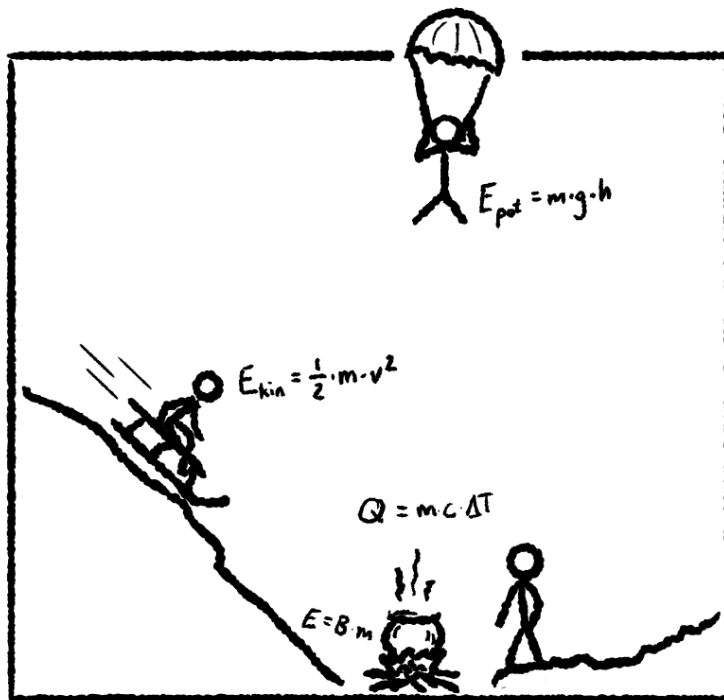


Mike Vandal Auerbach

# ENERGI

Version 1.0

5. januar 2026



## Energi

Version 1.0, 2026

I disse noter gives en kort gennemgang af energibegrebet eksemplificeret ved mekanisk og termisk/indre energi.

Værdien af forskellige konstanter er, med mindre andet er angivet, taget fra Databog Fysik Kemi, 11. udgave.[1]

Disse noter er skrevet til fysikundervisning på stx og må frit anvendes til ikke-kommercielle formål.

Noterne er skrevet vha. tekstformateringsprogrammet  $\LaTeX$ , se [www.tug.org](http://www.tug.org) og [www.miktex.org](http://www.miktex.org). Figurer og diagrammer er fremstillet i *pgf/TikZ*, se [www.ctan.org/pkg/pgf](http://www.ctan.org/pkg/pgf).

Disse og andre noter kan downloades fra [www.mathematicus.dk](http://www.mathematicus.dk).



Materialet er udgivet under en »Kreditering-Ikkekommerciel-Deling på samme vilkår 4.0 International«-licens (CC BY-NC-SA 4.0).

Mike Vandal Auerbach, 2026.

# Indhold

<b>1</b>	<b>Energiformer</b>	<b>5</b>
1-1	Energiomdannelser . . . . .	6
1-2	Energikvalitet . . . . .	7
1-3	Isolerede systemer . . . . .	8
1-4	Effekt og nyttevirkning . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Mekanisk energi</b>	<b>13</b>
2-1	Kinetisk energi . . . . .	13
2-2	Potentiel energi . . . . .	14
2-3	Bevarelse af mekanisk energi . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Termisk energi</b>	<b>19</b>
3-1	Tilstandsformer . . . . .	19
3-2	Temperatur . . . . .	20
3-3	Varmekapacitet og varmfylde . . . . .	21
3-4	Smelte- og fordampningsvarme . . . . .	24
3-5	Brændværdi . . . . .	27
	<b>Bibliografi</b>	<b>29</b>
	<b>Billedkilder</b>	<b>29</b>



## Energiformer

Når man påvirker en genstand der bevæger sig, udføres et såkaldt et arbejde. Dette arbejde går til at forandre noget ved genstanden, f.eks. flytte den mod tyngdekraften eller øge dens hastighed. Den fysiske størrelse *energi* er et mål for et systems evne til at udføre et arbejde. Hvis man løfter en genstand op i luften, har man tilført genstanden energi som man kan få tilbage hvis man slipper genstanden. Energi er altså et mål for hvor meget arbejde man kan få ud af et system, og energi måles i enheden joule (J). Enhedssymbolet for energi er *E*.

En genstand der er løftet over gulvet, har energi, og det samme gælder for en genstand i fart eller en genstand der er varmet op. Der er her tale om forskellige former for energi. Listen herunder beskriver en række forskellige energiformer.

**Kinetisk energi** kaldes også *bevægelsesenergi*. Det er energien af en genstand i fart.

**Potentiel energi** kaldes også *beliggenhedsenergi*. Når en genstand løftes, får den potentiel energi. Potentiel energi kan også skyldes f.eks. elektriske og magnetiske felter, men i disse noter bliver der kun gennemgået potentiel energi der skyldes tyngdekraften.

**Mekanisk energi** er en samlet betegnelse for kinetisk og potentiel energi.

**Termisk energi** kaldes også *indre energi*. Det er den energi en genstand har når den er varmet op.

**Kemisk energi** er energi lagret i kemiske bindinger. Disse bindinger kan dannes eller brydes ved kemiske reaktioner.

**Strålingsenergi** er energi i lys.<sup>1</sup>

**Kerneenergi** er energi lagret i atomkerners bindinger.

**Elektrisk energi** er energi der skyldes elektroners (eller andre elektrisk ladede partiklers) bevægelse.

Tabel 1.1 viser hvad der sker med en genstand der optager eller afgiver forskellige former for energi. Energi er altså noget der kan overføres fra en genstand til en anden. Generelt gælder følgende vigtige princip:

### *Energibevarelse*

Energi kan omdannes fra én form til en anden og energi kan overføres fra et system til et andet, men energi kan ikke opstå ud af intet eller forsvinde.

<sup>1</sup>Betegnelsen »lys« dækker i fysik over enhver for elektromagnetisk stråling – ikke kun synligt lys.

**Tabel 1.1:** I tabellen ses forskellige energiformer samt en beskrivelse af, hvad der sker med en genstand, der modtager eller afgiver denne energiform.

Energiform	Modtager	Afgiver
Kinetisk energi	Accelereres	Bremses
Potentiel energi	Løftes	Sænkes
Termisk energi	Opvarmes, smelter, fordamper	Nedkøles, størkner, fortættes
Kemisk energi	F.eks. fotosyntese	F.eks. forbrænding
Strålingsenergi	Absorberer lys	Afgiver lys
Kerneenergi	F.eks. opbygning af tunge atomer	Fusion, fission
Elektrisk energi	Elektroner opbremses	Elektroner accelereres

Man kan altså ændre energien af en genstand eller et system, men energien skal komme et sted fra – den kan ikke opstå ud af ingenting. Idet energien er bevaret skal der altid være den samme mængde energi til stede før og efter en eller anden proces.

### Øvelse 1.1

En varm kop kaffe står på et bord i et tog der holder stille.

- a) Hvilke former for energi har kaffekoppen?

Nu betyder toget at køre.

- b) Ændrer det på kaffekoppens energi?

## 1-1 Energiomdannelser

En energiform kan altså konverteres til en anden. I dette afsnit beskrives nogle eksempler på energiomdannelser.

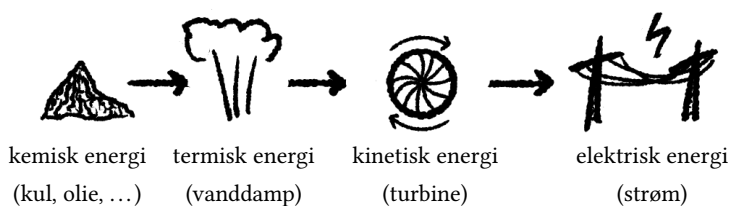


Figur 1.2: Fynsværket.[8]

### Eksempel 1.2

Figur 1.2 viser et billede af Fynsværket som er et stort kraftvarmeværk. Her brændes kul, olie og naturgas for at lave strøm (og fjernvarme).

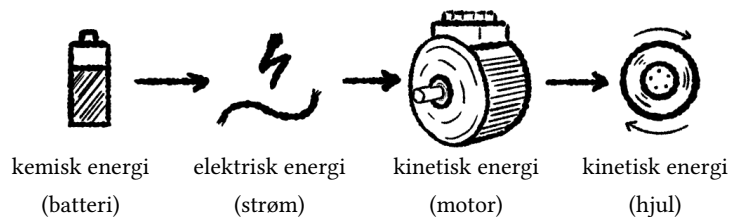
Et kraftvarmeværk producerer altså strøm, dvs. elektrisk energi. For at gøre det, brænder man fossile brændstoffer. Herved bliver den kemiske energi i brændstofferne omdannet til termisk energi der bruges til at varme vand op. Vandet fordamper så, og noget af den termiske energi bliver til kinetisk energi i vanddampen der driver en turbine. Turbinen omsætter den kinetiske energi til elektrisk energi der så kan sendes ud til forbrugeren via ledningsnettet:



For hver eneste energiomdannelse i eksemplet ovenfor vil der være et energitab i form af varme, dvs. det er ikke al den kemiske energi der er bundet i de fossile brændstoffer, som bliver til elektrisk energi. På et kraftvarmeværk minimerer man dette tab ved at bruge noget af overskudsvarmen til fjernvarme i stedet for bare at lukke den ud til omgivelserne, men man kan aldrig få tabet helt ned på 0.

### Eksempel 1.3

Hvis man kører en tur i en elbil, sker der også en række energiomdannelser. Her bliver den kemiske energi i bilens batteri omdannet til elektrisk energi som i motoren bliver omsat til kinetisk energi der overføres til bilens hjul:



I eksemplet med bilen, er der også et energitab i hver eneste omdannelse af energi. Herudover er bilen påvirket af gnidningskræfter: Luftmodstand, gnidning mellem hjulene og vejen og gnidning i de enkelte bevægelige dele i bilen.

Hvis bilen kører ligeud med en konstant hastighed, vil al den energi der hentes ud af batteriet, lige præcis gå til at overvinde gnidningskræfterne på bilen. Idet den kinetiske energi af bilen ikke ændres, bliver al den kemiske energi fra batteriet altså omdannet til termisk energi.

#### Øvelse 1.4

En kedel med vand opvarmes over et lejrbrål.

- a) Beskriv de energiomdannelser der finder sted.

#### Øvelse 1.5

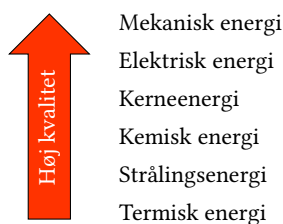
En solcelledrevet havelampe består af nogle solceller der kan omsætte Solens lys til elektrisk energi, et batteri og en pære der kan lyse. Batteriet oplades om dagen når Solen skinner, og lampen lyser så når det bliver mørkt.

- a) Beskriv de energiomdannelser der finder sted.

## 1-2 Energikvalitet

Energi er et udtryk for et systems evne til at udføre et arbejde, men det betyder ikke at al energien uden videre kan konverteres til arbejde. Som nævnt ovenfor vil der som regel dannes varme når en energiform omdannes til en anden. I sidste ende betyder det også at ikke alle energiformer kan konverteres til arbejde »lige godt«.

Man taler her om forskelle i *energikvalitet*. Når man siger at en energiform har høj kvalitet, mener man at energien kan konverteres til arbejde



**Figur 1.3:** Energiformer arrangeret efter energikvalitet.

med et meget lille tab. På figur 1.3 kan man se energiformerne arrangeret efter energikvalitet.

Som det fremgår af figuren, er termisk energi den energiform der har den laveste energikvalitet. At genstande har termisk energi, skyldes at de mikroskopiske partikler stof består af (dvs. atomer eller molekyler) altid er i bevægelse. Termisk energi er faktisk et udtryk for den samlede kinetiske og kemiske energi af de partikler en genstand består af. Idet bevægelserne af de mikroskopiske partikler er tilfældige, og selv en lille bitte smule af et stof indeholder milliarder og atter milliarder af atomer/molekyler, er denne energi meget uordnet. Termisk energi er derfor enormt svær at udnytte, og man kan kun konvertere den til en anden energiform i de tilfælde hvor man kan opretholde en temperaturforskel mellem to genstande.

Som det fremgår af det ovenstående, kan energikvalitet altså også ses som et mål for hvor »ordnet« energien er, og her er termisk energi den energiform der er mest uordnet. Kinetisk og potentiel energi er til gengæld meget ordnede energiformer, idet de mikroskopiske partikler i et stof her alle bevæger sig i samme retning eller ligger samme sted. Energien er derfor let at konvertere til andre energiformer. Men uanset hvor »let« en energiform kan konverteres vil der i praksis altid være et lille energitab i form af varme. Ingen proces kan altså konvertere energi 100% effektivt.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Med mindre man vil konvertere det hele til termisk energi.

### 1-3 Isolerede systemer

Når man analyserer et problem i fysik – enten teoretisk eller ved at udføre et eksperiment – kalder man de genstande man analyserer, for et *system*. Et system er altså et lille hjørne af Universet som man betragter afskåret fra resten. Skal man beskrive et systems egenskaber, skelner man mellem *isolerede*, *lukkede* og *åbne* systemer.

**Isoleret system** Et system der er fuldstændigt afskåret fra resten af Universet. Der kan hverken ske transport af energi eller masse ind eller ud af systemet.

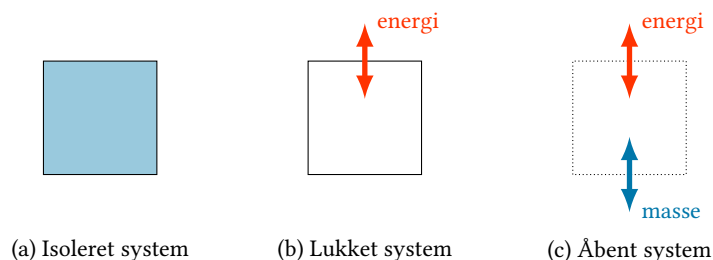
**Lukket system** Et system hvor der godt kan være transport af energi ind og ud af systemet, men ikke af masse.

**Åbent system** Et system der er fuldstændigt åbent for transport af både masse og energi.

Figur 1.4 illustrerer forskellen på de tre systemer.

Ideelt set vil man gerne have at der er tale om et såkaldt *isoleret* system, dvs. et system der er fuldstændigt afskåret fra resten af Universet, sådan at

**Figur 1.4:** I det isolerede system er der ingen energi- eller masseudveksling med omgivelserne. I det lukkede system kan der ske energiudveksling, men ingen udveksling af masse, mens der i det åbne system kan være udveksling af både energi og masse.



(a) Isoleret system

(b) Lukket system

(c) Åbent system

der ikke forekommer transport af energi eller masse ind eller ud af systemet. Så skal man nemlig ikke tænke på interaktioner med alt hvad der er uden om systemet.

Det er ikke muligt i praksis at skabe et fuldstændigt isoleret system. Når man stiller et fysikforsøg op, vil det dog ofte være sådan at man betragter det system man kigger på som isoleret – og dette vil naturligvis kun være tilnærmelsesvis rigtigt. Men tilnærmelsen er som regel god hvis man kun kigger på systemet i et begrænset tidsrum (f.eks. så kort tid at en evt. energitransport til omgivelserne er så lille at man kan se bort fra den).

#### Øvelse 1.6

En termokande med kaffe står på et bord.

- a) Er termokanden et isoleret, lukket eller åbent system?

## 1-4 Effekt og nyttevirkning

Hvis man fylder en elkedel med vand og tænder for den, vil den efter et stykke tid have omsat en elektrisk energi på 1000 J til termisk energi. Tænder man for en elektrisk pære vil den også på et tidspunkt have omsat 1000 J elektrisk energi til lysenergi (og noget termisk energi). Forskellen på de to situationer er at det tager pæren meget længere tid at omsætte 1000 J end det tager elkedlen. Man siger at de to apparater har forskellig *effekt*.

Effekt er et mål for hvor hurtigt energi bliver omsat. Der er altså tale om en slags »energiomsætningshastighed«. Man beregner effekten som forholdet mellem den omsatte energi og den tid der er gået.

#### Effekt

Effekt er energiændring pr. tid:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}.$$

Idet man dividerer en energi med en tid, bliver SI-enheden for effekt joule pr. sekund (J/s); denne enhed har fået navnet *watt* (W) efter James Watt (1736–1819), en skotsk opfinder hvis dampmaskine i høj grad bidrog til den industrielle revolution i det 19. århundrede.[2] Der gælder altså at

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} .$$

#### Eksempel 1.7

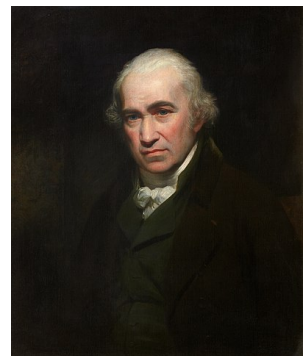
Hvis man måler at en elektrisk pære bruger energien 204 J i løbet af et minut, kan man udregne pærens effekt. Man har

$$\Delta E = 204 \text{ J}$$

$$\Delta t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s} ,$$

dvs.

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{204 \text{ J}}{60 \text{ s}} = 3,4 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 3,4 \text{ W} .$$



Figur 1.5: James Watt.[6]

Pærens effekt er altså 3,4 W.

### Eksempel 1.8

En mikrobølgeovn omsætter energi med en effekt på 800 W. Hvor meget energi bliver der omsat hvis mikrobølgeovnen er tændt i 3 min?

Her ved man at

$$P = 800 \text{ W}$$

$$\Delta t = 3 \text{ min} = 3 \cdot 60 \text{ s} = 180 \text{ s} .$$

Man ved også at

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E = P \cdot \Delta t ,$$

og den omsatte energi er så

$$\Delta E = 800 \text{ W} \cdot 180 \text{ s} = 144\,000 \text{ J} = 144 \text{ kJ} .$$

Det er vigtigt i denne sammenhæng at være opmærksom på at effekten ikke siger noget om hvor meget energi der omsættes, men hvor hurtigt det går. Når en bil kører 80 km/h, siger farten ikke noget om hvor langt bilen kører. På præcis samme måde ved man heller intet om hvor meget energi der bliver omsat når effekten er f.eks. 800 W; hvis man vil vide det skal man også vide hvor lang tid der går. Mikrobølgeovnen i eksemplet ovenfor omsatte f.eks. en energi på 144 kJ på 3 min. Hvis ovnen havde kørt i dobbelt så lang tid ville den have omsat dobbelt så meget energi, men effekten vil stadig være 800 W.

#### Øvelse 1.9

En elkedel omsætter en energi på 108 kJ på 90 s.

- a) Bestem elkedlens effekt.

#### Øvelse 1.10

Et tv har en effekt på 106 W.

- a) Hvor meget energi omsætter tv'et hvis det er tændt i 2 timer?

Prisen for den elektriske energi er 70 øre pr. megajoule.

- b) Hvor meget koster det at have fjernsynet tændt i 2 timer?

#### Øvelse 1.11

Når man får leveret elektrisk energi fra et elselskab, angives energien ofte i enheden kilowatt-time (kWh). 1 kWh er den mængde energi der omsættes når man omsætter energi med en effekt på 1 kW i en time.

- a) Hvor mange sekunder er der på en time?  
b) Hvor mange joule svarer 1 kWh til?

Ovenfor er det blevet beskrevet hvordan enhver omsætning af energi også giver et tab i form af varme. I en proces hvor der omsættes energi, vil det altså ikke være al energien der bliver brugt til det man egentlig vil. Hvis man f.eks. koger vand i en elkedel, er det ikke kun vandet der bliver varmt, men også selve elkedlen, og noget af varmen afgives også til omgivelserne.

Hvis man skal sammenligne forskellige processer hvor der omdannes energi, har man brug for et mål for effektiviteten af energiomdannelsen. Dette kalder man *nyttevirkningen*. Nyttevirkningen er forholdet mellem den energi der udnyttes og den totale omsatte energi. Størrelsessymbolet for nyttevirkning er  $\eta$  (det græske bogstav »eta«).

#### Nyttevirkning

$$\eta = \frac{E_{\text{udnyttet}}}{E_{\text{total}}} .$$

Nyttevirkningen bliver således et tal der ligger mellem 0 og 1. Hvis tallet er 0, betyder det at intet af energien bliver udnyttet til det egentlige formål, mens en værdi på 1 betyder at der intet tab er. Bemærk at nyttevirkningen ikke har nogen enhed idet den er lig med forholdet mellem to energier.

#### Eksempel 1.12

For at varme 1 L vand op fra 10°C til 100°C, skal man tilføje en varme på 376,2 kJ. 1 L vand med en temperatur på 10°C hældes i en elkedel med en påtrykt effekt på 1800 W. Elkedlen er 4 minutter om at varme vandet op til kogepunktet.

Hvis man vil beregne elkedlens nyttevirkning, skal man først kende den totale omsatte energi. Denne kan beregnes ud fra effekten og tiden. Man har

$$P = 1800 \text{ W}$$

$$\Delta t = 4 \text{ min} = 4 \cdot 60 \text{ s} = 240 \text{ s} .$$

Den omsatte energi er så

$$E_{\text{total}} = P \cdot \Delta t = 1800 \text{ W} \cdot 240 \text{ s} = 432\,000 \text{ J} = 432 \text{ kJ} .$$

Da det kun er 376,2 kJ af energien der udnyttes, bliver nyttevirkningen

$$\eta = \frac{376,2 \text{ kJ}}{432 \text{ kJ}} = 0,87 .$$

Når nyttevirkningen er 0,87, betyder det at 87% af den totale omsatte energi går til at varme vandet op, resten er tab.

**Øvelse 1.13**

En kaffemaskine sluttet til en energimåler. Der hældes 1 L vand i maskinen som derefter tændes. Når kaffen er færdig har vandet en temperatur på  $92^{\circ}\text{C}$ , og energimåleren kan aflæses til 520 kJ.

- a) Hvad er nyttevirkningen af kaffemaskinen når det kræver en energi på 322 kJ at varme 1 L vand op fra  $15^{\circ}\text{C}$  til  $92^{\circ}\text{C}$ ?
- b) Hvad går resten af energien til?

## Mekanisk energi

Den mekaniske energi er summen af den kinetiske og den potentielle energi. Dvs. den mekaniske energi  $E_{\text{mek}}$  af en genstand kan beregnes som

### *Mekanisk energi*

$$E_{\text{mek}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} ,$$

hvor  $E_{\text{kin}}$  er den kinetiske, og  $E_{\text{pot}}$  er den potentielle energi.

Før man kan beregne denne, er man nødt til at vide hvordan man beregner den kinetiske og den potentielle energi.

### 2-1 Kinetisk energi

Sammenligner man en tung og en let genstand der begge har samme fart, må det have krævet mere energi at få den tunge genstand op i fart. Tilsvarende må der også overføres mere energi, jo højere fart man vil opnå. Den kinetiske energi afhænger altså både af masse og fart. En egentlig matematisk analyse ligger ud over formålet med disse noter, men man kan vise at det følgende gælder.

### *Kinetisk energi*

Den kinetiske energi af en genstand med farten  $v$  er

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 ,$$

hvor  $m$  er genstandens masse.

#### **Eksempel 2.1**

En person sparker til en fodbold på 433 g så den opnår en hastighed på 25 m/s. Dvs. fodboldens masse og fart er

$$m = 433 \text{ g} = 0,433 \text{ kg}$$

$$v = 25 \text{ m/s} .$$

Boldens kinetiske energi er altså

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 0,433 \text{ kg} \cdot (25 \text{ m/s})^2 = 135 \text{ J} .$$

**Øvelse 2.2**

En tennisbold med en masse på 57,9 g kommer flyvende med en fart på 35,8 m/s.

- a) Hvad er boldens kinetiske energi?

**Øvelse 2.3**

En bil med en masse på 1200 kg kører med en hastighed på 83 km/h.

- a) Bestem bilens hastighed i meter pr. sekund.  
b) Hvad er bilens kinetiske energi?

**Øvelse 2.4**

En cykelrytter cykler ned ad en bakke. Den samlede masse af cyklen og rytteren er 79 kg, og den kinetiske energi er 3,06 kJ.

- a) Bestem cyklens hastighed.  
b) Bestem cyklens hastighed i kilometer pr. time.

## 2-2 Potentiel energi

I dette kapitel ses kun på potentiel energi i et tyngdefelt, dvs. potentiel energi der skyldes tyngdekraften.<sup>1</sup> Her har en genstand mere potentiel energi jo højere oppe den befinder sig. Tilsvarende har en genstand også mere potentiel energi, jo større masse den har. Det viser sig at en genstands potentielle energi er givet ved denne formel:

<sup>1</sup>Potentiel energi kan også skyldes f.eks. elektriske og magnetiske felter, men beskrivelsen heraf ligger ud over formålet med disse noter.

*Potentiel energi*

Den potentielle energi af en genstand er

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h ,$$

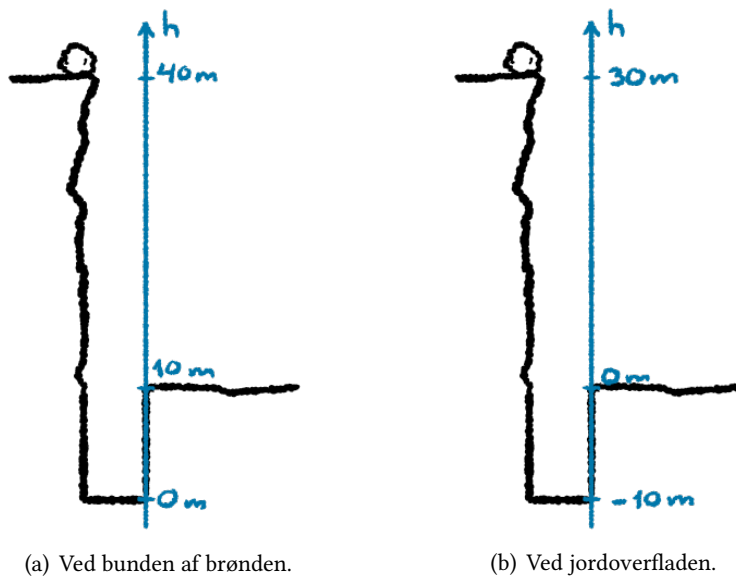
hvor  $m$  er genstandens masse,  $g = 9,82 \text{ N/kg}$  er tyngdeaccelerationen, og  $h$  er den højde genstanden befinder sig i.

Det fremgår ikke af det ovenstående hvor højden er 0 – er det ved jordoverfladen? Hvad hvis man graver et dybt hul, er højden så 0 på bunden af hullet? Det viser sig at det er ligegyldigt hvor man vælger at sige at højden er 0.

**Eksempel 2.5**

En stor sten, der vejer 12 kg, ligger på toppen af en 30 m høj klippe. For foden af klippen er der gravet en 10 m dyb brønd (se figur 2.1). Hvis man sætter højden til 0 ved bunden af brønden, er højden 40 m ved toppen af klippen og 0 m ved bunden. Den potentielle energi ved toppen af klippen og ved bunden er så

$$E_{\text{pot},1} = m \cdot g \cdot h = 12 \text{ kg} \cdot 9,82 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 40 \text{ m} = 4,7 \text{ kJ}$$



**Figur 2.1:** En stor sten befinder sig på en 30 m høj klippe. For foden af klippen er der gravet en 10 m dyb brønd. Situationen kan analyseres både ved at sætte  $h = 0$  ved jordoverfladen og ved bunden af brønden.

$$E_{\text{pot},2} = m \cdot g \cdot h = 12 \text{ kg} \cdot 9,82 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 0 \text{ m} = 0 \text{ kJ} .$$

Sætter man i stedet  $h = 0$  ved jordoverfladen, får man den potentielle energi ved toppen og ved bunden til

$$E_{\text{pot},1} = m \cdot g \cdot h = 12 \text{ kg} \cdot 9,82 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot 30 \text{ m} = 3,5 \text{ kJ}$$

$$E_{\text{pot},2} = m \cdot g \cdot h = 12 \text{ kg} \cdot 9,82 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot (-10 \text{ m}) = -1,2 \text{ kJ} .$$

Men uanset om man vælger det ene eller det andet udgangspunkt, får stenen den samme ændring i potentiel energi når den falder fra toppen af klippen ned på bunden af brønden. Med  $h = 0$  ved bunden af brønden får man nemlig

$$\Delta E_{\text{pot}} = E_{\text{pot},2} - E_{\text{pot},1} = 0 \text{ kJ} - 4,7 \text{ kJ} = -4,7 \text{ kJ} ,$$

og med  $h = 0$  ved jordoverfladen får man

$$\Delta E_{\text{pot}} = E_{\text{pot},2} - E_{\text{pot},1} = 3,5 \text{ kJ} - (-1,2 \text{ kJ}) = -4,7 \text{ kJ} .$$

Bemærk i øvrigt at energitilvæksten er negativ idet stenen *mister* potentiel energi når den falder ned fra klippen.

Fordi man altid kigger på *tilvækster* i energi, betyder det altså ikke noget hvor man sætter højden til 0. Stenen i eksemplet ovenfor falder 40 m ned fra klippen, og den mister den samme potentielle energi, uanset om man vælger at sige at den falder fra 40 m til 0 m eller fra 30 m til  $-10$  m. I praksis er det måske nemmest at regne fra 40 m til 0 m, men det ene valg er i princippet lige så godt som det andet.

Når man beregner den potentielle energi af en genstand, skal man derfor starte med at vælge hvor man sætter højden til 0. Det er et valg der

ikke har nogen fysisk betydning, men det kan til gengæld have betydning for hvor nemt det er at regne på den givne situation.

### Øvelse 2.6

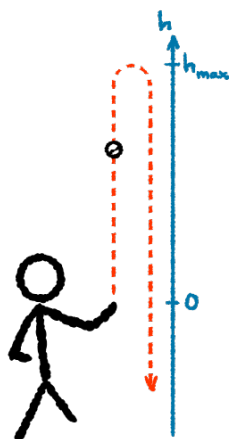
En 1,5 kg tung kasse står på et 80 cm højt bord.

- a) Beregn kassens potentielle energi.

### Øvelse 2.7

Den potentielle energi for stenen i eksempel 2.5 faldt med 4,7 kJ.

- a) Hvad er denne energi blevet omdannet til?



Figur 2.2: En bold kastes lodret opad.

## 2-3 Bevarelse af mekanisk energi

Den mekaniske energi af en genstand er, som tidligere nævnt, summen af dens kinetiske og dens potentielle energi. Hvis man kaster en bold opad (se figur 2.2), vil bolden have en kinetisk energi i begyndelsen som efterhånden omdannes til potentiel energi. Bolden bevæger sig herved langsommere og langsommere indtil den når sin maksimale højde  $h_{\max}$ . Herefter vil bolden falde tilbage igen; her falder den potentielle energi, og den kinetiske energi stiger.

Hvis man ser bort fra gnidningskræfter, bliver den kinetiske energi omdannet til potentiel energi (og omvendt på vejen ned), men den mekaniske energi, som er summen af de to, er konstant. Generelt har man det følgende resultat.

### Bevarelse af mekanisk energi

For en genstand der ikke påvirkes af gnidningskræfter, er den mekaniske energi konstant, dvs.

$$\Delta E_{\text{mek}} = 0$$

hvilket er det samme som

$$\Delta E_{\text{kin}} + \Delta E_{\text{pot}} = 0 .$$

### Eksempel 2.8

Hvis bolden på figur 2.2 har en masse på 120 g og kastes opad med en fart på 8,9 m/s, har den i begyndelsen den kinetiske energi

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,120 \text{ kg} \cdot (8,9 \text{ m/s})^2 = 4,65 \text{ J} .$$

Når bolden er nået sin maksimale højde, er den kinetiske energi 0, dvs. tilvæksten i kinetisk energi er

$$\Delta E_{\text{kin}} = 0 \text{ J} - 4,65 \text{ J} = -4,65 \text{ J} .$$

Den mekaniske energi er konstant, så

$$\Delta E_{\text{kin}} + \Delta E_{\text{pot}} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta E_{\text{pot}} = -\Delta E_{\text{kin}} ,$$

dvs.

$$\Delta E_{\text{pot}} = -(-4,65 \text{ J}) = 4,65 \text{ J} .$$

Hvis man sætter den potentielle energi til 0 ved udgangspunktet, er boldens potentielle energi altså vokset til 4,65 J.

Den potentielle energi er givet ved  $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ , så man kan beregne højden som

$$h = \frac{E_{\text{pot}}}{m \cdot g} .$$

Derfor vil boldens maksimale højde være

$$h = \frac{4,65 \text{ J}}{0,120 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ N/kg}} = 3,9 \text{ m} .$$

Bolden kommer altså op i en højde på 3,9 m fra udgangspunktet.

Som eksemplet ovenfor viser, kan man beregne hvor en genstand kommer op når man kaster den. Omvendt kan man også beregne hvor stor en fart en faldende genstand kommer op på.

### Eksempel 2.9

Stenen på figur 2.1 har en masse på 12 kg, og den falder 40 m ned. Stenens potentielle energi når den ligger på toppen af klippen, er altså

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 12 \text{ kg} \cdot 9,82 \text{ N/kg} \cdot 40 \text{ m} = 4714 \text{ J} .$$

Stenen får derfor en tilvækst i potentiel energi på

$$\Delta E_{\text{pot}} = -4714 \text{ J} ,$$

og tilsvarende vil tilvæksten i kinetisk energi være

$$\Delta E_{\text{kin}} = -\Delta E_{\text{pot}} = 4714 \text{ J} .$$

Hvis stenens fart i begyndelsen er 0, bliver den kinetiske energi derfor 4714 J lige inden stenen rammer bunden af brønden. Den kinetiske energi kan beregnes som

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \Leftrightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m}} .$$

Stenen opnår altså en fart på

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 4714 \text{ J}}{12 \text{ kg}}} = 28 \text{ m/s} .$$

**Øvelse 2.10**

En sten med en masse på 12,7 g kastes opad med en fart på 4,2 m/s.

- Bestem stenens mekaniske energi.
- Hvor højt kommer stenen op før den falder ned igen?
- Med hvilken fart rammer stenen udgangspunktet?

**Øvelse 2.11**

En bold med massen 43 g slippes 1,5 m over gulvet.

- Bestem den kinetiske og potentielle energi lige inden bolden slippes.
- Bestem den potentielle og den kinetiske energi når bolden er 50 cm over gulvet.
- Bestem boldens hastighed 50 cm over gulvet.
- Bestem den kinetiske energi lige inden bolden rammer gulvet.
- Med hvilken fart rammer bolden gulvet?

Det viser sig at farten af en genstand der falder fra en bestemt højde, ikke er afhængig af genstandens masse.<sup>2</sup>

**Eksempel 2.12**

Figur 2.3 viser en genstand der falder fra højden  $h$  (position 1) til højden 0 (position 2). Lige når faldet begynder (position 1), er farten 0, dvs. den kinetiske energi er 0. Når genstanden rammer jorden, er den potentielle energi til gengæld 0.

Idet den mekaniske energi er konstant, har man at

$$E_{\text{kin},1} + E_{\text{pot},1} = E_{\text{kin},2} + E_{\text{pot},2} ,$$

dvs.

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h .$$

I denne ligning kan man isolere farten  $v$ :

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h \quad \Leftrightarrow$$

$$\frac{1}{2} \cdot v^2 = g \cdot h \quad \Leftrightarrow$$

$$v^2 = 2 \cdot g \cdot h \quad \Leftrightarrow$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} .$$

Farten afhænger altså ikke af genstandens masse.

**Øvelse 2.13**

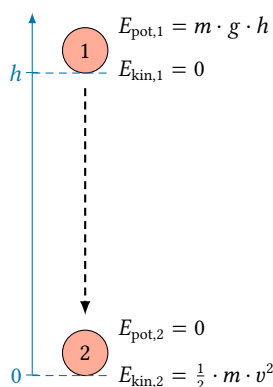
En cyklist holder stille på toppen af en bakke. Massen af cyklisten og cyklen er tilsammen 67 kg, og bakken er 28 m høj.

- Beregn cyklistens potentielle energi.

Cyklisten kører nu ned ad bakken uden at træde i pedalerne.

- Hvad er cyklistens fart ved foden af bakken?

<sup>2</sup>Dette gælder kun hvis man ser bort fra enhver form for gnidningskræfter (bl.a. luftmodstand). Men på korte strækninger kan man uden problemer se bort herfra.



**Figur 2.3:** En genstand falder fra højden  $h$  til højden 0.

## Termisk energi

Termisk energi (også kaldet indre energi) er energi der er lagret inde i et stof. Ethvert stof består af atomer eller molekyler, og disse ligger aldrig helt stille. De mikroskopiske partikler som stoffet er lavet af, vil altid vibrere, rotere osv., og de vil også påvirke hinanden med kræfter. Den termiske energi er derfor summen af den mekaniske og kemiske energi af disse mikroskopiske partikler.

Idet den bevægelse de mikroskopiske partikler har, ikke er ordnet, giver det ikke mening at kigge på f.eks. den kinetiske energi af en enkelt partikel. I stedet kigger man på den gennemsnitlige kinetiske energi af partiklerne. Denne kommer til udtryk gennem en genstands temperatur – jo mere bevægelse der er, jo højere er temperaturen.<sup>1</sup>

Man kan ændre en genstands termiske energi på to måder. Den ene er ved opvarmning, dvs. direkte overførsel af termisk energi; man taler her om overført varme. Den anden er ved at udføre et arbejde på genstanden som ændrer den termiske energi.

Når man udfører et arbejde på en genstand, går arbejdet i mange tilfælde til at overvinde gnidningskræfter, dvs. man ændrer ikke genstandens mekaniske energi, men kun den termiske. En bil der kører ud ad en vandret vej med en konstant fart, vil have en konstant mekanisk energi (idet bilen ikke ændrer hverken højde eller fart). Al det arbejde motoren udfører på bilen, bliver derfor til termisk energi.

Når man taler om termisk energi, fortæller termodynamikkens første lov altså at ændringen i termisk energi må være summen af den tilførte varme og det udførte arbejde.

### *Tilvækst i termisk energi*

Hvis der tilføres varmen  $Q$  til en genstand, og omgivelserne udfører arbejdet  $A$  på genstanden, er

$$\Delta E_{\text{term}} = Q + A .$$

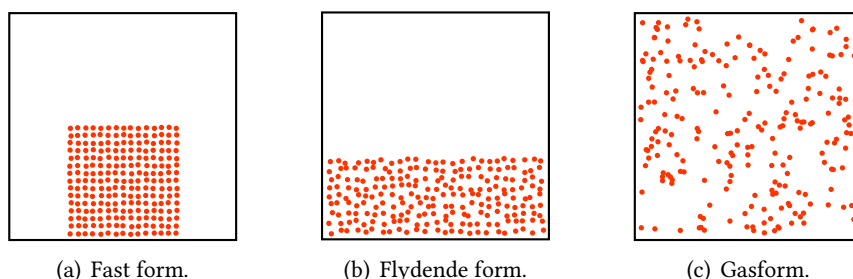
I denne formel er det underforstået at arbejdet kun går til at ændre den termiske energi. Hvis noget af arbejdet ændrer genstandens mekaniske energi, skal dette naturligvis ikke medregnes.

### 3-1 Tilstandsformer

Hvis man varmer en klump is op, vil den smelte og blive til vand, og varmer man endnu mere op vil vandet fordampe og blive til vanddamp. Det stof vi kalder vand, kan altså optræde i tre forskellige *tilstandsformer* eller *faser*, nemlig på fast form (is), flydende form (vand) og gasform (damp).

<sup>1</sup>Temperaturen af en genstand og den gennemsnitlige kinetiske energi af atomerne/molekylerne er ikke det samme, men der er en sammenhæng mellem de to.

**Figur 3.1:** De fleste stoffer kan optræde i tre tilstandsformer, fast, flydende og gas.

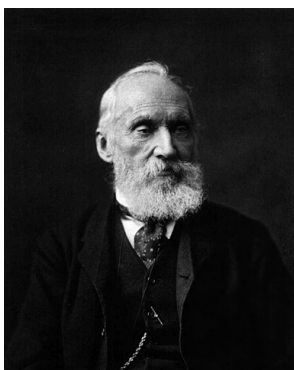


Figur 3.1 viser forskellen på de tre tilstandsformer. Når et stof er på fast form sidder stoffets partikler bundet til hinanden. De kan vibrere og rotere, men de sidder fast i en struktur. Dvs. stoffet ændrer ikke form. Er stoffet på flydende form, er partiklerne stadig bundet til hinanden, men bindingerne er ikke nær så kraftige og de kan bevæge sig rundt mellem hinanden. Hvis et stof er på flydende form, vil det derfor fylde bunden ud på den beholder det befinder sig i. På gasform er partiklerne ikke bundet til hinanden. De kan altså bevæge sig frit, og en gas fylder derfor den beholder ud som den befinder sig i.

Når man tilføjer varme til en genstand, øger man genstandens termiske energi. Det betyder at energien af de mikroskopiske partikler stiger, og deres bevægelse bliver derfor voldsommere. Hvis man tilføjer varme til et fast stof, kan man derfor opnå en så stor bevægelse af partiklerne at strukturen de er bundet i, går i stykker. Herved smelter stoffet og bliver flydende. Bliver man ved med at tilføre varme, vil bevægelsen af partiklerne til sidst blive så stor at de slet ikke kan være bundet til hinanden; så fordampes stoffet og bliver til en gas.



**Figur 3.2:** Anders Celsius.[5]



**Figur 3.3:** William Thomson, første Baron Kelvin.[9]

## 3-2 Temperatur

Når man ser en vejrudsigt i tv, indstiller en ovn, eller foretager sig noget andet der involverer temperaturer, bliver temperaturerne ofte målt i grader celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), en temperaturskala der er opkaldt efter sin opfinder Anders Celsius (1701–1744), en svensk astronom og fysiker.[4]

Men celsius-skalaen er ikke den eneste temperaturskala der findes. F.eks. er SI-enheden for temperatur ikke grader celsius, men kelvin. Denne skala er opkaldt efter William Thomson, Baron Kelvin (1824–1907), som var en af de førende forskere inden for termodynamikken i det 19. århundrede.[3] I dette afsnit beskrives sammenhængen mellem disse to temperaturskalaer.

Som nævnt ovenfor er termisk energi et udtryk for den gennemsnitlige kinetiske energi af mikroskopiske partikler. Dvs. den termiske energi må hænge sammen med gennemsnitsfarten af disse partikler, sådan at en højere gennemsnitsfart giver en højere termisk energi og dermed en højere temperatur.

Den lavest mulige gennemsnitsfart har man når alle partikler ligger helt stille. Fordi der findes en lavest mulig gennemsnitsfart, må der også findes en lavest mulig temperatur. Denne temperatur kalder man det *absolutte nulpunkt*, og eksperimenter viser at den ligger ved  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

På kelvin-skalaen sætter man 0 K til at være temperaturen ved det

absolutte nulpunkt. 0 K svarer altså til  $-273,15^\circ\text{C}$ .<sup>2</sup> Det betyder at der ikke findes negative temperaturer i kelvin-skalaen fordi det absolutte nulpunkt er den lavest mulige temperatur.

Kelvin-skalaen er derudover defineret ved at temperaturforskelle har samme talstørrelse i grader celsius som i kelvin. Dvs. en stigning på 10 K er det samme som en stigning på  $10^\circ\text{C}$ . Det betyder at de to skalaer vokser lige hurtigt, og at forskellen mellem temperaturen i kelvin og temperaturen i grader celsius altid er 273,15, dvs.

$$\frac{T}{\text{K}} = \frac{T}{^\circ\text{C}} + 273,15 .$$

### Eksempel 3.1

Frysepunktet og kogepunktet for vand er

$$T_f = 0^\circ\text{C} \quad \text{og} \quad T_k = 100^\circ\text{C} .$$

For at omregne disse temperaturer til kelvin-skalaen skal man lægge 273,15 til, dvs. målt i kelvin er

$$T_f = 273,15 \text{ K} \quad \text{og} \quad T_k = 373,15 \text{ K} .$$

Se også figur 3.4.

Når man angiver temperaturen i en skala hvor temperaturen er 0 ved det absolutte nulpunkt (som f.eks. kelvin-skalaen), siger man at man angiver det *absolutte temperatur*. Rigtigt mange steder i fysik er det en fordel at arbejde med den absolutte temperatur, og det er derfor SI-enheden for temperatur er kelvin.

#### Øvelse 3.2

- Omregn  $42^\circ\text{C}$  til kelvin.
- Omregn 216 K til grader celsius.

#### Øvelse 3.3

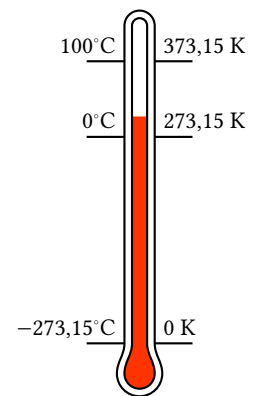
En genstand varmes op fra en temperatur på  $17^\circ\text{C}$  til en temperatur på  $38^\circ\text{C}$ .

- Hvor stor er temperaturtilvæksten i grader celsius?
- Hvor stor er temperaturtilvæksten i kelvin?

## 3-3 Varmekapacitet og varmfylde

Eksperimenter viser at man skal tilføre (næsten) den samme energi for at varme en gryde med vand op fra  $10^\circ\text{C}$  til  $11^\circ\text{C}$  som man skal tilføre for at varme den op fra  $77^\circ\text{C}$  til  $78^\circ\text{C}$ . Dvs. der skal tilføres en fast mængde energi til en genstand hver gang den skal varmes  $1^\circ\text{C}$  (eller 1 K) op. Denne størrelse kalder man genstandens *varmekapacitet*

<sup>2</sup>Bemærk i øvrigt at enhederne hedder *grader celsius* og *kelvin*. Der er altså ikke noget »grader« i enheden kelvin.



Figur 3.4: Sammenhængen mellem temperaturen i grader celsius og i kelvin.

**Varmekapacitet**

En genstands varmekapacitet  $C$  er forholdet mellem den tilførte varme  $Q$  og temperaturstigningen  $\Delta T$ ,

$$C = \frac{Q}{\Delta T} .$$

Idet SI-enhederne for varme og temperatur er hhv. joule og kelvin, har varmekapacitet enheden J/K. Heraf kan man også se at varmekapacitet er et mål for hvor meget varme der skal tilføres pr. temperaturstigning.

**Eksempel 3.4**

En gryde med vand har en masse på 3,1 kg. Gryden tilføres en varme på 551 kJ hvorved temperaturen stiger fra 17°C til 95°C. Man har altså at varmen  $Q$  og temperaturændringen  $\Delta T$  er

$$\begin{aligned} Q &= 551 \text{ kJ} \\ \Delta T &= 95^\circ\text{C} - 17^\circ\text{C} = 78^\circ\text{C} = 78 \text{ K} . \end{aligned}$$

Dvs. varmekapaciteten af gryden med vand er

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{551 \text{ kJ}}{78 \text{ K}} = 7,1 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} .$$

Denne størrelse viser at der skal tilføres 7,1 kJ til gryden med vand hver gang temperaturen skal stige med 1 K.

Bemærk at temperaturstigningen i eksemplet ovenfor har samme talværdi i grader celsius og i kelvin fordi der er tale om en *tilvækst*. Fordi springene på celsius-skalaen og kelvin-skalaen er lige store, vil en temperaturtilvækst have samme talværdi i begge skalaer.

**Øvelse 3.5**

Et metalod har en varmekapacitet på 79 J/K.

- a) Hvor meget varme skal man tilføre for at varme loddet op fra 17°C til 43°C?

Varmekapacitet er et mål for hvor meget energi (i form af varme) der skal tilføres pr. kelvin når man varmer en genstand op. Denne energi må være afhængig af genstandens masse. F.eks. må varmekapaciteten af 2 kg vand være det dobbelte af varmekapaciteten af 1 kg vand. Det betyder omvendt at dividerer man varmekapaciteten med massen, må man få den samme størrelse, uanset om man kigger på 1 kg vand eller 2 kg vand.

Det giver derfor mening at definere størrelsen *varmefylde* der er en genstands varmekapacitet pr. masse (varmefylde kaldes også *specifik varmekapacitet*). Varmefylden  $c$  finder man ved at dividere varmekapaciteten med massen.

*Varmefylde*

Varmefylden  $c$  af et stof er givet ved

$$c = \frac{C}{m},$$

hvor  $C$  er varmekapaciteten for en bestemt mængde af stoffet, og  $m$  er massen af denne mængde.

SI-enheden for varmekapacitet er J/K, dvs. enheden for varmefylde bliver  $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  (joule pr. kilogram pr. kelvin). Af denne enhed kan man se at varmefylde er et mål for hvor meget varme man skal tilføre pr. masse for at få en bestemt temperaturstigning. Varmefylden for nogle forskellige stoffer kan ses i tabel 3.5. Bemærk her at vand og is ikke har den samme varmefylde; et stof ændrer altså egenskaber ved at skifte tilstandsform.

Idet  $C = \frac{Q}{\Delta T}$ , og  $c = \frac{C}{m}$ , er

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}.$$

Herudfra kan man udlede en formel for den varme man skal tilføre et stof for at få en bestemt temperaturstigning.

*Varmetilførsel ved opvarmning*

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T,$$

hvor  $m$  er massen,  $c$  er varmefylden, og  $\Delta T$  er tilvæksten i temperatur.

**Eksempel 3.6**

Hvis man skal varme 260 g vand op fra 10°C til 35°C, er

$$m = 260 \text{ g} = 0,260 \text{ kg}$$

$$\Delta T = 35^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C} = 25 \text{ K}.$$

Varmefylden for vand er  $c = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  (se tabel 3.5). Dvs. for at varme vandet op, skal man tilføre en termisk energi på

$$\begin{aligned} Q &= m \cdot c \cdot \Delta T \\ &= 0,260 \text{ kg} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 25 \text{ K} = 27209 \text{ J} = 27 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

**Øvelse 3.7**

Et messinglod på 100 g varmes op fra 15°C til 42°C.

- a) Hvor meget varme er der blevet tilført til loddet?

**Tabel 3.5:** Varmefylde,  $c$ , for forskellige væsker og faste stoffer.

Stof	$c / \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
<i>Væske</i>	
Vand	4186
Havvand	3930
Motorolie	1840
Ethanol	2430
<i>Fast stof</i>	
Is	2040
Jern	449
Aluminium	897
Sølv	235
Messing	380

**Øvelse 3.8**

En elkedel sluttet til en energimåler og fyldes med 850 mL vand der har en temperatur på 12°C. Elkedlen tændes, og den slukker af sig selv når vandet koger.

- Hvad er massen af vandet i elkedlen?
- Hvor meget varme er der blevet tilført til vandet for at bringe det på kogepunktet?

Ifølge energimåleren har elkedlen omsat en energi på 361 kJ.

- Hvad er elkedlens nyttevirkning?
- Hvad er den overskydende energi gået til?

**Øvelse 3.9**

Et lod med en masse på 100 g består af et ukendt metal. Loddet varmes op til 100°C, hvorefter det puttes i et isolerende bæger med 153 g vand der har en temperatur på 15,2°C. Efter et stykke tid opnår vandet og loddet en fælles temperatur på 25,4°C.

- Hvor stor er tilvæksten i vandets termiske energi?

Loddet og vandet kan betragtes som et isoleret system.

- Hvor stor er tilvæksten i loddets termiske energi?
- Hvad er loddets varmekapacitet?
- Hvad mon loddet består af?

**Øvelse 3.10**

Ifølge tabel 3.5 har vand en varmekapacitet på  $4186 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ , mens ethanol har en varmekapacitet på  $2430 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ .

- Hvilke af disse to stoffer vil egne sig bedst som kølemiddel?

### 3-4 Smelte- og fordampningsvarme

Hvis man bliver ved med at tilføre varme til et fast stof vil temperaturen stige til smeltepunktet. Bliver man ved med at tilføre varme, smelter stoffet. Når et stof smelter, brydes bindingerne mellem stoffets atomer/molekyler, og det kræver energi. Mens stoffet smelter, går al den tilførte varme til at smelte stoffet, dvs. temperaturen stiger ikke. Det samme sker når man varmer et flydende stof op til kogepunktet. Mens stoffet fordampes, stiger temperaturen ikke idet al energien går til at fordampe stoffet.

At smelte eller fordampe et stof kræver altså en hvis mængde tilført varme. Størrelsen af denne varme afhænger af hvilket stof det drejer sig om. Den varme der skal bruges pr. masse til at smelte et bestemt stof, kaldes stoffets *specifikke smeltevarme*, mens den varme der skal bruges pr. masse til at fordampe et stof, kaldes stoffets *specifikke fordampningsvarme*.

Heraf kan man udlede de følgende formler for den varme der skal tilføres for at smelte eller fordampe et stof der befinder sig på hhv. smelte- eller kogepunktet.

#### *Smeltning og fordampning*

For at smelte et stof skal man tilføre varmen

$$Q = m \cdot L_s ,$$

og for at fordampe stoffet skal man tilføre varmen

$$Q = m \cdot L_f .$$

Her er  $m$  stoffets masse, og  $L_s$  og  $L_f$  er stoffets specifikke smeltevarme hhv. specifikke fordampningsvarme.

Tabel 3.6 viser den specifikke smeltevarme og den specifikke fordampningsvarme for nogle forskellige stoffer. Som man kan se i tabellen, er den specifikke fordampningsvarme større end den specifikke smeltevarme; det kræver altså mere varme pr. masse at fordampe et stof end at smelte et stof.

#### **Eksempel 3.11**

Vand har den specifikke smeltevarme  $L_s = 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . Det kræver altså en varme på 334 kJ at smelte 1 kg is ved  $0^\circ\text{C}$ . Hvis man har 150 g isterninger som allerede er på smeltepunktet, kræver det altså en varme på

$$Q = 150 \text{ g} \cdot 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 0,150 \text{ kg} \cdot 334 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 50,1 \text{ kJ}$$

at smelte isterningerne.

Den specifikke smelte- og fordampningsvarme er et mål for hvor meget varme der skal tilføres pr. masse for at smelte eller fordampe et stof når temperaturen allerede er på smelte- eller kogepunktet. Dvs. den specifikke smeltevarme for vand er altså et mål for hvor meget varme det kræver at smelte is der befinder sig på smeltepunktet ( $0^\circ\text{C}$ ). Hvis man har is der er koldere end  $0^\circ\text{C}$ , skal der tilføres mere varme for at smelte isen idet temperaturen først skal hæves til smeltepunktet, og det kræver også varme.

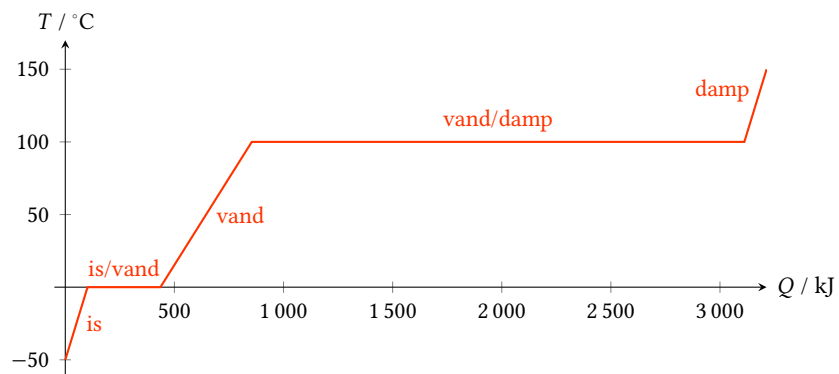
Figur 3.7 viser hvordan temperaturen af 1 kg is med en temperatur på  $-50^\circ\text{C}$  ændrer sig efterhånden som man tilfører mere og mere varme. Førsteaksen viser den tilførte varme, og andenaksen viser temperaturen.

Som man kan se på figuren går den tilførte varme først til at hæve temperaturen af isen. Efterhånden som der tilføres mere og mere varme, stiger temperaturen op mod smeltepunktet. Når temperaturen når op på smeltepunktet, går varmen til at smelte isen. Mens isen smelter, er temperaturen konstant. Når al isen er smeltet til vand, vil den tilførte varme igen få temperaturen til at stige. Når så temperaturen er kommet op på kogepunktet, begynder vandet at fordampe. Efter al vandet er fordampet, begynder temperaturen igen at stige.

**Tabel 3.6:** Smelte- og fordampningsvarme for forskellige stoffer.

Stof	$L_s / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$L_f / \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Vand	334	2257
Ethanol	–	837
Jern	247	6258
Kviksølv	11,4	294,7

**Figur 3.7:** Opvarmning af 1 kg is med en temperatur på  $-50^{\circ}\text{C}$ .



Som man også kan se på grafen stiger temperaturen af isen hurtigere end temperaturen af vandet. Det skyldes at varmekapaciteten for vand er væsentligt højere end varmekapaciteten for is. Man skal altså tilføre mere varme pr. masse for at opvarme vand, end man skal for at opvarme is.

### Eksempel 3.12

Nogle gymnasieelever vil gerne måle den specifikke smeltevarme af is (vand). De tager et bæger og fylder det halvt op med vand. De måler vandets masse til 153 g og temperaturen til  $17^{\circ}\text{C}$ . Herefter tager de en isterning med en masse på 26 g og kommer ned i bægeret. Isen har ligget på bordet et stykke tid, så de går ud fra at isens temperatur er  $0^{\circ}\text{C}$ .

De rører nu forsigtigt rundt i bægeret mens isen smelter. Når al isen er smeltet, måler de temperaturen i bægeret til  $3,1^{\circ}\text{C}$ . Herefter analyserer de energiudvekslingerne i bægeret:

1. Isen smelter. Herved tilføres den termiske energi

$$\Delta E_{is,1} = m_{is} \cdot L_s = 0,026 \text{ kg} \cdot L_s .$$

2. Isterningen, som nu er flydende vand, varmes op. Der tilføres den termiske energi

$$\begin{aligned} \Delta E_{is,2} &= m_{is} \cdot c_{\text{vand}} \cdot \Delta T_{is} \\ &= 0,026 \text{ kg} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (3,1^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}) \\ &= 337,4 \text{ J} . \end{aligned}$$

3. Vandet i bægeret køles ned. Energertilvæksten er

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{vand}} &= m_{\text{vand}} \cdot c_{\text{vand}} \cdot \Delta T_{\text{vand}} \\ &= 0,153 \text{ kg} \cdot 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (3,1^{\circ}\text{C} - 17^{\circ}\text{C}) \\ &= -8902,4 \text{ J} . \end{aligned}$$

Energertilvæksten er her negativ fordi vandets temperatur falder.

Eleverne går ud fra at bægeret er et isoleret system. Dvs. den samlede energitilvækst af systemet er 0:

$$\Delta E_{is,1} + \Delta E_{is,2} + \Delta E_{vand} = 0 .$$

De indsætter udtrykkene fra deres analyse og får

$$0,026 \text{ kg} \cdot L_s + 337,4 \text{ J} - 8902,4 \text{ J} = 0$$

hvorefter de løser ligningen og finder den specifikke smeltevarme af is

$$L_s = \frac{8902,4 \text{ J} - 337,4 \text{ J}}{0,026 \text{ kg}} = 329 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} .$$

Deres resultat viser sig heldigvis at være tæt på tabelværdien.

### Øvelse 3.13

Hvor meget energi kræver det at smelte 520 g jern der befinder sig på smeltepunktet?

### Øvelse 3.14

En klump is tages ud af en fryser. Isens temperatur er  $-18^\circ\text{C}$ , og dens masse er 254 g. Isen tilføres nu en varmeenergi på 85 kJ.

- a) Hvor stor en del af isen smelter?

### Øvelse 3.15

Gymnasieeleverne i eksempel 3.12 målte isens specifikke smeltevarme til 329 kJ/kg, men ifølge tabel 3.6 er isens specifikke smeltevarme 334 kJ/kg.

- a) Hvilke grunde kan der være til at eleverne måler en lidt for lav værdi?

## 3-5 Brændværdi

I eksempel 1.2 blev det gennemgået hvordan der produceres elektrisk energi på et kraftvarmeverk. I den første del af processen brændes fossile brændstoffer af hvorved der dannes termisk energi. Den kemiske energi der kan frigøres som termisk energi når man brænder et stof af, kalder man stoffets *brændværdi*. Brændværdien  $B$  er et mål for hvor meget energi man kan frigøre pr. masse ved at afbrænde et stof. Tabel 3.8 viser brændværdien for nogle forskellige brændsler.

Da  $B$  er et mål for den frigjorte termiske energi pr. masse, kan man beregne denne energi som

*Energi frigjort ved afbrænding*

$$E = B \cdot m ,$$

hvor  $B$  er stoffets brændværdi.

Bemærk at brændværdierne i tabel 3.8 har enheden  $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ . Der frigives altså en hel del energi når man afbrænder 1 kg af et brændsel.

**Tabel 3.8:** Brændværdien af forskellige brændsler.

Brændsel	$B / \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$
Brunkul	16,5
Stenkul	29,3
Fyrretræ	14,7
Halm	13,5
Benzin	42,7
Fyringsolie	40,6
Ethanol	25,3
Methan	50,4

**Eksempel 3.16**

Hvis man afbrænder 2,9 kg halm, får man frigivet en termisk energi på

$$E = B \cdot m = 13,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 2,9 \text{ kg} = 39 \text{ MJ} .$$

**Øvelse 3.17**

Hvor meget energi frigives der hvis man afbrænder 3 kg benzin?

**Øvelse 3.18**

Tre gymnasieelever er på campingtur, og de vil lave kaffe over et bål (se figur 3.9). De fylder 1 L vand i en kedel som de placerer over et lejrål. Vandets starttemperatur er 14°C, og de afbrænder 0,62 kg fyrretræ for at få vandet til at koge.

- Hvor meget energi har træet afgivet?
- Hvor meget energi kræver det at opvarme vandet til kogepunktet?
- Hvad er nyttevirkningen?



Figur 3.9: Kaffe over et lejrål.[7]

## Bibliografi

- [1] Erik Strandgaard Andersen, Paul Jespersgaard og Ove Grønbæk Østergaard, red. *Databog fysik kemi*. 11. udg. F & K forlaget, 2012.
- [2] Peter W. Kingsford. »James Watt«. I: *Encyclopedia Britannica*. 21. aug. 2021. URL: <https://www.britannica.com/biography/James-Watt> (hentet 04.11.2021).
- [3] David Saxon. *In praise of Lord Kelvin*. 17. dec. 2007. URL: <https://physicsworld.com/a/in-praise-of-lord-kelvin/> (hentet 11.11.2021).
- [4] Knud Erik Sørensen. »Anders Celsius«. I: *Den Store Danske* på *lex.dk*. 7. maj 2020. URL: [https://denstoredanske.lex.dk/Anders\\_Celsius](https://denstoredanske.lex.dk/Anders_Celsius) (hentet 11.11.2021).

## Billedkilder

- [5] Olof Arenius. *Anders Celsius*. Oliemaleri. Uppsala Universitet.
- [6] Sir William Beechey. *Portræt af James Watt*. Olie på lærred, ca. 1802. Heriot-Watt University, Skotland.
- [7] *Campfire coffee somewhere in a forest in Uusimaa, Finland*. 2008. URL: <https://commons.wikimedia.org>.
- [8] Danielle Keller. *Fynsværket*. 2006. URL: <https://commons.wikimedia.org/>.
- [9] Smithsonian Libraries and Archives. *Portrait of William Thomson, Baron Kelvin*. URL: <https://library.si.edu/image-gallery/74046>.