opetusjärjestelyjä. Oppimisvalmiudet eivät riipu ainoastaan oppilaiden kehityksellisestä vaiheesta vaan myös heille aikaisemmin opetetuista asioista. Mikrotason fysiikka lukeutuu perinteisesti moderniin fysiikkaan, joten oppilailla ei usein ole riittävää pohjatietoa ymmärtää lämpöoppiin liittyvää hiukkastason fysiikkaa. Fysiikan lukiokurssijärjestystä tulisi valtakunnallisella tasolla pohtia uudelleen tässä valossa, koska hiukkastason ilmiöihin on syytä perehtyä lämpöopissa.

Ensimmäinen mielenkiinnon kohteeni oli selvittää lämpöopin oppimisen vaikeuksien taustoja ja miettiä liittyykö niihin makroskooppisen ja mikroskooppisen lähestymisen problematiikkaa. Lämpöilmiöt ovat olleet haastavia tiedemiehille hyvin pitkän aikaa. Lämpöopin kehittämisen yhteydessä syntyivät energian ja työn käsitteet ja lopulta lämmön täsmällisempi määritelmä. Klassisen lämpöopin määritelmät ovat syntyneet empiiristen tutkimusten perusteella siten, että luonnon on havaittu noudattavan tiettyjä sääntöjä. Syytä siihen, miksi luonto noudattaa lämpöopin sääntöjä ei tunnettu ennen 1900-luvun alkua, jolloin aineen hiukkasluonne todistettiin, ja fysiikassa alkoi uusi aika.

Tämä historian juonne näkyy edelleen tavassamme opettaa lämpöoppia. Lämpöoppia opetetaan edelleen valtaosin makroskooppisesta näkökulmasta. Jopa yliopistotason opetus laiminlyö fysiikan peruskurssilla mikrotason fysiikan asemaa lämpöopin käsitteiden ymmärtämisessä. Väitteeni perustuu sekä omakohtaisiin havaintoihini että oppikirjojen sisällölliseen analyysiin. Verrattuna klassisen mekaniikan perusteiden opettamiseen tutkimuksia mikrotason esityksestä lämpöopin opetuksessa ei ole Suomessa eikä muualla maailmassa paljon tehty.

Oppilaiden väärinkäsityksistä lämpöopin ilmiöihin liittyen on tutkittu laajasti. Tutkimuksissa esitetään usein ehdotuksia tai malleja opetuksen kehittämiseksi. Työssäni olen keskittynyt opetuksen kehittämisen mahdollisuuksiin mikroskooppisen esityksen näkökulmasta.

Opetus ja oppiminen ovat monimuotoisesti vuorovaikutuksellisia prosesseja. Opetukseen liittyy muun muassa opettajan persoonalliset ominaisuudet, opetusmenetelmät, käytettävä materiaali, opetustila ja niin edelleen. Oppimiseen puolestaan liittyvät oppilaiden kognitiiviset ominaisuudet kuten motivaatio sekä opetuksen ulkoinen ja sisällöllinen laatu. Opetuskokemus on loppujen lopuksi hyvin

yksilöllinen. Ainoa vakioitavissa oleva opetukseen liittyvä asia on oppikirjan sisältö. Tarkasteltaessa uutta aihetta onkin perusteltua aloittaa opetuksen ja tarkemmin ottaen oppikirjojen sisällöstä.

Oppikirja-analyysini keskittyi nykyisiin, vuoden 2000 jälkeen julkaistuihin lukio-oppikirjoihin. Niiden oppikirjojen lisäksi olisi mielenkiintoista tehdä läpileikkaava analyysi ala- ja yläluokkien oppikirjojen mikrotason esityksestä lämpöopin ilmiöihin liittyen. Alaluokkien fysiikan opetus on vastikään täysin uudistunut ja se käsittää muun muassa veden olomuodonmuutokset. Lämpökäsitteiden arkisuudesta johtuen olisi tärkeää, että opetus olisi johdonmukaista heti alaluokista saakka.

Oppikirjojen sisällön syvälliseen analysointiin ei ole luonnontieteen tietorakenteen kannalta sopivia välineitä, joten olen tehnyt analyysin oman harkintani pohjalta. Analyysin aloittaminen tyhjän päältä on työlästä. Ehdotankin fysiikan opettajille opinnäytetyön tai liseniaattityön aiheeksi kyseisten menetelmien kehittelyä. Tämä helpottaisi jatkossa samankaltaisten analyysien tekemistä ja tekisi analyyseista yhtenäisempiä mahdollistaen laajemman oppikirjojen vertailun.

Lämpöopissa merkittävimpiä oppimisen esteitä on lämmön aineellistaminen. Tämä seikka nousee esiin oppilaiden väärinkäsityksiä koskevissa tutkimuksissa, joihin on osallistunut oppilaita aina alaluokilta yliopistoihin saakka. Lämmön aineellistaminen on luonnollinen tapa käsittää arkiset lämpöilmiöt, ja arkikielen ilmaisut tukevat käsitystä lämmön aineellisuudesta. Arkikielen ja fysiikan käsitteiden eroavaisuus on toinen tärkeä lämpökäsitteiden fysikaalista ymmärrystä hankaloittava seikka. Osa väärinkäsityksistä omaksutaan jo siis ennen kouluun menoa, mutta suurin osa niistä opitaan kouluissa. Hyvänä esimerkkinä on lämmön samaistaminen muihin energiakäsitteisiin.

Mikrotason kuvailuissa makroskooppiset ilmiöt saavat syvällisemmän selityksen. Oppilaiden olisi tärkeä oppia tekemään loogisia päätelmiä, oli kyseessä arkielämän selviytyminen tai fysiikan ongelmat. Mikroskooppinen lähestyminen lämpöoppiin antaa oppilaille päättelyn avaimet lämpöilmiöihin. Oppilaiden ei tarvitse muistaa ulkoa lämpöopin pääsääntöjä tai lämmön johtumisen suuntaa. Nämä asiat ovat pääteltävissä lämpöliikkeen periaatteiden avulla, vaikka eivät olekaan niistä eksaktisti johdettavissa. Tämän perusteella mikrotason kuvaukset ovat välttämättömiä lämpöopin opetuksessa.

Lämpöopin mikrotason sisällön esityksessä on kaksi huomioitavaa asiaa: esityksen järjestys ja esityksen laatu. Ei ole samantekevää, missä järjestyksessä mikäkin lämpöopin aihe tulisi esittää. Ei ole myöskään samantekevää, miten makro- ja mikrotason esityksien keskinäiset suhteet nousevat esille. Yleisesti ottaen näkisin hyväksi sen, että lämpöopissa edettäisiin siten, että mikrotason kuvailua jakaantuisi mahdollisimman tasaisesti koko kurssin sisältöön makrotason kuvailuun yhdistettynä. Täten mikrotason kuvailulla voitaisiin selittää kokonaisvaltaisesti lämpöopin makroskooppisia ilmiöitä. Mikroskooppiset ilmiöt eivät jäisi irralliseksi aiheeksi, eivätkä niiden yhteys makroskooppisiin ilmiöihin unohtuisi oppilaiden mielestä.

Lukion lämpöopin sisällön laajuutta tulee myös harkiten miettiä. Onko tärkeämpää käsitellä asioita mahdollisimman laajasti, jolloin opetus jää välttämättä melko pintapuoliseksi, vai käydä läpi lämpöopin pääasiat huolellisesti sekä makro- että mikrotasolla? Oppilaiden lukuisten epätasmallisten ennakkokäsitysten sekä lämpöopin yleisen vaikeuden vuoksi päädyn ehdottamaan jälkimmäistä. Opettajat myöntävät



lämpöopin vaikeaksi aiheeksi opettaa, mikä on ehkä syynä siihen, että heidän opetuksensa jää usein pintapuoliseksi tai oppikirjaa myötäileväksi.

Lämpöopin keskeisimmät aiheet voidaan ehdotukseni mukaan opettaa järjestyksessä: Energia ja työ, aineen atomi- ja molekyyli rakenne sekä aineen olomuodot, lämpö, lämpötila, olomuodonmuutokset, lämmön siirtyminen, lämpöopin pääsäännöt, lämpövoimakoneet ja energiavarat. Mikrotason kuvailua sisältyy jokaiseen aiheeseen lukuun ottamatta osia Energia ja työ, Lämpövoimakoneet sekä Energiavarat. Konstruktivismin mukaan uusien asioiden oppimisen tulisi pohjautua aikaisemmin opittuun tietoon. Ehdotukseni toimii tämän käsityksen mukaisesti. Edellä opetetut asiat tukevat jälkimmäisten aiheiden oppimista. Lisäksi aiheisiin liittyy paljon mikrotason fysiikkaa, joka on lukiotasolle sekä riittävän helposti omaksuttavaa että konkreettista.

Entä missä vaiheessa mikrotason esitys tulisi ottaa esille uuden aiheen yhteydessä? Kun oppilaat ovat tietoisia käsillä olevasta uudesta ilmiöstä, siirrytään fysiikan opetuksessa teoreettisempaan tarkasteluun, jota voidaan lähestyä lämpöopin useita makroskooppisesta että mikroskooppisesta näkökulmasta. Mielestäni ei ole suurta merkitystä sillä, kummasta lähestymisestä lähdetään liikkeelle. Tärkeämpää on, että mikro- ja makrotason kuvailulle tehdään selkeä jaottelu niin, että oppilas tietää varmasti, kummasta lähestymisestä on kulloinkin kyse kuitenkin siten, että mikrotason selitys yhdistyy aina makrotason ilmiöön. Mikrotason kuvailulla ei ole merkitystä lämpöopin, ellei se liity jotenkin aina makrotason ilmiöön. Esimerkiksi tiedolla molekyylin rakenteesta ja sidoksista ei ole merkitystä ilman sen antamaa selitystä aineen olomuodoista. Mikro- ja makrotason syysseuraussuhteita tulee opetuksessa korostaa. Toisaalta mikro- ja makrotason kuvailut tulisi esittää tasavertaisesti. Mikrotason kuvailu ei saa olla pelkkä jälkitoteamus tai välikommentti.

Nykyiset oppikirjat ovat laadukkaita, ja niiden ulkoasu sekä sisältö näyttävät parantuvan vuosi vuodelta. Oppikirja-analyysissäni tulee kuitenkin ilmi, että lämpöopin yhteydessä oppikirjoissa esiintyy epätasua tietoa ja sisällöllisiä puutteita. Yleisimmät epätasuisuudet koskevat erityisesti lämpökäsitettä sekä lämpöilmiöiden mikrotason kuvausta. Minulla oli ennakkoluuloja oppikirjojen mikroskooppisen kuvailun laatua kohtaan, joten analysoitujen kirjojen anti yllätti minut positiivisesti. Sekä mikro- että makrotasot sinänsä esitetään kirjoissa hyvin, mutta niiden välistä yhteyttä ei täysin hyödynnetä.

Oppikirja-analyysini on jossain määrin hyvin kriittinen, ja siitä saa ehkä korostetun negatiivisen kuvan oppikirjojen sisällöstä. Pyrkimykseni kuitenkin on antaa ehdotuksia oppikirjojen sisällön kehittämiseksi entuudestaan. Jokaisessa oppikirjossa on hyvät ja huonot puolensa. Physicassa erityisen hyvää ovat makro- ja mikrotason selitysten rinnastaminen sekä selkeiden yhteenvetojen tekeminen. Fysiikka-sarjassa erityisen hyvää olivat ilmiöiden yksityiskohtaiset selitykset. Fotonissa puolestaan parasta on laaja tiedollinen anti. Yleisenä heikkoutena kirjoissa olivat mikrotason esityksiä ajatellen niiden esiintymisjärjestys tai -paikka, laatu, selkeys ja havainnollistamisen puute. Mikrotason esitykset ovat liian usein piilossa muun kuvailun seassa. Selkeää tiedon jaottelua ei esiinny tarpeeksi. Tiedon laatu on joissain yhteyksissä epätasua tai epämääräinen. Lisäksi mikrotason kuvailussa on usein puutteita. Mikrotason kuvailu voitaisiin esittää lukiotasolla oppikirjoissa paljon yksityiskohtaisemmin. Tällöin oppikirjat tukisivat paremmin oppilaiden käsitteellisen tietämyksen rakentumista.

Mikrotason esityksessä on vielä yksi tärkeä hyödynnettävissä oleva seikka. Aineen hiukkasrakennetta ja lämpöliikettä on helppo käyttää havainnollistamaan makroskooppisia ilmiöitä kuvien tai tietokoneanimaatioiden avulla, mikä tuo lämpöopin abstraktit käsitteet lähemmäksi konkreettisia tapahtumia. Havainnollistamisen on todettu parantavan oppimistuloksia, joten oppikirjoissa olisi syytä panostaa kuvien määrään sekä laatuun. Analysoiduissa kirjoissa esiintyi varsin vähän kuvia mikroskooppisista ilmiöistä.

Oppilaiden oppimiseen vaikuttaa oleellisesti motivaatio. Visualisointi ja tekniikan käyttö opetuksessa saattavat kiinnittää oppilaiden huomion tarkemmin opetettavaan aiheeseen. Tutkimuksissa on havaittu, että arkiset esimerkit kiinnostavat oppilaita. Voisi olettaa, että mikrotason kuvailu sisältäisi hyvin vähän arkisia esimerkkejä. Tosiasiassa moni mikrotason kuvailu liittyy hyvin mielenkiintoisilla tavoin arkisiin esimerkkeihin kuten saunan lauteiden ja lauteissa olevien rautanaulojen lämmönjohtavuusominaisuuksien vertailu osoittaa. Kyseisenlaisia esimerkkejä esiintyi yllättävän paljon oppikirjoissa, mitä tulisi ehdottomasti myös jatkossa vaalia. Esimerkkien tulee liittyä nimenomaan lämpöopin ilmiöihin eikä ainoastaan samankaltaisiin ilmiöihin kuten kirjoissa oli entropian osalta tehty.

Oppikirja-analyysiäni tehdessä huomasin, että olisi tarpeellista luoda sisällölliset opetusmallit lämpöopin ilmiöiden mikrotason kuvailuun. Esittämäni mallit ovat hyvin yleisluonteisia ja suppeita, mutta ne antavat kuvan siitä, minkä tasoista mikrotason kuvailun tulisi mielestäni oppikirjoissa olla. Mikrotason kuvailu voi olla värikästä ja monimuotoista ja sitä voidaan käyttää niin käytännön esimerkeissä kuin yleisluonteisimmissa teoreettisissa esityksissä. Mallien sisältöä voisi kehittää edelleen käsittämään yksityiskohtaisemmin sanallista esitystä sekä kuvien rakennetta. Jätän kuitenkin tämän mieluusti oppikirjojen tekijöiden vastuulle.

Mikroskooppinen lähestyminen lämpöoppiin ei ole helppoa. Useat tutkijat kritisoivat sitä mikroskooppisten prosessien monimutkaisuudella tai oppilaiden liian kuormittumisen vuoksi. Lämpöopin mikroskooppisten ilmiöiden opetus onkin pidettävä yksinkertaisena. Ongelmia mikrotason kuvailussa tuottavat myös siinä esiintyvät vaikeat käsitteet. Kuvailuissa käytetään sanoja molekyyli, atomi, sidos, värähtely, pyörivä liike, etenevä liike, lämpöliike ja niin edelleen. Emme voi olettaa, että oppilaat tuntevat ne entuudestaan, kun meillä opettajillakin on vaikeuksia käyttää ilmiötä vastaavia oikeita sanoja. Mikrotasoa koskevat vanhat käsitteet on syytä kerrata ja uudet käsitteet tulee tehdä oppilaille kunnolla tutuiksi. Eri lämpöilmiöitä kuvaillessani huomasin, miten vaikeaa on valita oikeat sanat kuvailemaan lämpöä mikrotasolla. Päädyin siihen, että yksinkertaisinta olisi selittää asia lämpöliikkeen avulla. Lämpöliike ei käsitteenä ehkä ilmennä lämmön syvällisintä luonnetta, mutta se on yleisellä tasolla luonteva tapa puhua lämmöstä mikrotasolla.

Mikroskooppisella lähestymistavalla lämpöoppiin on hyvät ja huonot puolensa, minkä vuoksi aiheita tulisi jatkossa tutkia enemmän myös kenttäoloissa. Mikrotason lämpöopin opetuksesta löytyy vähän tutkimuksia. Sen onnistuminen lukioissa nykyisellään riippuu paljon opettajien asiantuntevuudesta, oppikirjojen laadusta sekä oppilaiden pohjatiedosta ja muista valmiuksista. Mikroskooppinen maailma on joka tapauksessa oleellinen osa lämpöoppia. Se tekee lämpöilmiöt ymmärrettäviksi. Toivottavasti aineen hiukkasmalli saa jatkossa ansaitsemansa paikan lämpöopin opetuksessa.

## KIRJALLISUUS

- M. Ahtee, *A survey of the Finnish pupils' conceptions about thermal phenomena*, In: Novak, J.: *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, New York: Cornell University (distributed electronically), 1993
- H.C. von Baeyer, *Maxwellin Demoni: miksi lämpö hajaantuu ja aika virtaa eteenpäin*, Art House, 2000
- R. Baierlein, A statistical approach to the second law of thermodynamics using a computer simulation, *Am. J. Phys.* 50 120-4, 1994
- R. Botet, E. Trizac, *Teaching Physics with Computers*, *Eur. J. Phys.* 26 S1 doi:10.1088/0143-0807/26/5/E01, 2005
- A. Brook, H. Briggs, B. Bell, R. Driver, *Aspects of secondary students' understanding of heat: Full report*, Leeds: University of Leeds, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, 1984
- A. Brook, H. Briggs, B. Bell and R. Driver, *Secondary students' ideas about heat: Workshop pack, children's learning in science project*, Leeds, UK, University of Leeds, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, 1985
- D. Clark & D. Jorde, *Helping students revise disruptive experientially supported ideas about thermodynamics: Computer visualizations and tactile models*, Wiley Periodicals, Inc. *J Res Sci Teach* 41: 1-23, 2004
- R. Duit and S. Kesidou, *Students' understanding of basic ideas of the second law of thermodynamics*, *Res. Sci. Educ.* 18, 186-195, 1988
- A. Edna, *Development of the concept of heat in children*, *Sci. Educ.* 62, 389-399, 1978
- E. Engels, *The development of understanding of selected aspects of pressure, heat and evolution in pupils aged between 12-16 years*. Unpublished Ph.D. thesis, University of Leeds, Leeds, 1982
- G. L. Erickson, *Children's Conceptions of Heat and Temperature*, *Sci. Educ.* 63:221-230, 1979
- G. L. Erickson, *Children's Viewpoints of Heat: A Second Look*, *Sci. Educ.* 64:323-336, 1980
- G. L. Erickson, *Part A: An overview of pupils' ideas [on heat and temperature]*, in *Children's Ideas in Science*, edited by Rosalind Driver, Edith Guesne, and Andrée Tiberghien, (Milton Keynes, Open University Press, 1985), pp. 55-66.

- D. J. Grayson, A.G. Harrison and D. F. Treagust, *A multidimensional study of changes that occurred during a short course on heat and temperature. In A. Hendricks, (Ed), SAARMSE 3rd Annual Meeting, Vol 1, (pp.273-283). Cape Town, South Africa, 1995*
- S. M. Eskola, P. Ketolainen and F. Stenman, *Fotoni – Lämpö ja energia, 1. painos, Otava, 2000*
- A. G. Harrison, D. J. Grayson and D. F. Treagust, *Investigating a Grade11 student's evolving conceptions of heat and temperature. Journal of Research in Science Teaching, 36, 55-87, 1999*
- J. Hatakka, H. Saari, J. Sirviö, J. Viiri and S. Yrjänäinen, *Physica – Lämpö, 1. painos, WSOY, 2005*
- R. M Helsdon, *Teaching thermodynamics, Physics Education, 11, 261-262, 1976*
- S. Jara-Guerrero, *Misconceptions on heat and temperature. \*In: Novak, J.: Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics. Ithaca, NY: Cornell University (distributed electronically). Ithaca, New York: Cornell University (distributed electronically) #g6,P,T, 1993*
- C. H. Kautz, P. R. L. Heron, M. E. Loverude, and L C. McDermott, *Student understanding of the ideal gas law, Part I: A macroscopic perspective, Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195, 29 July, 2005*
- R. D. Knight, *Five Easy Lessons: Strategies for Successful Physics Teaching, Pearson Education, 2002*
- H. Lehto, R. Havukainen, J. Leskinen and T. Luoma, *Fysiikka – Lämpö ja aallot, 1. -3. painos, Tammi, 2005*
- E. L. Lewis and M. C. Linn, *Heat, energy and temperature concepts of adolescents, adults and experts: Implications for curricular improvements, Journal Research in Science Teaching, 31, 657-677, 1994*
- M. C. Linn and N. B. Songer, *Teaching Thermodynamics to Middle School Students: What Are Appropriate Cognitive Demands?, J. Res. Sci. Tchng. 28:885-918, 1991*
- M. E. Loverude, C. H. Kautz and P. R. L. Heron, *Student understanding of the first law of thermodynamics: Relating work to the adiabatic compression of an ideal gas, Am. J. Phys. 70, 137-148, 2002*
- G. R. Luera, C. Otto and P. W. Zitzewitz, *A conceptual change approach to teaching energy and thermodynamics to pre-service elementary teachers,” Journal of Physics Teacher Education Online, 2 (4), 3-8 May, 2005*

C. Ma-Naim, V. Bar, M. Finkental, *Teaching Thermodynamic Using the Particulate Model of Matter, February 12-14, 2001*  
[http://vcisrael.macam.ac.il/site/eng/show\\_file.asp?propid=E2A003&subject=a&page=pre\\_t](http://vcisrael.macam.ac.il/site/eng/show_file.asp?propid=E2A003&subject=a&page=pre_t)

D. E. Meltzer, *Investigation of students' reasoning regarding heat, work, and the first law of thermodynamics in an introductory calculus-based general physics course, Am. J. Phys. 72, 1432-1446, 2004*

G. S. M. Moore, *General, restricted and misleading forms of the First law of thermodynamics, Phys. Educ. 28, 228-237, 1993*

J. F. Mulligan, *Introductory College Physics, McGraw-Hill, Inc., 1985*

A. Newell and K. Ross, *Children's conception of thermal conduction - or the story of a woollen hat, \*School Science Review 78, 282, 33-38 #g6,g7,P,T, 1996*

H.C. Ohanian, *Physics, Second Edition Expanded, W.W. Norton & Company, 1989*

F. Reif, *Thermal physics in the introductory physics course: Why and how to teach it from a unified atomic perspective. Am. J. Phys. 67, 1051-1062, 1999*

P. H. van Roon, "Work" and "Heat" in Teaching Thermodynamics. In H.J. Schmidt, (Ed), *Empirical Research in Chemistry and Physics Education, Proceedings of the International Seminar (pp.135-148), University of Dortmund, Germany, 1992*

T. R. Shultz and M. Coddington, *Development of the concepts of energy conservation and entropy," J. Exp. Child Psych. 31, 131-153, 1981*

J. Solomon, *How children learn about energy – or does the first law come first?, Sch. Sci. Rev. 63(224), 415-422, 1982*

M. Sözbilir, *A Review of Selected Literature on Student's Misconceptions of Heat and Temperature, Bogazici University Journal of Education, Vol. 20(1), 2003*

A. Tiberghien, *The Development of Ideas with Teaching. In R.Driver, E. Guesne, and E. Tiberghien, (Eds), Children's Ideas in Science, (pp. 66-84), UK: Open University Press, 1985*

L. Viennot, *Experimental facts and ways of reasoning in thermodynamics: Learners' common approach. \*In: Tiberghien, A. , Jossem, E., Barojas, J.: Connecting research in physics education. Ohio: ICPE Books, 1-10, 1998*

M. Wiser, T. Amin, *"Is Heat Hot?" Inducing Conceptual Change by Integrating Everyday and Scientific Perspectives on Thermal Phenomena, Learning and Instruction, v11 n4-5 p331-55 Aug-Oct, 2001*

H.D. Young and R.A. Freedman, *University Physics with modern physics, 11<sup>th</sup> edition*, Addison Wesley, Longman, 2003

*Webster's Universal College Dictionary, Random House, Inc, 1997*

## LIITTEET

### Liite 1. Oppikirja-analyysi osa 1. Physica

<b>Physica</b>			
<b>Tiedon luonne</b>	<b>Esiintymismuoto</b>	<b>Yhteys</b>	<b>Kurssin vaihe</b>
Selittävä	Kappale	Mikro- ja makromallit	3.luku
Täsmäntävä	Esimerkki		
Selittävä	Korostava	Sisäenergia	
Selittävä	Kappale	Lämpöenergia ja lämpö	
Laaja selittävä	Taulukko		
Selittävä	Kappale	Lämmön siirtyminen	
Harhaanjohtava	Kuva		
Maininta	Kappale	Aineen lämpölaajeneminen	
Maininta	Kappale	Ideaalikaasu	5.luku
Maininta	Kappale	Avogadron laki	
Selittävä	Kappale	Lämpöliike	
Täsmäntävä	Kuva		
Selittävä	Kappale	Ideaalikaasu	
Täsmäntävä	Taulukko		
Maininta+laskuesimerkki	Extra	Ideaalikaasu	
Laaja selittävä	Kappale	Kaasulakien mikroskooppinen selitys	
Harhaanjohtava	Kuva	Latenttilämpö	6.luku
Harhaanjohtava	Kappale	Latenttilämpö	
Selittävä	Kappale	Olomuodonmuutoksen mikr.malli	
Harhaanjohtava	Kuva	Höyrynpaine	
Kertaus	Kappale	Sisäenergia	7.luku
Kertaus	Korostava	Sisäenergia	
Maininta	Kappale	Entropia	
Selittävä	Kappale	Energian huononeminen	
Selittävä	Kappale	Mahdottoman prosessin mikr.selitys	
Täsmäntävä	Kuva		

Oppikirja-analyysi osa 2. Fysiikka

<b>Fysiikka</b>			
<u>Tiedon luonne</u>	<u>Esiintymismuoto</u>	<u>Yhteys</u>	<u>Kurssin vaihe</u>
Selittävä	Kappale	Lämpötila+ absoluuttinen nollapiste	2.luku
Maininta	Kappale	Veden suurin tiheys	3.luku
Maininta	Kuva	Ideaalikaasu	
Laaja selittävä	Kappale	Ideaalikaasu	
Kokeellinen	Oppilastyö	Kaasumolekyylien liike	
Yhteenveto	Taulukko	Ideaalikaasu	
Kertaus	Kappale	Lämpötilan kineettinen tulkinta	
Kertaus	Kappale	Lämpötilan ja paineen kineettinen tulkinta	
Laaja selittävä	Kappale	Olomuodot	4.luku
Selittävä	Kuva	Olomuodot	
Epäselvä	Kuva	Brownin liike	
Maininta	Kappale	Haihtuminen	
Selittävä	Kappale	Kriittinen piste	
Maininta	Kappale	Lämmön määritelmä	5.luku
täsmäntävä	Kappale	Ominaissulamislämpö	6.luku
Selittävä	Kappale	Ominaishöyrystymislämpö	
Selittävä	Kappale	Sisäenergia	
Maininta	Kappale	2.pääsääntö	
Selittävä	Kappale	Lämmön johtuminen	

Oppikirja-analyysi osa 3. Fotoni

<b>Fotoni</b>			
<u>Tiedon luonne</u>	<u>Esiintymismuoto</u>	<u>Yhteys</u>	<u>Kurssin vaihe</u>
Harhaanjohtava	Kappale	Termodynaaminen tila	2.luku
Harhaanjohtava	Kappale	Kiinteän aineen ja nesteen tilanyhtälöt	3.luku
Selittävä	Kappale	Ideaalikaasu	4.luku
Maininta	Kappale	Höyrinpaine	5.luku
Harhaanjohtava	Kappale	Lämpöenergia	6.luku
Maininta	Kappale	Lämpökapasiteetti	
Hyvin laaja selittävä	Kappale	Olomuodot ja atomirakenne	
Selittävä	Extra	Kineettinen kaasuteoria	
Maininta	Kappale	Sisäenergia	
Maininta (epäselkeä)	Kappale	Entropia	
Laaja selittävä	Kappale	Lämpöopin toinen pääsääntö	
Harhaanjohtava	Extra	Lämmön siirtyminen	