

Mats Areskoug

Kroppens effekt

Den egna kroppen ger utmärkta exempel på energiomvandlingar, som är intressanta både för fysikern, kemisten och biologen.

I denna artikel presenteras ett experiment och några analysmetoder, som kan användas i undervisningen på olika nivåer, från högskolekurser till gymnasieskolans naturkunskap. Det kan även användas för enkla demonstrationer med yngre barn. Resultaten kan ge upphov till diskussioner kring energifrågor, koldioxidutsläpp, växthuseffekt, metabolism, arbetsmiljö, luftkvalitet mm.

Experimenten kan utföras med olika experimentell utrustning och med olika ambitionsnivå vad gäller beräkningar och analys. De har utvecklats och använts under flera år i kurser i miljöfysik vid Malmö högskola.



Figur 1. Kammare för mätning av kroppens effekt. Kammaren är byggd av värmeisolerande cellplastskivor och plywood. I kammaren finns mätinstrument för temperatur, luftfuktighet, koldioxidhalt och syrehalt.

Syfte

Människokroppen är ett biobränsle driven kraftvärmeverk. Vi förbränner biomassa i form av vegetabilisk och animalisk föda. Den kemiska energin omvandlas till andra energiformer. I experimentet studerar vi dessa energiomvandlingar genom att stänga in en person i en välisolerad kammare, och mäta temperatur, luftfuktighet, koldioxidhalt och syrehalt. Utifrån mätvärdena kan vi beräkna kroppens effekt på olika sätt. Experimentet kan ge underlag för djupare förståelse av begrepp som energi, effekt, förbränning, metabolism, förångning mm.

Utförande

Kammaren är lite större än en kubikmeter. Den är tillverkad av värmeisolerande cellplast och plywood. Dörren sluter tätt, men går att öppna inifrån. Det är helt ofarligt att sitta i den i 15 minuter och mer, men för mätningarna räcker det med 5 minuter.

För mätningarna av temperatur, luftfuktighet, koldioxidhalt och syrehalt kan man använda instrument för manuell avläsning, men de bör då gå att avläsa från utsidan av kammaren. Bekvämare både vid mätning och analys är att, som i det experiment som beskrivs här, använda datorbaserad mätning, t.ex. med Verniers mätprober, dataloggern *Lab Pro* och datorprogrammet *Logger Pro 3*.¹

Försökspersonen som sitter i kammaren bör vara lätt klädd. När hon klivit in skall medlaboranterna omedelbart stänga dörren och starta mätningarna.

Datorn registrerar nu mätvärdena en gång per sekund. Mätvärdena visas med det föreslagna mätsystemet direkt på datorskärmen både som momentana mätvärden och i grafer som funktion av tiden – en graf för vardera temperatur, luftfuktighet, koldioxidhalt och syrehalt.

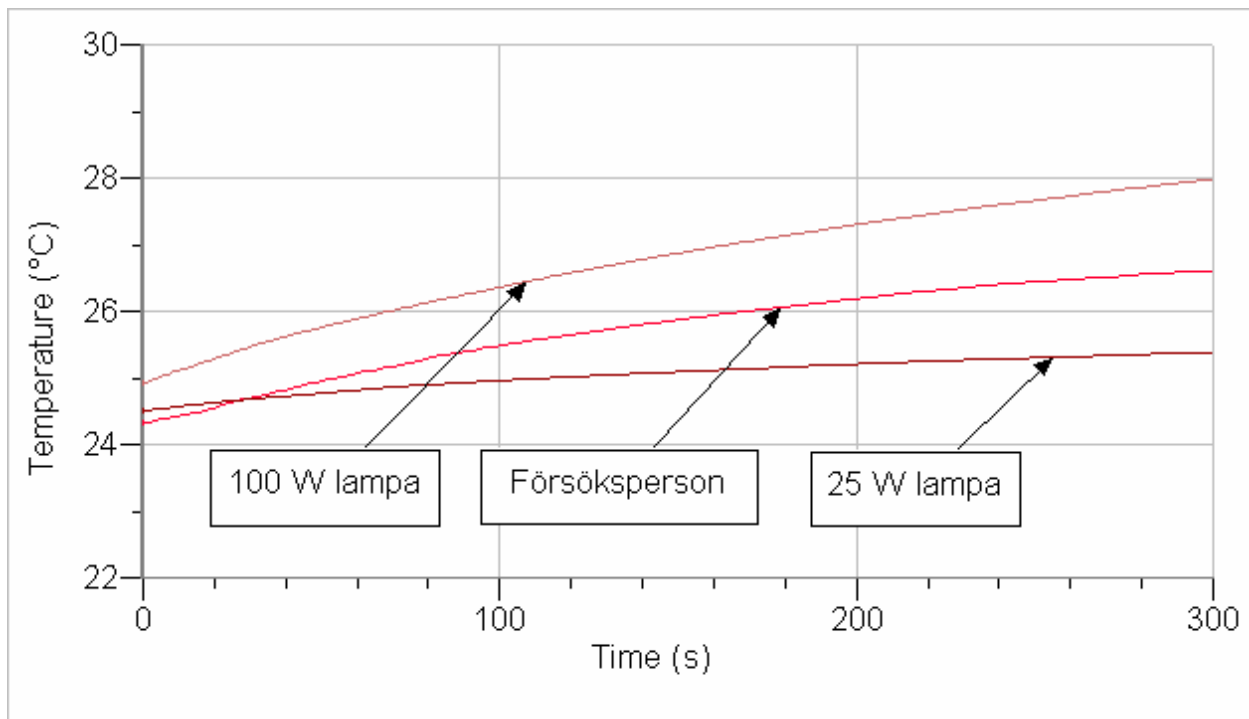
Försökspersonen skall sitta stilla i kammaren, men kan gärna vifta lite med t.ex. ett kollegieblock var 30:e sekund för att få luften att cirkulera.

I den första analysen skall vi beräkna kroppens effekt genom att studera temperaturökningen. Vi jämför med den temperaturökning vi får med känd effekt i kammaren. För enkelhetens skull väljer vi att använda två glödlampor, en på 25 watt, en på 100 watt. Efter att ha luftat ur kammaren, så att temperaturen är nere på samma nivå som från början, gör vi en mätserie med var och en av glödlamporna i kammaren.

¹ Kammare (demonterbar), mätprober och datalogger (Vernier) samt experimenthandledning säljs av Zenit ab läromedel, www.zenitlaromedel.se.

Temperaturmätningen

Temperaturen i kammaren brukar öka med 2-3 °C under 5 minuter. Man kan börja med att uppskatta kroppens effekt med ögonmått genom att jämföra lutningen på kurvorna för försöksperson respektive glödlampor. I Figur 2 visas exempel på resultat, med en vuxen man (80 kg) i kammaren. Mätningen är gjord på morgonen, med försökspersonen på fastande mage. Ur figuren ser vi att kroppens effekt är lite lägre än 100 W.



Figur 2. Temperatur som funktion av tid.

För en noggrannare analys kan analysprogrammet approximera mätpunkterna med en rät linje och beräkna dess riktningskoefficient k . Effekten P bör vara proportionell mot temperaturökningen per sekund, k .

$$P \propto k$$

Nu kan man beräkna P med hjälp av en eller båda lampmätningarna. I exemplet blir kroppens effekt $P = 73$ W.

Det ligger nära till hands att försöka beräkna effekten utifrån temperaturhöjningen och specifika värmekapaciteten för luften i kammaren. En sådan beräkning ger dock ett alldeles för lågt värde (cirka 15 watt). Det beror på att kammarens väggar, mätinstrument, kablar etc. också värms upp. Trots att kammaren är byggd så att dess värmekapacitet skall vara så liten som möjligt kommer den att dominera stort över luftens. Med den analysmetod som föreslås, jämförelse mot känd effekt, kalibreras denna felkälla bort.

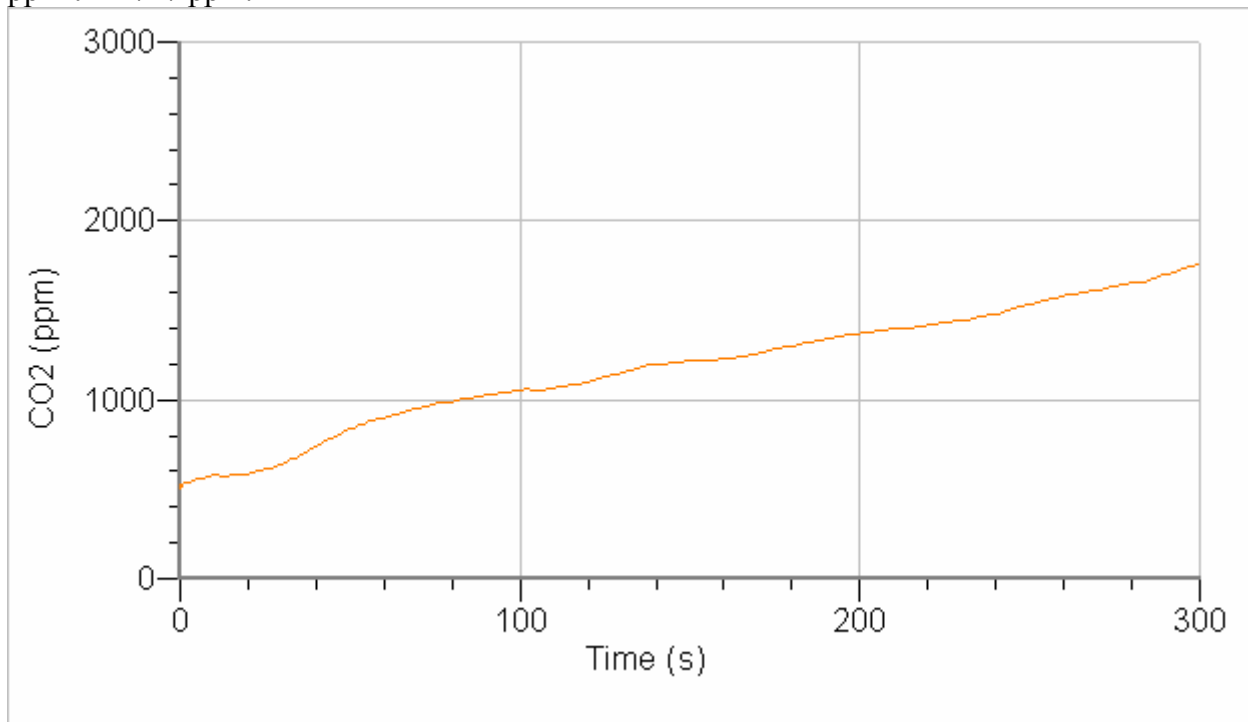
Koldioxidhalten

Vid metabolismen frigörs vatten och koldioxid. Vattnet frigörs i vätskeform i cellerna. Koldioxiden transporteras med blodet till lungorna och ventileras ut - vid vila i samma takt som det bildas. För en kropp i vila (basmetabolism) avges all frigjord energi som värme.

Något förenklat kan vi skriva reaktionsformeln för förbränningen så här:



Formeln säger, att då en mol druvsocker förbränns bildas 6 mol vatten och 6 mol koldioxid. Samtidigt frigörs energin 2,9 MJ. Eftersom vi i experimentet har mätt upp ökningen i koldioxidhalt bör vi kunna beräkna frigjord energi. I exemplet ökar koldioxidhalten från 561 ppm till 1727 ppm.



Figur 3. Koldioxidhalt vid experimentet kroppens effekt

Med hjälp av allmänna gaslagen kan ökningen i koldioxidhalt i ppm (volym) räknas om till materiemängd i mol, med t.ex. följande beräkningskedja:

$$\begin{aligned} \text{Ökning i halt } CO_2 &\rightarrow \text{volym } CO_2 \rightarrow \text{materiemängd } CO_2 \rightarrow \\ &\rightarrow \text{frigjord energi} \rightarrow \text{kroppens effekt} \end{aligned}$$

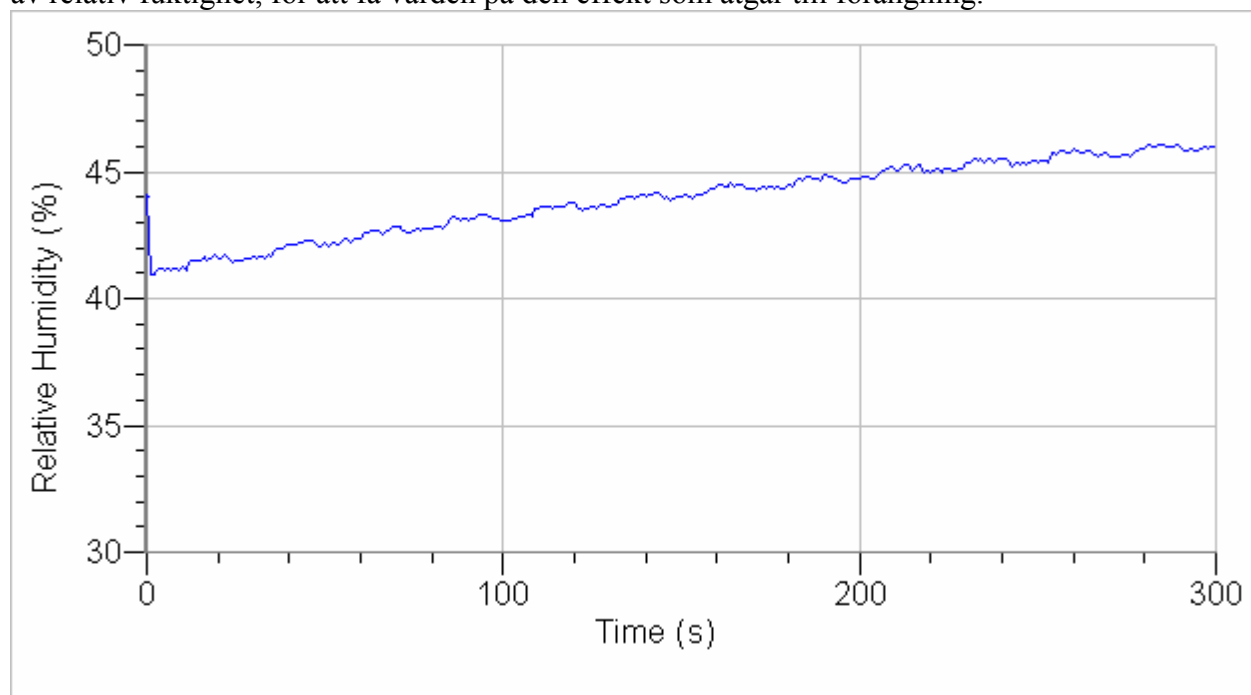
I det aktuella exemplet kan effekten beräknas till 95 W.

Vill man inte att laboranterna skall fördjupa sig i beräkningar kan läraren hjälpa till med en färdiguträknad omvandlingsfaktor – den är ju konstant för kammaren. En ökning av koldioxidhalten med 1000 ppm-enheter under 5 minuter motsvarar i den använda kammaren en frigjord effekt på 81 watt.

Vi jämför värdena på kroppens effekt mätt och beräknad utifrån temperaturökning respektive koldioxidökning. Finns det någon signifikant skillnad? Kan skillnaden förklaras av de olika mätmetoderna? Är det samma energimängd man mäter i båda fallen? Kan våra ännu inte utnyttjade mätdata för luftfuktighet eller syrehalt ge någon ledtråd?

Relativa fuktigheten

Fukthalten i luften stiger under försökets gång. Fukten kommer dels från utandningsluften, då vatten förångas i lungorna, dels från huden. En del av den energi som frigörs vid metabolismen används tydligen för förångning av vatten. Vi skall nu utnyttja även mätningen av relativ fuktighet, för att få värden på den effekt som åtgår till förångning.



Figur 4. Relativ fuktighet som funktion av tid.

Vi avläser temperatur och relativ fuktighet i början och slutet av mätperioden. Värdena hämtas från tidsintervallet 0-300s. Med hjälp av en tabell över luftens vatteninnehåll kan vi beräkna mängden vattenånga i kammaren vid experimentets början och slut. Sen kan energin och effekten för förångning beräknas. I det aktuella exemplet blir effekten 26 W.

Vi kan nu sammanställa resultaten:

<i>Effekt utifrån temperaturmätningen</i>	73 W
<i>Effekt utifrån koldioxidmätningen</i>	95 W
<i>Effekt utifrån luftfuktighetsmätningen</i>	26 W

Den effekt som utnyttjas för förångning är i ungefär rätt storlek för att förklara skillnaden mellan de två första effektvärdena.

Syremätningen

Syrehalten i kammaren minskar obetydligt, cirka 0,1-0,2 procentenheter. Mätnoggrannheten är mycket låg, eftersom differensen i mätvärden vid start och stopp är så liten. Eftersom 0,1 procent = 1000 ppm innebär det att minskningen i syrehalt är av samma storlek som ökningen i koldioxidhalt. Detta är i överensstämmelse med reaktionsformeln



Koldioxidhalten förändras under ett experiment från cirka 500 ppm till cirka 2000 ppm. En sådan ökning av koldioxidhalten ger en fullt märkbar försämring av luftkvaliteten, medan motsvarande sänkning av syrehalten med 0,1 procentenheter från normala cirka 20 % knappast märks. "Syret håller på att ta slut, vi måste vädra" säger man kanske när många människor sitter i en trång lokal. När luftkvaliteten upplevs som dålig är det i själva verket den ökade koldioxidhalten vi känner, i kombination med diverse kroppslukter och en förhöjd lufttemperatur och luftfuktighet. Ventilationsanläggningar i stora lokaler styrs ofta med koldioxidhalten och 1000 ppm används som gränsvärde för ventilation. Vid 1500 ppm är luften ofräsch och man känner trötthet och koncentrationssvårigheter. Arbetshygieniskt gränsvärde är 5000 ppm och vid 50 000 ppm (5 %) uppstår akuta skador (blodtrycksökning, svindel, kramp, medvetlöshet).

Kroppens effekt vid fysiskt arbete

Man kan göra en variant av försöket: Utför fysiskt arbete i kammaren, lyft hantlar eller gör armhävningar. Man måste då vara uppmärksam på att ämnesomsättningen i kroppen vid intensivt arbete sker med en anaerob process, där glykos spjälkas till mjölksyra, utan att syre upptas eller koldioxid avges. Det är därför mycket vanskligt att göra kvantitativ analys av mätningar på kroppens effekt under arbete.

Det kan ändå vara intressant att kvalitativt jämföra hur snabbt mätvärdena i kammaren förändras då man t.ex. lyfter hantlar. Låt exempelvis försökspersonen sitta stilla de första två minuterna och därefter göra ett intensivt kroppsarbete. Studera förändringen i graferna.

Vid hög effektutveckling i kroppen är det möjligt att kroppstemperaturen ökar något lite. En ökning av kroppstemperaturen med 0,1 grad på 5 minuter kräver lika stor effekt som hela basmetabolismen. Endast en liten förändring av kroppstemperaturen förrycker alltså mätresultaten.

Teoretisk bakgrund

Basmetabolismen är den ämnesomsättning som sker då kroppen är i vila, flera timmar efter intag av föda. Glukos förbränns i cellerna. Den frigjorda energin utnyttjas (via adenosintrifosfat, ATP) dels för att upprätthålla kroppstemperaturen, dels för att driva muskelarbete i hjärta och lungor. Detta muskelarbete sker inom kroppen och leder inte till att någon energi lagras – hela den omsatta energin omvandlas alltså till kroppsvärme.

Kroppens energibalans kan skrivas

$$M=W+C+E+H$$

där

M = effekt frigjord vid metabolismen

W = mekanisk effekt, t ex lyfteffekt när man springer upp i en trappa

C = termisk effekt (värmetransport till omgivningen) genom konvektion och värmestrålning

E = termisk effekt som åtgår för avdunstning från kroppsytan

H = termisk effekt som åtgår för avdunstning från andningsvägarna

Koldioxidmätningen fokuserar på den kemiska reaktionen i kroppen, storheten M . Temperaturmätningen fokuserar på den energi som avges genom konvektion och värmestrålning, C , som kan mätas i form av temperaturökning i kammaren.

Mekaniska effekten W är noll då försökspersonen sitter stilla. Om vi försummar energi avgiven genom förångning, $E+H$, bör M vara lika med C . Som en grov approximation stämmer detta, men förångningen motsvarar ofta 15-30 % av metabolismen. Det innebär att värdet på kroppens effekt enligt koldioxidmetoden, M , bör vara lika med det värde som erhålls med temperaturmetoden, C , plus värdet erhållet ur luftfuktighetsökningen, $E+H$.

Att fundera på

Koldioxidhalten i atmosfären ökar ständigt och vi riskerar att växthuseffekten kommer att förändra klimatet allvarligt. Är det rentav så, att 6 miljarder människors utandning är orsaken till den ökande koldioxidhalten? Den koldioxid vi andas ut kommer från kol i födan. Äter vi vegetabilisk föda så har kolet i födan bundits från luftens koldioxid vid fotosyntesen. Äter vi animalisk föda gäller detsamma, kolet har bara tagit omvägen genom köttjuret innan det når oss. I båda fallen återför vi alltså koldioxid som ursprungligen fanns i atmosfären. Kolet ingår i ett kretslopp med någon månads eller års cirkulationstid och det ger därför ingen nettoökning av luftens koldioxidhalt. Fossila bränslen däremot har lagrats i jorden inre i miljoner år och ger ett nettotillskott av koldioxid vid förbränning.

I kosttabeller kan man finna uppgifter om människokroppens energibehov per dygn. Hur stor effekt motsvarar det? Hur stämmer värdet med de vi mätt upp? Kosttabellerna ger genomsnittsvärden, men värdena varierar mellan individer. Det beräknade värdet blir ett medelvärde över dygnet, med mer eller mindre aktiva och rörliga perioder. I kammaren sitter man helt stilla och har lägre effekt.

Förhållandena i kammaren kan jämföras med de i ett klassrum. Ett normalt klassrum kan vara $6 \cdot 8 \cdot 3 \approx 150 \text{ m}^3$. Med 25 elever äger varje elev 6 m^3 luft, alltså cirka 5 gånger mer än vid experimentet. Samma förändringar i luftkvalitet som sker i experimentet bör alltså uppträda i ett oventilerat klassrum efter c:a 25 minuter. Den rekommenderade gränsen för ventilation, 1000 ppm, kan överskridas redan efter 10-15 minuter. Detta, i kombination med höjd temperatur och luftfuktighet, kan bidra till trötthet och minskad koncentration.

Mätnoggrannhet

En rad faktorer påverkar mätresultaten. Några av dem är: Kammaren är inte helt tät och den har också ett värmeutbyte med omgivningen. Luftcirkulationen i kammaren är dålig och det är

Kroppens effekt

Artikel för Fysikaktuellt våren 2005

Mats Areskoug

inte säkert att mätinstrumenten ger representativa värden. Värmekapaciteten i kammarens väggar är låg, men trögheten kan ändå påverka temperaturutvecklingen i luften i kammaren. Värmeöverföringen från kropp respektive glödlampa sker på olika sätt. Avgivning av värme och fukt från kroppen hindras till viss del av kläderna. Kroppens effekt varierar under dagen beroende på bland annat fysisk aktivitet och födointag. Den varierar också mellan individer. Den reaktionsformel vi använder ger en förenklad bild av metabolismen.

Resultaten kan därför variera starkt från de i exemplet. Mätningarna brukar dock alltid visa att den av metabolismen frigjorda effekten överstiger effekten för temperaturökning. Skillnaden brukar, med generös approximation, kunna förklaras av storleken på den effekt som utnyttjas för förångning.

Experimentets roll i undervisningen

Syftet med experimentet är inte att ge resultat med hög precision. Syftet är att ge underlag för en djupare förståelse för begrepp som energi, effekt, förbränning, metabolism, uppvärmning, förångning, specifik värmekapacitet, förångningsvärme mm.

I många sammanhang, speciellt med yngre barn eller med elever utan naturvetarbakgrund, passar det bäst att analysera experimentet kvalitativt, exempelvis som ett samtal medan kurvorna växer fram på datorskärmen:

- Vad händer?
- Varför stiger temperaturen?
- Var kommer koldioxiden ifrån?
- Varifrån kommer luftfuktigheten?
- Vad händer med syrehalten?
- Vilket mätvärde förändras snabbast?
- Hur hänger alltsammans ihop?
- Fundera över om något liknande händer i ett klassrum! Eller på hela jorden!
- Måste vi sluta andas för att stoppa den ökande växthuseffekten?

Experimentet brukar väcka stort intresse och leda till många diskussioner kring fysik, energi, klimat, global och lokal miljö, kostvanor och mycket annat.

Litteratur

- Arbete - Människa – Teknik*. Arbetarskyddsnämnden 1997. ISBN 91-7522-414-3. Människans värmebalans behandlas i samband med temperaturförhållanden och värmereglering i lokaler.
- Areskoug Mats, *Experiment i miljöfysik. Kroppens effekt*. 2004. Zenit ab läromedel, www.zenitlaromedel.se. Elevhandledning (grundläggande högskolenivå) och lärarhandledning med exempel och kommentarer,
- Areskoug Mats, *Miljöfysik. Energi och klimat*. 1999. ISBN 91-44-01114-8. Kolets kretslopp och koldioxidhaltens ökning behandlas i kapitlen *Materia, energi, liv* och *Växthuseffekten*.
- Hollins Martin, *Medical Physics*. 1992. ISBN 0-17-448188-8. Behandlar kroppens energiomsättning översiktligt. Gymnasienivå.
- Kuchel P.W., Ralston G.B., *Biochemistry*. ISBN 0-07-036149-5. Behandlar bl.a. metabolismen.
- Lenskjaer T., Aagren-Nielsen J., *Krop & Energi*. 1989. ISBN 87-00-43254-7. Gymnasiebok om kropp och energi. Många bra experiment och exempel.