Energi: Noget er bevaret

Bent Elbek, Niels Bohr Institutet

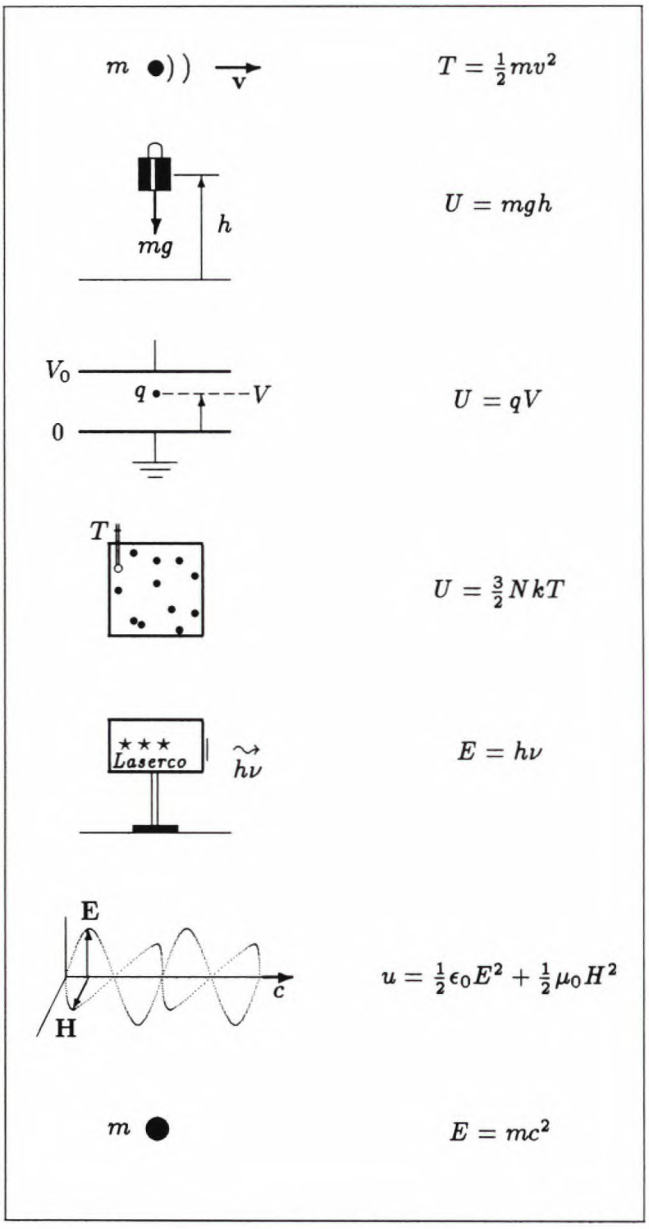
Hvad er energi?

Energi er nok det vigtigste begreb, som sammenbinder naturvidenskabens forskellige grene. Begrebet blev udviklet inden for fysikken med oprindelse i simple mekaniske overvejelser sent i 1600-tallet. Det store spring fremad kom imidlertid meget senere, i midten af 1800-tallet, da man indså, at *varme* var energi knyttet til bevægelsen af de myriader af atomare partikler, som opbygger alt stof. På det tidspunkt kom den monumentale opdagelse, eller måske rettere, det dristige postulat, at energi altid er bevaret. Én slags energi kan omdannes til andre slags, men intet tabes nogensinde.

Siden da har energibetragtninger været uundværlige ved beskrivelsen af den måde gasser, væsker og faste stoffer opfører sig på. Sådanne materialer må opfattes som ansamlinger af partikler, som det fra et rent *mekanisk* synspunkt er overordentlig kompliceret at beskrive. Men de kan enkelt og elegant behandles med *termodynamikkens* generelle metoder. Termodynamikken kan formuleres sådan, at der udelukkende optræder makroskopiske størrelser som tryk, rumfang og temperatur. Men i det mikroskopiske billede er varme bevægelse af atomare partikler, og dermed en af energiens mange former. Dette billede har været af umådelig betydning for forståelsen af alle slags processer i fysik, kemi og endog biologi. Denne forståelse kombinerer et atomistisk syn på stof med statistiske metoder, som gør det muligt at håndtere systemer sammensat af mange partikler. Den statistiske formulering af termodynamikken havde stor succes, som var stærkt medvirkende til, at atomer og molekyler blev accepteret som virkelige, og ikke blot som filosofiske enheder.

Det århundrede, som nu går på hæld, har givet to store bidrag til menneskets forståelse af den fysiske natur: Relativitetsteorien og kvantemekaniken. Begge teorier har udvidet og beriget energibegrebet. Fra relativitetsteorien fik vi den helt uventede ækvivalens mellem energi og masse udtrykt i Einsteins ligning $E = mc^2$. Fra kvantemekanikken kom den lige så overraskende kvantisering af energien. Kvanteteorien gav fysikken en ny universel konstant, virkningskvantet h, som har dimensionen energi gange tid. Kvantemekanikkens fundamentale Schrödingerligning forbinder hele den fysiske tilstand af et system med dets energi.

Kvanteteorien har været nøglen til forståelsen af stoffet i alle dets forskellige makroskopiske former: Gasser, væsker, faste stoffer og plasma. På mikroniveau har vi lært, hvordan atomerne er bygget og hvordan de kan indgå i kemiske forbindelser. Nogle af dem er simple, som et ammoniakmolekyle. Andre er overordentlig komplekse, som stormolekylerne af visse proteiner, der kan indeholde hundred tusinder af atomer. Kvanteteorien har givet indsigt i, hvad der foregår dybere i atomet. Vi forstår ganske meget



Energiens mange former

af det, som foregår i atomets tunge kerne og er godt på vej mod en forståelse af opbygningen af de indgående partikler og af disse partiklers vekselvirkninger.

Energibegrebet har været helt centralt i alle disse udviklinger. Der findes ingen gren af fysikken, hvor betegnelsen *energi* ikke bruges igen og igen. Det er derfor en grundlæggende del af enhver fysikers uddannelse at lære at genkende og håndtere energistørrelser. På trods heraf er det vanskeligt at besvare det simple spørgsmål: *Hvad er energi?*

Hvordan kan det være, at energibegrebet, som forbinder alle fysikkens grene og dem i nabovidenskaberne, ikke kan gives en klar og tilfredsstillende definition? Det er sandt nok, at vi inden for ethvert område af fysikken forstår at udtrykke energi ved hjælp af andre størrelser. Der er *ligninger* til dette formål:

- Den *kinetiske* energi af en partikel med masse m og hastighed v er $T = {}^1/_2 mv^2$.
- Anbringes partiklen i højden h over jorden, er dens *potentielle* energi $U = mgh$, hvor g er accelerationen i jordens gravitationsfelt.
- Hvis en punktladning q anbringes i et elektrisk felt ved potentialet V, eksempelvis mellem pladerne på en kondensator, bliver dens *elektrostatiske* energi $U = qV$.
- Hvis et mol af en ideal enatomig gas opvarmes til den absolutte temperatur T, er den *indre energi* fra bevægelsen af de $N = 6{,}02 \cdot 10^{23}$ atomer $U = {}^3/_2 kNT$, hvor k er Boltzmanns konstant.
- Et lyskvantum (en foton) med frekvens ν bærer *strålingsenergi* $E = h\nu$, hvor h er Plancks virkningskvantum fra 1901.
- Hvis et elektromagnetisk felt i vacuum har den elektriske feltstyrke E og den magnetiske feltstyrke H, så er feltets *elektromagnetiske* energitæthed $u = {}^1/_2 \varepsilon_0 E^2 + {}^1/_2 \mu_0 H^2$, hvor ε_0 kaldes vacuum-permittiviteten og μ_0 tilsvarende vaccum-permeabiliteten.
- Som et sidste eksempel: Hvis en partikel har masse m, repræsenterer den en *masse-energi* $E = mc^2$ efter Einsteins ligning fra 1905.

Alle disse formler og adskilligt flere er blandt de mest grundlæggende i fysikken og er velkendte af alle fysikere. Det kræver imidlertid en ganske god indsigt i emnet at forklare, hvordan hvert enkelt af de mange udtryk for energien egentlig kommer ind i fysikken, og hvordan de alle er forbundet med hinanden. Og selv en sådan indsigt bringer os ikke meget nærmere til et svar på det grundlæggende spørgsmål: *Hvad er energi?*

Ikke desto mindre, når så tilsyneladende forskellige størrelser som ${}^1/_2 mv^2$, ${}^3/_2 kNT$, qV og mc^2 alle opfattes som udtryk for en fælles egenskab, så er det selvfølgelig ikke uden grundlag. Enhedsopfattelsen hviler på to almene forudsætninger: For det første, at de mange forskellige former for energi kan omdannes til hinanden, i det mindste delvis. Og for det andet, at energi altid er bevaret.

Der er noget, som er bevaret. Det er, ifølge den franske fysiker og matematiker *H. Poincaré*, nogenlunde så nær, som vi kan komme en definition af *energi*. Unægtelig en sløj definition for en videnskab, som er stolt af sine traditioner for præcision og stringens. Men, som engang bemærket af *H.H. Kramers*: Inden for den menneskelige tankeverden i almindelighed og inden for den fysiske videnskab i særdeleshed er de mest frugtbare begreber dem, hvortil det er umuligt at knytte en veldefineret mening.

Energibegrebets udvikling

Med nogle få bemærkelsesværdige undtagelser er videnskabens historiske udvikling ikke pædagogisk. Den følgende diskussion af energibegrebets udvikling er derfor ikke en lærd fremstilling på grundlag af de oprindelige kilder. Den skal snarere opfattes som et forsøg på at illustrere, hvordan vi efterhånden har lært at anvende energibegrebet inden for alle områder af fysikken og de andre naturvidenskaber. Energi er derved blevet et stort samlende princip for menneskets forståelse af naturen. Fremstillingen her bevæger sig naturligt nok fra simple til mere komplicerede situationer. Det afspejler den historiske udvikling, selv om den rute, der blev fulgt, var slynget og med mange blinde veje, som også måtte udforskes.

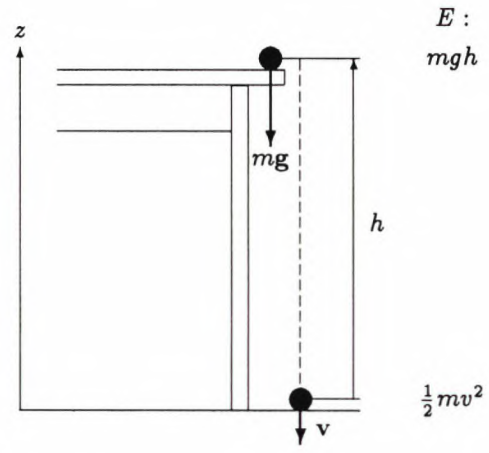
Mekanik

Energibegrebet er helt af mekanisk oprindelse, men det kom ind i mekanikken på et ret sent tidspunkt. Selv om den mekaniske fysik lod sig udvikle uden begrebet, kan man godt undre sig over, at energiens betydning ikke blev opdaget meget tidligere. *Isaac Newton* (1642-1727) kunne således godt have fundet bevarelsen af mekanisk energi, men ifølge flittige læsere af hans værker gjorde han det ikke.

Enhver førsteårs fysikstuderende kan i dag på nogle få linier udlede bevarelsesloven for mekanisk energi, altså at summen af potentiel og mekanisk energi er konstant, for eksempel for et frit faldende legeme. Beregningen bygger helt og alene på Newtons tre vigtigste bidrag til fysikken: Den 2. bevægelseslov, gravitationsloven og infinitisimalregningen. Det kan derfor være på sin plads at følge de ganske få trin i denne elementære udledning (se box 1).

Den sidste ligning i box 1 udtrykker, at et legeme med masse m, som oprindelig er i hvile i en højde h, ved fald til jord vil opnå en kinetisk energi ${}^1/_2 mv^2$, som er lig den potentielle energi mgh, det oprindelig havde. Situationen lige før faldet, når legemet slippes løs, er selvfølgelig helt forskellig fra situationen lige før, legemet rammer jorden. Men ud fra et energisynspunkt er intet ændret i den forstand, at legemets totale energi er den samme. Mekanisk energi er en bevaret størrelse i dette og i alle andre tilfælde, hvor kræfterne er *konservative*. Det vil sige, at det arbejde, som udføres, er uafhængigt af den vej, som følges.

Videnskabshistorikere kan utvivlsomt give mange grunde til, at Newton ikke opdagede energi. For eksempel, at Newton intet sted har skrevet sin 2. lov. I det mindste ikke på formen kraft lig masse gange acceleration. (Dette er den slags desillusion man ofte oplever, når man studerer, hvad de store banebrydere egentlig sagde. Det illustrerer den tidligere påstand, at videnskabens historie sjældent er pædagogisk).



Box 1: bevarelse af mekanisk energi

En newtonsk beregning
som aldrig blev gennemført af Newton:

$$F = m\frac{dv}{dt}, \qquad \text{(anden lov)}$$

$$F = mg, \qquad \text{(gravitationsloven)}$$

$$\Rightarrow -mg = m\frac{dv}{dt} \Rightarrow -mg\,dz = m\frac{dv}{dt}dz = m\frac{dz}{dt}dv = mv\,dv$$

$$\Rightarrow -mg\int_h^0 dz = m\int_o^v v\,dv, \qquad \text{(infinitisimalregning)}$$

$$\Rightarrow mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

Nogle af Newtons samtidige var imidlertid nærmere ved at ramme plet. *C. Huygens* (1629-1695) og *G. W. Leibnitz* (1646-1716) kom gennem studiet af svingende penduler og kolliderende billardkugler til at erkende betydningen af størrelsen mv^2, som blev kaldt *vis viva* (levende kraft), og gjorde brug af dens bevarelse.

Der er dog et stort skridt fra de tidlige tanker om bevarelse af *vis viva* til den almene lov om energiens bevarelse, som rækker langt ud over mekanikken. Men selv inden for mekanikken tog det tid at afklare betydningen af (og forskellen på) begreber som *kraft*, *arbejde* og det vi kalder *potentiel* energi, der alle er væsentlige for det mekaniske energibegreb. En lille, men afgørende detalje, som først sent kom på plads, er faktoren $^1/_2$ i definitionen af kinetisk energi (*G. Coriolis* 1829).

Selv om man ikke havde et klart mekanisk energibegreb, kom energi alligevel til at spille en vigtig rolle i en helt anden formulering af mekanikken. Denne skyldtes især en helt enestående gruppe af franske matematikere med centrum på Ecole Polytechnique. Den newtonske mekanik arbejder med vektorielle størrelser som kraft og impuls. Den anden mekanik, der i dag kendes som Hamilton-Lagrange formalismen, er baseret på en enkelt skalar funktion L, som er en energi. Er denne funktion kendt, udtrykt i passende koordinater, kan opførselen af selv meget komplicerede fysiske systemer beregnes med standard matematiske metoder. Et forhold som spiller en stor rolle inden for den statistiske mekanik og kvantemekaniken.

Energi er bevaret

Omkring 1840 var tiden moden for en af de vigtigste opdagelser i videnskabens historie: Loven om energiens bevarelse.

Det er ikke let at sige, *hvem* der opdagede energibevarelse. Sandt at sige opstod der en prioritetsstrid, som gav anledning til bitre beskyldninger mellem store fysikere, og som anslog primitive nationalistiske følelser.

I en klassisk afhandling nævner *T.S. Kuhn* fire europæiske videnskabsmænd: *J. R. Mayer* (1814-78), *J. P. Joule* (1818-89), *L. A. Colding* (1815-88) og *H. von Helmholtz* (1821-94). Disse mænd fremsatte, stort set uafhængigt af hinanden, hypotesen om energiens bevarelse. Kuhn føjer yderligere navne til listen og konkluderer, at i alt tolv forskere inden for en kort tidsperiode havde forstået væsentlige dele af begrebet energi og af energiens bevarelse.

Tiden var moden. Der var den fra mange kilder opsamlede erfaring, at naturens forskellige ''kræfter'' kunne omdannes til hinanden. Kul kunne brændes i en ovn, som under en kedel gav damp, som kunne dreje en maskine. Batterier kunne, mod at metaller blev opløst i syre, skabe elektriske strømme, som igen kunne opvarme metaltråde og endda give lys. *H. C. Ørsted* (1777-1851) havde under sin søgen efter enhed i naturen opdaget, at elektriske strømme kunne bevæge en magnetisk nål. Inden for biologien var det kendt, at der var en sammenhæng mellem indåndingen af oxygen og legemets tab af varme.

Alle disse observationer pegede mod, at der i naturen var et underliggende, forenende princip. Det er derfor ikke overraskende, at flere personer mere eller mindre samtidigt skulle nå frem til loven om energiens bevarelse, selv om det skete ad meget forskellige veje.

I dag er princippet om energiens bevarelse fuldt accepteret inden for alle grene af naturvidenskaben. Det har været og er stadig, en ledestjerne, når videnskaben bevæger sig ind på jomfruelige områder. Undertiden har nye iagttagelser ført til, at princippets almene gyldighed er blevet betvivlet, selv af mænd som *Niels Bohr* (1885-1962). Men i alle tilfælde er overbevisningen om, at energien altid er bevaret til slut blevet styrket.

Termodynamik

Det var en væsentlig forudsætning for formuleringen af loven om energiens bevarelse omkring 1840, at det efterhånden var bredt accepteret, at varme er bevægelse af stoffernes molekyler. Energi og temperatur blev derved forbundet og man kunne skabe en sammenhængende ny teori, termodynamikken.

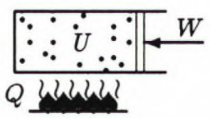
Loven om energiens bevarelse kaldes ofte termodynamikkens 1. hovedsætning. Den kan formuleres på forskellige måder. Én af dem er, at ændringen i et systems *indre energi*

Box 2: Termodynamikens 1. hovedsætning

Et fysisk system kan tilføres energi både ved at tilføre det varme og ved at udføre et arbejde på det. Derved forøges, hvad man kalder systemets *indre* energi. Første hovedsætning udtaler sig om ændringen ΔU i systemets indre energi, når det tilføres en varmemængde Q og et arbejde W:

$$\Delta U = Q + W.$$

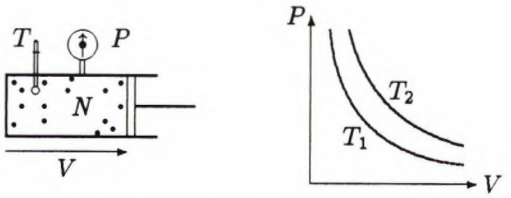
Det er klart, at de tre størrelser må måles i energienheder. Undertiden skrives loven med et -W inspireret af den praktiske situation, hvor en maskine udfører arbejde mod tilført varme. Med de her angivne fortegn understreges, at tilført arbejde og tilført varme på ligestillet måde bidrager til den indre energi.



Under alle omstændigheder er loven fuldstændig generel. Er systemet en gas, vil den indre energi i det væsentlige være den termiske kinetiske energi af molekylerne. For andre systemer kan den indre energi være (delvis) potentiel, være af kemisk natur eller være energi i form af elektromagnetisk stråling osv.

Box 3: Tilstandsligning

Termodynamiken beskriver et fysisk system ved hjælp af nogle få makroskopiske variable som tryk P, volumen V og temperatur T. Andre variable kan bruges, men de tre nævnte egner sig godt til at beskrive grundlæggende termodynamiske systemer med gasser eller dampe.



De variable er ikke uafhængige. De er forbundet med relationer som kaldes *tilstandsligninger*. Tilstandsligningen for en *ideal* gas, hvor molekylerne kun vekselvirker gennem kortvarige elastiske sammenstød, er særlig simpel:

$$PV = nRT.$$

I denne ligning er n det antal mol, som betragtes, mens R kaldes gaskonstanten (R=8,3143 $JK^{-1}mol^{-1}$). Sammenhængen mellem f.eks. P og V for fast T afbildes ofte ved kurver (isotermer) på et *PV-tilstandsdiagram* jvf. figuren.

er summen af den varme og det arbejde, som er tilført systemet. Se box 2.

Den specielle brugbarhed af den indre energi U hænger sammen med, at den alene afhænger af systemets *tilstand*. Tilstanden af en given gasmængde kan, for eksempel, beskrives ved gassens tryk og volumen. Går vi fra en tilstand a til en anden tilstand b, kan vi følge mange forskellige tryk-volumen veje, som hver giver deres Q og deres W. Men summen af Q og W giver altid den samme ændring $\Delta U = U_b - U_a$ i indre energi. Man siger, at den indre energi er en *tilstandsfunktion*.

I ord kan 1. hovedsætning formuleres på flere andre måder: Energi kan ikke skabes eller tilintetgøres, kun omdannes. – Energien i et lukket system er konstant. – Et ''perpetuum mobile af 1. art'' er umuligt (en sådan indretning er en periodisk virkende maskine, som i hver periode leverer arbejde uden at modtage hverken varme eller andet arbejde) –. Alle formuleringerne er ækvivalente, men bidrager til at belyse forskellige aspekter af den 1. hovedsætning og til at give ordet ''energi'' mening.

Termodynamikkens fornemste træk er dens generalitet. Den beskriver *systemer*. Et system kan være næsten alt, som kan isoleres fra omgivelserne, og som indeholder mange partikler. Endog immaterielle partikler som *fotoner* lukket inde i en egnet kasse. Luften i en cykelpumpe, et batteri, en stjerne, en atomkerne eller en mus er eksempler på systemer, som vi kan lære noget interessant om ved at bruge termodynamikkens metoder.

Termodynamik skulle efter ordets betydning beskrive systemer, der ændres med tiden. De vigtigste anvendelser af termodynamikken vedrører imidlertid systemer, som er i ligevægt, eller som kun ændrer sig langsomt. Termodynamikken er i det væsentlige en disciplin, som behandler systemer med forskellige temperaturer. *Temperatur* forekom inden for fysikken længe før termodynamikken, men har ingen mening i mekanikken. I termodynamikken er temperaturen et helt afgørende begreb.

Temperaturen optræder ikke direkte i den 1. hovedsætning. Denne kan betragtes som en bogholderiregel for energiomdannelser, *når* de finder sted, men som ikke kan fortælle *om* eller i hvilken udstrækning, de finder sted. For at udtale os herom behøver vi termodynamikkens *2. hovedsætning*.

Historisk blev essensen af den anden hovedsætning opdaget af *Sadi Carnot* (1796-1831) i 1824, før den første lov var kendt. Det er interessant nok at notere, at mens englænderne havde travlt med at bygge de dampmaskiner, som skulle trække den industrielle revolution, så var det en fransk ingeniør, som satte sig til at fundere over, hvor

effektiv en sådan maskine kunne blive. Carnot påpegede, at det var temperaturforskellen mellem den varme kedel og den kolde kondensator, som var afgørende for den mængde arbejde, man kunne trække ud af maskinen. Kulde er således lige så væsentlig som varme, for at en dampmaskine kan fungere. Men Carnot gik videre end det. Han anviste også, hvordan en ideel maskine skulle virke, en maskine som, skønt den aldrig kan bygges, kan tjene som reference, når man skal bedømme ydeevnen af praktiske maskiner.

Carnots idealmaskine ligner i mange henseender en virkelig dampmaskine. Den fungerer periodisk i en kredsproces, den henter varme ved en høj temperatur og den omsætter noget af denne varme til nyttigt arbejde, men aldrig fuldstændigt. Der vil være et principielt uundgåeligt varmetab til kondensatoren. Forskellen mellem den ideelle maskine og praktiske maskiner er, at den ideelle maskine er *reversibel*. Den køres så langsomt og forsigtigt, at den hele tiden befinder sig i en ligevægtstilstand. På ethvert sted i kredsprocessen kan man stoppe og med en minimal påvirkning få maskinen til at køre baglæns. I en sådan reverseret maskine drejer man på akslen, og maskinen henter varme fra kondensoren og afleverer varmen til kedlen. Den baglæns kørende maskine er blevet en kølemaskine.

Det var Carnots fortjeneste at påpege, at ingen maskine kunne blive mere effektiv end den reversible. Ellers kunne man jo lade en forlæns kørende supermaskine trække en ideal maskine baglæns, hvilket ville være et perpetuum mobile.

Carnot kendte ikke den 1. hovedsætning. Men hans ideer blev senere udbygget under hensyn til energiens bevarelse af især *William Thomson* (Lord Kelvin, 1824-1907) og *Rudolph Clausius* (1822-88). Deres arbejde førte til formuleringen af termodynamikkens *2. hovedsætning* og til indførelsen af et helt nyt begreb i fysikken: *Entropi*. Et navn som blev foreslået af Clausius i analogi til *energi*.

Energi, selv om det ikke er noget nemt begreb, er dog noget, vi til en vis udstrækning kan sanse, og hvorom vi ved daglig omgang med har fået en vis erfaring. Entropi er et meget mere flygtigt begreb. Selv inden for fysikken kan det være vanskeligt at fatte dets fulde mening, og inden for filosofi kan det erfaringsmæssigt let lede på vildspor.

Termodynamikkens 2. hovedsætning har ligesom den 1. fået en række forskellige, men ækvivalente formuleringer: Entropien af et lukket system vil aldrig aftage. – Varme kan ikke flyde fra et koldere til et varmere legeme. – Et ''perpetuum mobile af 2. art'' er umuligt. (Et sådant er en periodisk virkende indretning, som tager varme fra en enkelt varmekilde og omdanner den til arbejde). Termodynamikkens 2. lov er, som sagt af Max Planck, en konstatering af manglende evne.

Box 4: Entropiens definition

Clausius udtrykte entropi ved hjælp af to størrelser, som allerede var kendt: Varme og temperatur. Hvis en lille varmemængde, dQ, på *reversibel* måde tilføres et system, som har den absolutte temperatur T, vil systemets entropi, S, ændres med

$$dS = 1/T\, dQ.$$

Overgår systemet fra en tilstand a til en tilstand b kan entropiændringen udtrykkes som

$$\Delta S = \int_a^b 1/T\, dQ.$$

hvor integralet kan beregnes for enhver reversibel vej fra a til b. Entropien S er nyttig, fordi den, som den indre energi U, er en tilstandsfunktion. Integralet fra a til b er uafhængigt af den valgte reversible vej. Er vejen lukket sådan, at man vender tilbage til udgangspunktet, er entropiændringen nul.

En reversibel proces er en abstraktion, som aldrig fuldt kan realiseres. Naturlige processer er *irreversible*, de kan ikke vendes om. En gas vil strømme fra en fuld til en tom beholder. Det sker aldrig, at molekylerne uden ydre indgriben strømmer tilbage, hvorfra de kom. Kastes en hed sten i en spand vand, går varmen fra stenen til vandet, og aldrig omvendt. En klods, som glider på et underlag, vil til sidst standses ved gnidning, hvorved bevægelsesenergien omsættes til varme i klods og underlag. Vi ser aldrig, at varmen igen sætter klodsen i gang. De omvendte processer ville ikke stride mod 1. hovedsætning. Men analyserer man dem nærmere ved at genskabe den oprindelige situation ved hjælp af ydre indgriben i form af reversible processer, kan man *beregne* den entropiændring, som er sket ved det irreversible forløb. Man finder da, at entropien af et afsluttet system altid vokser ved en naturlig proces. Ved en dristig almindeliggørelse betragtede Clausius i 1850 hele universet som et afsluttet system, da han formulerede de to hovedsætninger som:

1. Universets energi er konstant.
2. Universets entropi stræber mod et maximum.

Den slags bevægelse vi kalder varme

Tanken om, at varme er en slags bevægelse (translation, rotation eller vibration) af stoffets atomare dele, var omkring 1840 ikke ny. *Daniel Bernoulli* (1700-1782) gav således den første version af det, som skulle blive til den kinetiske gasteori. Men dette og andre forsøg bidrog ikke meget til udviklingen. De blev overset, og de fleste fysikere hældte til den anskuelse, at varme var en art væske der, som svensk punch, kaldtes *caloric*.

Men som det kinetiske billede af varmen var væsentligt for formuleringen af den almindelige lov om energiens bevarelse, så gav denne på sin side stødet til en hurtig udvikling og kvantificering af den kinetiske teori. Clausius,

Box 5: Tilstandsligningen på mikroniveau

Tilstandsligningen for en ideal gas følger af billedet af en gas som molekyler, der tilfældigt bevæger sig i alle retninger under stadige sammenstød indbyrdes og med væggene i en beholder.

Lad et molekyle i gassen have masse m og hastighed v med komposanterne (v_x,v_y,v_z). For hver komposant, lad os sige v_x, er den modsat rettede komposant $-v_x$ lige så sandsynlig. Molekylernes middelhastighed er derfor nul. Middelkvadraterne, lad os sige $<v_x^2>$, er imidlertid alle positive og lige store:

$$<v_x^2> = <v_y^2> = <v_z^2> = {}^1/_3<v^2>,$$

hvor det sidste lighedstegn kommer af

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

Trykket på beholderens vægge skyldes det uophørlige bombardement med molekyler. Lad et molekyle ramme væggen med den vinkelrette impuls mv_x. Det hopper elastisk tilbage med impuls $-mv_x$. Men da impuls er bevaret har væggen modtaget impulsen $2mv_x$. De molekyler som per areal og per tid træffer væggen indeholdes i en gassøjle med højden v_x. Antallet af molekyler per volumen er N/V når der er N molekyler i beholderen med volumen V. Kun halvdelen af molekylerne har et positivt v_x. Impulsoverførslen per tid og per areal er det vi kalder trykket P. Følgelig gælder der i gennemsnit, at

$$P = 2m<v_xv_x> N/V {}^1/_2.$$

Bruger vi endelig $<v_x^2> = {}^1/_3<v^2>$ bliver

$$P = {}^1/_3 N/V\, m<v^2> \;\Rightarrow\; PV = {}^1/_3 N/V\, m<v^2>$$

hvor vi genkender tilstandsligningen for en ideal gas ved konstant temperatur. Indfører vi middelværdien af molekylernes kinetiske energi bliver

$$PV = {}^2/_3N[{}^1/_2m<v^2>].$$

Vi kan nu indføre temperaturen ved at sammenligne med den eksperimentelt fundne tilstandsligning $PV = nRT$. Har vi netop $n = 1$ mol i beholderen er $N = N_A$ (Avogadros tal). Den kinetiske (translatoriske) energi per molekyle bliver derfor i middel

$${}^1/_2m<v^2> = {}^3/_2 R/N_AT = {}^3/_2kT,$$

som gennem Boltzmanns konstant $k = R/N_A$ direkte forbinder temperaturen til den kinetiske energi af et molekyle. For et oxygen molekyle ved rumtemperatur beregner man heraf en middelhastighed på 675 ms^{-1}.

der skrev en artikel med titlen "Den slags bevægelse vi kalder varme", og *James Clerk Maxwell* (1831-79) indså, at det kinetiske billede gav vigtig ny forståelse. Atomer og molekyler blev virkelige objekter med egenskaber, som kunne beregnes. Eksemplet i box 5 viser, hvordan en molekylær størrelse kan bestemmes ved en kombination af det mikroskopiske og det makroskopiske billede af en gas. Det er ikke så sært, at den kinetiske gasteori gav tiltro til eksistensen af atomer.

Med den kinetiske gasteori fik sandsynlighedsbegrebet for første gang en vigtig plads i en fysisk teori og førte gennem Maxwells, *Ludwig Boltzmanns*(1844-1906) og *J. Willard Gibbs"* (1844-1906) arbejder en helt ny måde at behandle termodynamikken på: Den statistiske mekanik. Den statistiske mekanik på sin side åbnede vejen til kvantemekaniken. Disse udviklinger, som direkte kan føres tilbage til det almindelige energiprincip, hører til de vigtigste i fysikkens historie. De medførte, at man ved slutningen af 1800-tallet kunne opfatte termodynamikken som den makroskopiske manifestation af stoffets mikroskopiske struktur.

Den statistiske mekanik viser mange nye og overraskende træk ved energibegrebet. så mange, at man måtte inkludere næsten hele den moderne fysik i selv den flygtigste gennemgang. Her skal der kun nævnes en helt ny opfattelse af entropi, som skyldes *Boltzmann*.

Boltzmann bemærkede, at systemer har tendens til at udvikle sig fra ordnede mod uordnede tilstande. Som for eksempel når den ordnede kinetiske energi i et glidende legeme gennem friktion omsættes til varme, hvilket vil sige uordentlig molekylær bevægelse. Det modsatte er aldrig blevet observeret. Processer af denne art er irreversible, skønt de grundlæggende bevægelseslove er fuldstændigt reversible.

Dybest set er årsagen til dette, efter Boltzmann, at antallet af mulige uordnede tilstande er så meget større end antallet af ordnede tilstande. Vindertallet i lotto er måske 12345, men der er 119 andre kombinationer af de samme cifre, som ikke giver gevinst. Det ene vindertal kan repræsentere den ordnede udgangstilstand for et termodynamisk system. De mange flere nitter de uordnede sluttilstande. Boltzmann så her en forbindelse til den kendsgerning, at entropien er en altid voksende størrelse. Entropi, sagde han, er et mål for uorden og entropiens vækst afspejler tendensen mod voksende uorden. Denne sammenhæng fandt sit matematiske udtryk i Boltzmanns formel, som forbinder entropien S af et system med antallet W af tilstande, som er tilgængelige for det: $S = k \ln W$. Denne formel er indhugget på Boltzmanns gravsten på Centralkirkegården i Wien.

Energi i et felt

Energi er et abstrakt begreb, som det er vanskeligt at definere og visualisere. Det samme gælder i endnu højere grad for entropi. Men netop på grund af deres abstrakte karakter er begreberne ikke knyttet til nogen konkret situation. De er af almen natur og medvirker derfor til at skabe et enhedsbillede af den fysiske verden.

Et andet begreb af denne art er det *fysiske felt*. Et felt repræsenterer en fysisk størrelse, som forefindes i et større eller mindre område af rummet. Temperaturfeltet over et landområde, tyngdefeltet omkring solen, det elektriske og magnetiske felt i en radiobølge. Feltbegrebet kan føres tilbage til *Michael Faraday* og blev selve grundlaget for Maxwells formulering af den elektromagnetiske teori. I dag anvendes feltstørrelser inden for næsten alle grene af fysikken og frontlinie teorierne er feltteorier.

Box 6: Energi i det elektromagnetiske felt

En elektromagnetisk bølge er et tidsvarierende elektromagnetisk felt. Feltet er et vektorfelt og kan beskrives ved sin elektriske feltstyrke **E** og sin magnetiske feltstyrke **H**. Feltvektorerne er vinkelrette på hinanden og på bølgens udbredelsesretning.

I den elektromagnetiske teori finder man, at energitætheden i en elektromagnetisk bølge i vacuum er

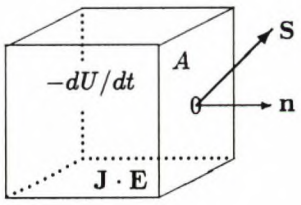
$$u = {}^1/_2\varepsilon_0 E^2 + {}^1/_2\mu_0 H^2,$$

hvor konstanten ε_0 kaldes vacuum-permittiviteten og μ_0 tilsvarende vaccum-permeabiliteten.

Teorien giver også, at energistrømtætheden, som måles i Wm^{-2}, kan angives som en vektor **S**

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}.$$

Denne vektor kaldes *Poyntingvektoren*. Bemærk, at energitætheden u er sammensat af en rent elektrisk del og en rent magnetisk del, mens energistrømtætheden afhænger af både det elektriske og det magnetiske felt. Energistrømmen er således et sandt elektromagnetisk fænomen.



Poyntingvektoren er afgørende for energibevarelse i feltet. Betragter vi et volumen af rummet, som vist på figuren, vil energien U per tid aftage med $-dU/dt$. Denne energi omsættes til Joule varme-effekt $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ i eventuelle ledende medier med strømtæthed **J** indenfor volumenet og udstråles gennem kassens overflade A ved Poyntingvektorens normalkomposant $\mathbf{S} \cdot \mathbf{n}$.

Enhver udvidelse af energibegrebet har bygget på det, man allerede kendte. I begyndelsen var *vis viva*. Efter megen forvirring blev det afklaret, at det mekaniske energibegreb også måtte omfatte potentiel energi, og at summen af de to var bevaret. Da man erkendte, at varme var bevægelse af stoffets molekyler, var forbindelsen mellem varme og mekanisk energi nærliggende, og vejen til loven om energiens bevarelse stod åben. På det tidspunkt var kendskabet til elektriske fænomener så veludviklet, at man kunne begynde at tale om energi i forbindelse med elektricitet. Et tidligt eksempel var Joules undersøgelser fra 1841 af varmeudviklingen P (effekten) fra en elektrisk strøm I i en elektrisk modstand R, hvor han fandt relationen $P = RI^2$. Denne relation, som vi i dag kalder Joules lov, blev faktisk fundet *før* loven om energiens bevarelse, som den selv er et godt eksempel på.

Joules lov er blot en enkelt illustration af, at der er energi knyttet til elektriske fænomener: Det kræver energi at lade en kondensator op, det kræver energi at magnetisere et stykke jern og det kræver energi at holde en glødelampe tændt. Det lader sig nemt gøre at beregne energiomsætningen for den slags tilfælde ud fra simple mekaniske billeder. Energien opfattes da naturligt som noget, der kommer fra et batteri eller fra stikkontakten i væggen og som kan transporteres ved hjælp af ledninger. Her overfor står den elektromagnetiske teoris næsten chokerende påstand: *Energien findes i det elektromagnetiske felt.* Energien i en opladet kondensator er ikke potentiel energi af ladninger på pladerne, den er energi i feltet mellem pladerne. Energi kommer ikke til os i ledninger fra elværket, den kommer som energi i feltet omkring ledningerne. Når det gælder den slags dagligdags situationer, kan man måske stille sig skeptisk til værdien af det feltteoretiske billede. Når det kommer til hurtigt varierende fænomener, er der ingen vej udenom.

Lys og radiosignaler er hurtige tidsvarierende forstyrrelser i det elektromagnetiske felt i rummet. Forstyrrelserne er bølger, hvis udbredelse er beskrevet ved de fire differentialligninger for det elektromagnetiske felt, som Maxwell opstillede i 1873. Udbredelsen af en elektromagnetisk bølge er ikke betinget af noget fysisk medium, den kan fuldt så vel foregå i det tomme rum. Dette er gennem tiderne blevet opfattet som fornuftsstridigt. Vi kender eller kan forestille os bølger, men kun i et materiale af en eller anden art. Bølger i vacuum kan vi ikke visualisere, men deres forekomst kan let iagttages. Lyset fra fjerne stjerner kan registreres med det blotte øje eller med astronomernes teleskoper. Radiosignaler kan styre kunstige satellitter gennem Saturns ringe, fordi de medfører bittesmå energimængder fra en jordisk station.

Det er ikke umiddelbart indlysende, hvordan man finder energien i et elektromagnetisk felt (se box 6). Men ledetråden er energibevarelse. Ved en række matematiske manipulationer af de fire Maxwell ligninger når man frem til en ligning, som fortæller, hvad der sker med et elektromagnetisk felt i i en del af rummet, som afgrænses af en passende kasse. Ligningen fortæller, at der fra kassen forsvinder "noget". Til gengæld opstår der noget andet, som dels består af varme i ledere, som vi *kender* den fra Joules lov, og dels "noget", som forsvinder gennem kassens overflade. Det første "noget" fortolker man da som den elektromagnetiske energi i kassen, jævnfør den første ligning i box 6. Det

andet ''noget'' fortolker man som energistrømmen ud af kassen, jævnfør den anden ligning i box 6. Alt i alt en smuk anvendelse af Poincarés formulering: Noget er bevaret.

Poyntings vektor (se box 6) blev indført af *J. H. Poynting* (1852-1914) i 1884. Op mod år 1900 var energibegrebet dermed udvidet og praktisk talt afklaret inden for alle grene af naturvidenskaben. Men næppe var det næste århundrede begyndt, før overraskelserne væltede ind.

Referencer:

1) Thomas S. Kuhn, *Energy Conservation as an Example of Simultaneous Discovery*, i M. Clagget *Critical Problems in the History of Science*, University of Wisconsin Press, Madison, 1959.

2) Stephen G. Brush, *The Kind of Motion we Call Heat*, North Holland Publishing Company, 1976.

3) Frederick O. Koenig, *On the History of Science and the Second Law of Thermodynamics*, i H. M. Evans *Men and Moments in the History of Science*, University of Washington Press, seattle, 1959.

4) William F. Magie, *A Source Boook in Physics*, McGraw-Hill Book Company, New York and London, 1935.

5) Y. Elkana, *The Discovery of the Conservation of Energy*, Cambridge, Mass., 1974.



Bent Elbek, dr. phil., professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet, arbejder med eksperimentel fysik ved institutets tandem accelerator laboratorium. Har arbejdet med energi og samfundsforhold og skriver i øjeblikket på en lærebog i elektrodynamik.