

# Energi: Fra virkningskvant til energikrise

Bent Elbek, Niels Bohr Institutet

## Et nyt århundrede

Ved slutningen af 1800-tallet var energibegrebet udviklet og havde fundet anvendelse på mange områder af fysikken. Der var mange succeser at se tilbage på, og det var vel forståeligt, at nogen overmodigt kunne mene, at nu havde man styr på det meste. Der fandtes endog en fysisk-filosofisk retning, *energetikken*, der ville tage energi som det almene grundlag for enhver naturbeskrivelse. Hermed nåede man ikke langt. Et af de mere kuriøse resultater var de metriske papirformater, der blev indført som et bidrag til at mindske energispildet ved skriftligt arbejde. Det nye århundrede var dog næppe begyndt, før det viste sig, at energibegrebet havde andre og væsentligere ting at byde på.

## Energi og masse

Ny indsigt opnås ofte på en helt uventet måde. Hvis nogen, eksempelvis ved begyndelsen af 1800-tallet, havde funderet over, hvordan man kunne strække verdens forsyning med brændsel, som allerede da gav anledning til bekymring, ja så ville vedkommende måske have overvejet bedre væger og bedre talg til fremstilling af vokslys eller have opfundet nye skovlhjul til tidens dampskibe. Han ville tilvisse ikke være begyndt at spekulere på, hvordan man stiller sit ur i et bevæget referencesystem.

Men det var jo netop det *Einstein* gjorde. Han indse, at ure måtte synkroniseres ved hjælp af lyssignaler. Dette førte til, at forestillingen om *absolut tid* måtte falde, men synkroniseringsmetoden sikrede, at lyset har samme hastighed  $c$  i alle referencesystemer uafhængigt af, om de måtte bevæge sig med en jævn hastighed i forhold til hinanden. Dette ledte Einstein til den specielle relativitetsteori i 1905.

En af de overraskende konsekvenser som Einstein drog af relativitetsteorien, var, at masse og energi er ekvivalente. Masse og energi er forskellige fysiske størrelser, men masse har energi og energi har masse, forbundet som de er ved ligningen  $E = mc^2$ . Den eneste ligning som nogenlunde uskadt kan trykkes i et dagblads spalter.

Hvis et legeme opvarmes og derved forøger sin interne energi, forøger det også sin masse. Det vil sige, at legemet får mere *inerti*. To lige store klumper vådt ler smasker sammen til en større klump, hvis masse ikke blot er den samlede masse, men er forøget med den kombinerede kinetiske energi af de to klumper divideret med  $c^2$ . En proton og en neutron kan gennem en proces, som kaldes strålingsindfangning, forenes og danne en deutron. Men den dannede deutron har en masse, som er omkring 0,1 % mindre end summen af protonens og deutronens masser. Under indfangningsprocessens forløb frigøres der energi i form af et gamma-kvantum og en smule rekylerenergi til deutronen. Energifrigørelsen svarer netop til masseforskellen mellem neutronen plus protonen og den dannede deutron, når denne forskel multipliceres med  $c^2$ . Der er

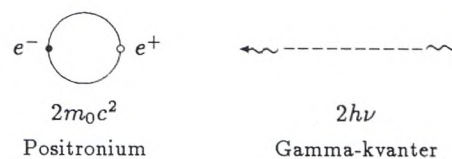
## Box 1: Ekvivalens af masse og energi

Ekvivalensen af masse og energi kan udledes fra den specielle relativitetsteori på flere måder. Den mest instruktive er måske den, som bygger på, at energi og impuls skal være bevaret i alle referencesystemer. En sådan udledning blev givet af Einstein i 1934, og er helt forskellig fra den oprindelige fra 1905.

Den proces, som kaldes *positron annihilation*, giver en dramatisk eksperimentel demonstration af ekvivalensen mellem masse og energi. Positronen er elektronens *antipartikel*. Den har samme hvilemasse som elektronen, men modsat elektrisk ladning. En elektron og en positron, som bringes nær hinanden i (næsten) hvile, vil danne *positronium*. Det er et 'grundstof', som minder om hydrogen, men hvor positronen gæsteoptræder i rollen som atomkerne. I positronium bevæger elektronen og positronen sig omkring deres fælles tyngdepunkt, men inden for et tidsrum på omkring  $10^{-10}$  s ender dette dødelige favntag i en fuldstændig tilintetgørelse af partnerne, hvorved der udsendes to gamma-kvanter i modsatte retninger (bevarelse af impuls!). Skrevet i formel er processen

$$e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu.$$

Energien  $h\nu$  af hver gamma-kvantum er nøjagtig lig  $m_0c^2$ , hvor  $m_0$  er elektronens hvilemasse, som i energi svarer til 511 keV. Al materiel masse er forsvundet og kun immaterielle gamma-kvanter er tilbage. Men energien er strikt bevaret.



utallige eksempler på en sådan ekvivalens mellem energi og masse, som det dog eksperimentelt er væsentlig lettere at iagttage for atomare partikler end for dagligdagens objekter.

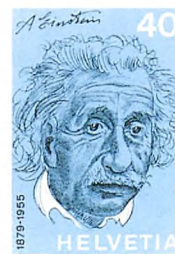
## Energi i kvanter

Kvantefysikken beskriver stof og stråling på et mikroniveau, hvor stoffet ikke længere er en homogen substans, men viser struktur. For hvert trin af opløsningsevne hos vore eksperimentelle hjælpemidler kan vi skelne et karakteristisk udvalg af partikler: Molekyler er sammensat af atomer, som

igen består af en kerne og en sværm elektroner. Kernen er sammensat af protoner og neutroner, som ved den højeste opløsningsevne selv viser en struktur af quarks. De partikler, vi møder på hvert trin, har bestemte egenskaber som ladning, masse, spin og magnetisk moment. Disse egenskaber har diskrete værdier, de er *kvantiserede*.

På mikroniveauet er også energi kvantiseret. Energiens kvantisering var netop det fænomen, som ved det tyvende århundredes begyndelse først tiltrak sig de mest opmærksomme fysikers interesse. Kvantiseret energi var noget helt nyt som forvarslede, at i atomernes verden er naturlovene meget forskellige fra dem, man kendte fra den klassiske fysik.

Der var tre, i dag klassiske iagttagelser, som hver afslørede en side af energiens kvantisering. Det var hulrumsstrålingen, den fotoelektriske effekt og hydrogen-spektrret. Disse iagttagelser og deres tolkning er forklaret i boxene 2, 3 og 4.

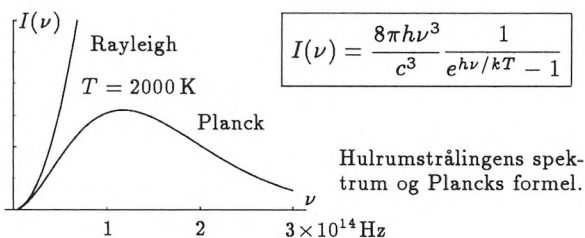


De tidlige bidrag af *Max Planck* (1858-1947), *Albert Einstein* (1879-1955), *Niels Bohr* (1885-1962) og andre skabte grundlaget for det, vi i dag kalder den gamle kvantemekanik. Den havde mange succeser ved beskrivelsen af atomernes egenskaber, men der var også tilfælde, hvor den klart var utilstrækkelig. Disse vanskeligheder blev helt opklaret med en ganske ny type mekanik, som omkring 1925 blev skabt af *Werner Heisenberg* (1901-1976), *Erwin Schrödinger* (1887-1961), *Max Born* (1882-1970), *Paul A. M. Dirac* (1902-1984) og andre. Kvantiseringen af energi og af flere andre fysiske størrelser er en naturlig følge af den

### Box 2: Hulrumsstrålingen

Max Planck 1900: Et ophedet legeme vil udsende elektromagnetisk stråling som infrarødt, synligt og ultraviolet lys. Spektret fra et absolut sort legeme (et lille hul i væggen til et opvarmet hulrum) er en kontinuert, klokkeformet kurve, som viser intensiteten som funktion af strålingens frekvens. Tidligere beregninger af Lord *Rayleigh* baseret på statistisk termodynamik, kunne nok gengive kurven for lave frekvenser, men for høje frekvenser gik det galt, idet Rayleighs formel gik mod uendelig. Dette blev meget malende kaldt den 'ultraviolette katastrofe'.

Nu lykkedes det for Planck at finde et matematisk udtryk, som nøje gengav kurven i hele frekvensområdet. Lidt senere udledte han også dette udtryk teoretisk.



Det kunne han imidlertid kun gøre, hvis han antog, at energien fra hulrummets varme vægge blev omsat til stråling i 'energibundter' af en bestemt størrelse, nemlig

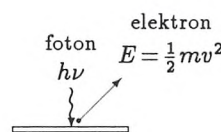
$$E = h\nu,$$

hvor  $\nu$  er strålingens frekvens. Konstanten  $h$ , som har dimension af energi gange tid, blev kaldt *virkningskvantet*, men omtales nu mest som *Plancks konstant*. Den viste sig snart at være en afgørende ny naturkonstant, som optræder overalt i kvantefysikken.

### Box 3: Den fotoelektriske effekt

Albert Einstein, 1905: Når ultraviolet lys falder ind mod en metaloverflade udsendes der elektroner fra metallet. Denne fotoelektriske effekt havde været kendt i nogen tid, men kunne ikke rigtig forklares ved den elektromagnetiske teori. Blandt andet var elektronerens energi bestemt af lysets frekvens og ikke, som ventet, af lysets intensitet.

Einstein kom nu med en helt ny ide, en lyspartikel, som senere blev kaldt en *foton*. Einsteins hypotese var, at en foton med frekvensen  $\nu$  har energi  $h\nu$ .



$$E = h\nu - W$$

Den fotoelektriske effekt og Einsteins fotoelektriske ligning

Ved fotoeffekten overføres denne energi til elektronen ved en stødlignende proces. Det kræver imidlertid et vist arbejde  $W$  at rive elektronen løs fra metallet. Derfor vil den største kinetiske energi, som en elektron kan have, når den forlader metallet, være

$$E = h\nu - W.$$

Dette er Einsteins fotoelektriske ligning, som ikke blot indførte foton-begrebet i fysikken, men også klart pegede på den vidtrækkende betydning af konstanten  $h$ , som få år forinden var fundet af Planck.

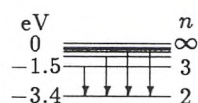
nye kvantemekanik, som i dag er det faste fundament for alle beskrivelser af stof og stråling.

Den sidste ligning i box 5 kaldes den tidsuafhængige Schrödingerligning og udtrykker i kvantemekanisk form den klassiske lov om energiens bevarelse. Det første led repræsenterer den kinetiske energi, det andet den potentielle energi, mens leddet på højre side er den totale energi. Hvis man benytter kvantemekanikkens regler for beregning af middelværdier, kan ligningen skrives som

$$\langle T \rangle + \langle V \rangle = E$$

#### Box 4: Atomernes spektre

Niels Bohr, 1913: Spektret af hydrogen, som det iagttages fra et udladningsrør, viser en række skarpe linier. Frekvenserne af disse linier kan gengives meget nøjagtigt ved en simpel empirisk formel, som blev opdaget af *Balmer* i 1885. Det var et mysterium for den klassiske elektrodynamik, at spektret skulle bestå af skarpe linier. En elektron i et atom må udføre en art svingende bevægelse, altså være accelereret.



$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{me^4}{\hbar^2 n^2}$$

Hydrogens kvantetilstande med Balmerovergangene og Bohrs formel for tilstandenes energi.

-13.6 ————— 1

Men en sådan elektron må efter elektrodynamikens til stadighed udsende elektromagnetisk stråling og derfor miste energi. Elektronen vil løbe hurtigere og hurtigere, hvorved den ganske vist vinder kinetisk energi. Men den potentielle energi i det elektriske felt aftager endnu mere og elektronen vil snart ende op i atomets kerne. I modsætning til al erfaring ville stoffet overhovedet ikke være stabilt.

Bohr indså, at spektralliniernes budskab var, at atomets energi er kvantiseret. Han postulerede, at en elektron kun kan befinde sig i et antal *kvantetilstande*, hvor den ikke stråler. Hver tilstand har en bestemt energi, og en foton udsendes kun, når en elektron springer fra en tilstand med energi  $E_1$  til en anden med den (lavere) energi  $E_2$ . Fotonens energi og dermed frekvensen af det udsendte lys bestemmes derfor af

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Denne teori forklarede ikke blot spektrallinierne. Ud fra kendte naturkonstanter, herunder Plancks konstant, reproducerede teorien de observerede frekvenser med meget høj præcision. Og sidst, men ikke mindst, gav teorien stabilitet til stoffet.

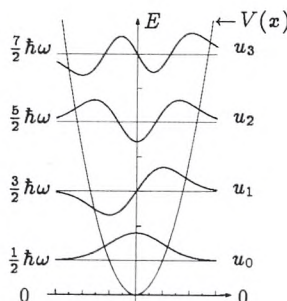
der udtrykt i ord siger, at middelværdien af den kinetiske energi plus middelværdien af den potentielle energi er den totale energi. I kvantemekanikkens hjerte, Schrödingerligningen, finder vi således indskrevet det store forenende princip i fysikken: Energien er bevaret.

#### Energi i systemer med tiltagende kompleksitet

Den historiske udvikling illustrerer, hvordan energibegrebet er blevet udvidet til at omfatte alle dele af det fysiske univers. Energi anvendes til at beskrive systemer og

#### Box 5: Energi i kvantemekanikken

Kvantemekanikken har en række forskellige formuleringer. I *Schrödinger-formuleringen*, som ofte kaldes *bølgemeknikken*, er den hele tilstand af et fysisk system, eksempelvis en elektron i et atom, beskrevet ved en *bølgefunktion*  $\psi$ . Denne er en funktion af de tre rumkoordinater  $(x, y, z)$  og af tiden  $t$ .



$$V = \frac{1}{2} kx^2$$

$$E = \hbar\omega(n + \frac{1}{2})$$

$$\omega = \sqrt{k/m}$$

Kvantetilstande og bølgefunktioner for endimensionel harmonisk oscillator.

Bølgefunktionen skal tilfredsstille en differentiaalligning, *Schrödingerligningen*, som (i én dimension) har formen

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t},$$

hvor  $V(x)$  er det endimensionale potential, hvori en partikel med masse  $m$  bevæger sig.

Hvis man antager, at løsningen til denne ligning er af formen  $\psi(x, t) = f(t)u(x)$ , separerer ligningen i to. Ved separationsprocessen indføres der en konstant, som (ved forsyn) kaldes  $E$ . Den tidsafhængige del af løsningen bliver en simpel oscillerende funktion  $f(t) = \exp(-iEt/\hbar)$ . For den stedafhængige del  $u(x)$  gælder differentiaalligningen

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dx^2} + V(x)u(x) = Eu(x).$$

Kvantisering hænger sammen med, at denne ligning kun har fysisk acceptable løsninger (som ikke render vildt i store afstande) for bestemte værdier af  $E$ . Disse værdier, som kan nummereres  $E_0, E_1, \dots, E_n, \dots$  er partiklens kvanteenergi. En måling af partiklens energi kan udelukkende give en af disse energier.

systemers vekselvirkning. Systemer kan være simple som et hydrogenatom eller en rullende kugle. De kan også være komplekse som en levende organisme eller et menneskeligt samfund. Selv i de mest komplicerede tilfælde kan man som regel opstille en art energiregnskab, som fortæller noget væsentligt. I de følgende afsnit skal vi se nogle få eksempler på anvendelsen af energibegrebet i systemer med tiltagende kompleksitet.

Vor tids videnskab ved en masse om stoffets struktur og om stoffets dele. Vi mener at kende de fleste af de grundlæggende lovmæssigheder, som redegør for egenskaberne af atomare systemer. Men på nær for de aller simpleste af den slags systemer ligger en detaljeret beregning af bestemte egenskaber som regel uden for mulighedernes grænse, selv med vor tids computere til hjælp. Og selv hvis en sådan beregning skulle være mulig, var den måske slet ikke interessant, fordi resultaterne ikke kan udtrykkes ved *egne* begreber. Har man en gas i en beholder med stempel, er det væsentlig mere værdifuldt at vide, at produktet af tryk og volumen er konstant ved konstant temperatur, end det er at kende den præcise beliggenhed og hastighed af  $10^{23}$  molekyler om et sekund.

Energi er et egnet begreb. Selv når man ikke ved ret meget om et system, kan man ofte beregne dets energi og siden fra energien nå frem til andre betydningsfulde størrelser. Lige så vigtigt er det, at energi, eller i det mindste ændring i energi, er noget, som kan måles. Energi er en observerbar størrelse. Dette er helt afgørende for atomare systemer, hvor de fleste makroskopiske metoder ikke slår til. Energi giver os i sit væsen et signal. Det er ikke nogen tilfældighed, at de tre klassiske iagttagelser som er omtalt i box 2, 3 og 4, alle omfattede måling af energi.

### Atomere

De fleste af vore daglige erfaringer om verden kan føres tilbage til en enkelt fysisk kraft: Den elektriske vekselvirkning. Det er den elektriske vekselvirkning mellem den positive atomkerne og de negative elektroner som, sammen med kvantemekanikkens love, bestemmer struktur og egenskaber ved stoffet omkring os. På vor planet, hvor temperaturen blot er nogle få hundrede grader over det absolutte nulpunkt, er stof opbygget af atomer. Så hvad vi sanser og oplever kan føres tilbage til den elektriske vekselvirkning. De andre naturkræfter: Den stærke og den svage kernekraft og tyngdekraften er af mindre direkte betydning. Men vi skal selvfølgelig ikke glemme, at det er kernen, som giver atomet det meste af dets masse og således gennem tyngdekraften sørger for, at vi holder fødderne på jorden.

### Molekyler

Et atom er udadtil elektrisk neutralt, og der vil derfor ikke være nogen kraft imellem to atomer, hvis afstanden mellem dem er stor i forhold til deres diametre. Men bringes atomerne så nær hinanden, at deres elektronskyer begynder at overlape, vil de tiltrække hinanden, og der kan dannes et *molekyle*. Atomerne vil dog aldrig helt falde sammen,

### Box 6: Hvorfor har atomer den størrelse, de har?

Man kan skønne over størrelsen af et atom ved en simpel energibetragtning sammen med loven for den elektriske vekselvirkning og et kvantemekanisk princip. Lad os tænke på et simpelt endimensionalt 'hydrogenatom', hvor en elektron med masse  $m$  og ladning  $-e$  er bundet til en kerne med ladning  $+e$ . Den potentielle energi af elektronen i afstanden  $r$  bliver

$$E_p = -\frac{e^2}{r}.$$

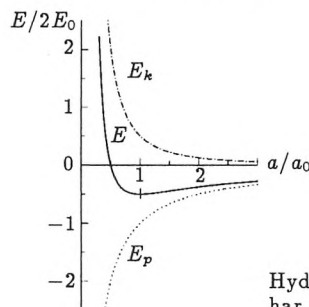
Vi indfører nu kvantefysikken kognet ned til Heisenbergs usikkerhedsrelation. Elektronens binding til kernen er en rumlig afgrænsning af størrelsesordenen  $r$ . Efter usikkerhedsrelationen betyder dette, at elektronen farer frem og tilbage med en impuls, af størrelsesordenen  $p = \hbar/r$ . Den tilsvarende kinetiske energi er

$$E_k = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2mr^2}.$$

Følgelig bliver atomets totale energi

$$E = E_k + E_p = \frac{\hbar^2}{2mr^2} - \frac{e^2}{r}.$$

Denne funktion har et minimum ved en eller anden afstand  $r = a$ . Overlades atomet til sig selv, vil det



Hydrogenatomets totale energi har minimum for Bohr-radius.

minimere sin totale energi, hvilket ved differentiation kan ses at indtræffe for

$$a = \frac{\hbar^2}{me^2}.$$

Dette resultat er, heldigt nok, netop 'Bohr-radius' af hydrogenatomet ( $a_0 = 5.3 \times 10^{-11}$  m). Den tilsvarende totale energi (bindingsenergien) bliver

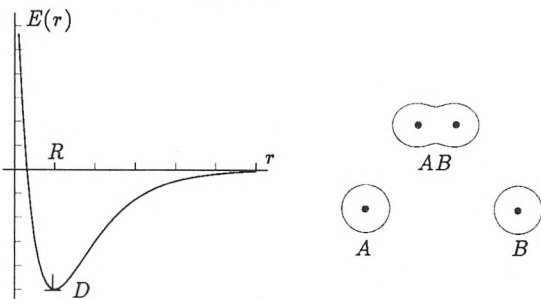
$$E_0 = -\frac{1}{2} \frac{me^4}{\hbar^2} \quad (= -13.6 \text{ eV}).$$

Atomets størrelse og bindingsenergi følger således helt af kvantefysikken og den elektriske vekselvirkning.

fordi frastødningen mellem deres positive kerner vil dominere over tiltrækningen for små afstande.

### Box 7: Energien af et molekyle

Dannelsen af et toatomigt molekyle kan illustreres ved en kurve, der viser atomernes totale energi som funktion af afstanden mellem dem. V kan se på to atomer *A* og *B*, som bringes nærmere hinanden således, at de til slut danner molekylet *AB*.



Ved en afstand  $r$  mellem kernerne vil systemet af elektroner og kerner have en energi  $E(r)$ . Er afstanden mellem atomerne stor, er  $E(r) = 0$ , men skal der dannes et stabilt molekyle må  $E(r)$  aftage med afstanden, indtil et minimum nås. Ved endnu mindre afstand vokser energien igen på grund af frastødningen mellem kernerne. Den afstand  $r = R$ , hvor energien har minimum, er ligevægtsafstanden mellem de to kerner. Minimumets dybde  $D$  er den energi, der kræves for at dissociere molekylet eller, modsat, den energi som frigøres (til syvende og sidst som varme) ved molekylets dannelse.

Et simpelt diatomisk molekyle er allerede et væsentlig mere kompliceret system end et atom. Som atomet har molekylet et system af elektroner. Men de løsest bundne af disse elektroner tilhører ikke de individuelle atomer i molekylet. Elektronerne er fælleseje og udveksles stædt mellem atomerne, hvilket gør kvantemekaniske beregninger af molekylets energi mere komplicerede. Yderligere er der nye bevægelsesformer, som bliver mulige i et molekyle. I box 7 omtales det, at ligevægtsafstanden mellem atomerne svarer til den laveste energi. Men atomerne kan oscillere omkring ligevægt, hvorved molekylet får vibrationsenergi. Ligeledes kan molekylet rotere om en akse vinkelret på forbindelseslinjen mellem de to atomkerner, således at molekylet også kan have rotationsenergi. På den måde bliver en fuldstændig redegørelse for energiforholdene i selv et simpelt molekyle en kompliceret sag. Dette er også tydeligt at se på de udsendte spektre, som er meget mere komplicerede end dem fra de individuelle atomer.

### Box 8: Kernernes skalmodel

Studiet af mange-legeme systemer optræder i næsten alle grene af nutidens fysik og strækker sig fra makroskopiske fænomener i stof over atomers og molekylers struktur til kerner og partikler. Kernen har her en særlig position, fordi den på den ene side er tilstrækkelig kompleks til at udvise en lang række kollektive fænomener, på den anden side tilstrækkelig simpel til at have skarpe kvantetilstande.

→→→→→→→→→→	10	50
→→→→→→→→→→	2	2
→→→→→→→→→→	6	4
→→→→→→→→→→	8	28
→→→→→→→→→→	2	4
→→→→→→→→→→	6	20
→→→→→→→→→→	2	4
→→→→→→→→→→	2	8
→→→→→→→→→→	2	2

De laveste tilstande i skalmodellen og deres opfyldning med nucleoner. Tallene til højre er de såkaldte magiske tal, som giver en særlig stabilitet.

Den kernefysiske *skal-model* giver et eksempel på energiens kvantisering i en kerne. I denne model betragter man *nucleoner* (dvs. protoner og neutroner) med masse  $m$ , som bevæger sig uafhængigt i et fælles potential skabt kollektivt af dem alle. I den simpleste version af modellen tages dette potential som et 3-dimensionalt harmonisk oscillatorpotential  $V(r) = \frac{1}{2}kr^2$ , hvor  $r$  er afstanden fra kernens centrum, og  $k$  er en konstant. Den kvantemekaniske løsning for dette system giver en række kvantetilstande med energier  $E_n = n\hbar\omega$ , hvor  $n$  er et helt kvantetal  $0, 1, 2, \dots, n$ , og hvor  $\omega$  er den klassiske oscillatorfrekvens  $\sqrt{k/m}$ . Efter Paulis udelukkelsesprincip kan hver sådan tilstand rumme  $(n+1)(n+2)$  nucleoner af hver slags. I skalmodellen tager man yderligere hensyn til en vekselvirkning mellem impulsmomentet  $L$  og spinet  $S$  for hver nucleon, hvilket bevirker, at de individuelle oscillator tilstande splitter op. Det resulterende energiskema og dets opfyldning med nucleoner er i kvalitativ og, med justeringer, endog kvantitativ overensstemmelse med energitilstande, som kan observeres i kernerne.

### Kemi

Tager vi endnu et skridt mod større kompleksitet møder vi *kemien*. En videnskab som drejer sig om dannelse og nedbrydning af molekyler og andre aggregater af atomer. I princippet kan kemien forstås på grundlag af kvantemekanikken, men med undtagelse af de aller enkleste systemer bliver en detaljeret behandling umulig, og man må ty til andre metoder. På makroskopisk niveau er regnskaber over energi- og entropiændringer uundværlige ved studiet af kemiske reaktioner og termodynamik inden for kemien er blevet udviklet til en selvstændig disciplin.

## Kerner og partikler

Atomets kerne er et objekt, hvis lineære udstrækning er omkring  $10^4$  gange mindre end atomets, hvorimod den energiskala vi møder i kernen er omkring  $10^6$  gange større. Mens energier i atomer og molekyler måles i eV, er den relevante energienhed i kernen MeV.



Den ændrede energiskala sammen med det, at kernepartiklerne er meget tungere end elektronerne, betyder, at egenskaberne af en kerne i mange henseender er forskellige fra egenskaberne af et atom. Der er yderligere den forskel, at kræfterne, som bestemmer atomets opførsel, er de velkendte elektriske kræfter, mens kræfterne, som binder kernepartiklerne sammen, er de stærke kernekræfter, som er mindre godt forstået. Alligevel har man opnået en meget betydelig indsigt i kernen som et kvantemekanisk system, og den nøjagtighed, hvormed kerneegenskaber i dag kan beregnes, er ofte lige så god, som den der opnås for atomare systemer.

Der kan gives utallige eksempler på energibegrebets betydning inden for kernefysikken. Alfa-henfaldet, som er karakteristisk for mange tunge kerner, blev intensivt studeret ved dette århundredes begyndelse og gjorde det straks klart, at her fungerede naturen efter en ganske anden energiskala, end den man kendte. Beta-henfaldet, som giver et kontinuert

spektrum for de udsendte elektroner, var i lang tid en energimæssig gåde. Hvorfor frigjorde en proces mellem veldefinerede tilstande i to kerner ikke altid den samme mængde energi? Var der her et tilfælde, hvor energi ikke var bevaret? *Wolfgang Pauli* (1900-1958) ville ikke ofre energibevarelsen. For at redde den opfandt han en ny, næsten uagttagelig partikel, *neutrinoen*, som kunne løbe bort med den manglende energi. Neutrinoen, som senere er blevet eksperimentelt bekræftet, er en af de mest overraskende opdagelser baseret på loven om energiens bevarelse.

Atomkernens energi har som bekendt på mange andre måder påvirket ikke blot den videnskabelige, men også den tekniske og politiske udvikling. Studiet af masserne af atomkerner, som indgik i en kerneprocess, gav det første eksperimentelle bevis for ekvivalensen af masse og energi. Opdagelsen af fissionsprocessen skabte kernevåbnene og en mægtig ny kilde til energi. Energiproduktionen i sol og stjerner og syntesen af grundstoffer i universet blev forklaret ved kerneprocesser. I de senere årtier har den detaljerede undersøgelse af kernen som et kvantesystem med mange, men ikke for mange, partikler bidraget væsentligt til udviklingen af både kernefysikken og af kvanteteorien.

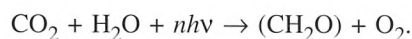
## Energi og landbrug

Fysikkens systemer kan godt være komplekse, men energi forbliver dog for dem en veldefineret størrelse, som i princippet kan fastlægges nøjagtigt ved beregning eller måling.

For systemer, som ikke udelukkende regeres af fysikkens love, er energi og energistrøm stadig vigtige begreber, men de taber noget af deres matematiske stringens. Det er også sider af energibegrebet, som er uden betydning i fysikken, der her bliver fremhævet.

Energiovervejelser er vigtige for studiet af levende organismer. Man bruger betegnelsen *metabolisme* eller *stofskifte* for de komplicerede kredsløb af energi og stof, som er en forudsætning for liv. Studiet af sådanne processer ligger helt inden for naturvidenskabens område. Situationen bliver imidlertid mere uoverskuelig, når vi betragter systemer, som på forskellig måde er udsat for menneskelig indgriben. Landbrug er et eksempel på et sådant system.

I termodynamisk forstand er landbrug et åbent system, som udveksler energi og stof med omgivelserne. Det adskiller sig fra et naturligt økologisk system, fordi mennesker griber ind i processerne. Den grundlæggende proces i landbrug er *fotosyntesen*, hvor grønne planter indfanger og oplagrer energi fra solen. I princippet er fotosyntesen en enkel kemisk proces, hvor energien i lyset omdanner kuldioxyd og vand til sukker og oxygen:



Her repræsenterer  $(\text{CH}_2\text{O})$  en del carbohydrat, for eksempel glukose,  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ , og  $n$  angiver det antal fotoner  $h\nu$ , som behøves for at drive processen. Omdannelsen af kuldioxyd til sukker kræver en energi omkring 5 eV per molekyle  $\text{CO}_2$ . Men da en foton i det synlige område har en kvante-

energi på kun 2-3 eV, kan processen oplagt ikke forløbe i ét trin. I virkeligheden behøves der mindst 8 lyskvanter per molekyle CO<sub>2</sub>, hvilket indebærer en kvanteeffektivitet på omkring 30 % ved processen. Naturen, som så ofte kender effektive løsninger, er altså langt fra at udnytte den energi i solstrålingen, som termodynamisk set skulle være tilgængelig.

### Box 9: Landbrugets energi-ratio

Man har forsøgt at vurdere effektiviteten af forskellige landbrugssystemer ved hjælp af den såkaldte *Energi-ratio* (energiforholdet) betegnet *R*:

$$R = \frac{E_o}{E_i},$$

hvor *E<sub>o</sub>* er næringsværdien af den føde, der forlader systemet og *E<sub>i</sub>* er den samlede tilførsel af energi til traktion, gødning, kemikalier m.v. (men ikke sole-energi). Tabellen viser eksempler på sådanne energi-ratioer, hvor tendensen klart er, at de højt udviklede landbrugssystemer har væsentlig lavere værdier end de primitive systemer.

#### Energi-ratio for forskellige landbrugstyper

	<i>E<sub>o</sub></i>	<i>E<sub>i</sub></i>	<i>R</i>
	GJ/ha/a		
Danmark	14	31	0.5
England	11	24	0.5
Holland	43	36	1.2
USA	9	13	0.7
Australien	6	2.4	2.8
Indien (eksempel)	10	0.7	15
Kina (eksempel)	281	6.8	41

*E<sub>o</sub>*: Vegetabiliske + animalske produkter

*E<sub>i</sub>*: Fossilt brændsel + humant og animalsk arbejde

Man skal ikke ukritisk bedømme landbrugssystemerne efter deres effektivitet ved udnyttelse af energien. Landbrugsproduktion træffer sig at være noget, som kan måles i energienheder, og det er derfor fristende at sætte udbyttet i relation til forbruget, som det sker med energi-ratioen. At dette forhold kan overstige 1, skyldes solen, som generøst subsidierer landbrugsproduktionen. Men et dimensionsløst forhold fortæller ikke noget om det absolutte udbytte og kvaliteten. Det viser sig ofte, at høje udbytter er forbundet med brugen af energi til arbejde og gødning.

Den effektivitet, hvormed solstråling faktisk omsættes til energi i plantemateriale, er dog endnu lavere. Det skyldes blandt andet, at kun en del af spektret kan drive fotosyntesen, at der tabes energi ved respiration og at det totale landareal ikke udnyttes. Den samlede effektivitet for planter

i naturen er omkring 0,25 %. Landbrug er menneskets metode til at sætte denne effektivitet i vejret og til at rette effektiviteten mod spiselige produkter.

Ved landbrugsmetoderne griber mennesket hovedsagelig ind i de naturlige processer gennem brug af energi. Energi til jordbehandling, til såning, til høst og til oplagring. I moderne landbrug er disse energitilførsler betydelige og overstiger næringsenergien i afgrøderne. Dette er i endnu højere grad tilfældet ved produktionen af animalske landbrugsprodukter, idet effektiviteten ved omsætning af vegetabilisk foder til animalske produkter kun er omkring 10 %.

### Energi og samfund

Som begreb blev energi udviklet inden for fysikken. Men energi er som bekendt også en vigtig faktor inden for teknologi, økonomi og politik. Energi er derved blevet et af de få eksempler på et vanskeligt og abstrakt videnskabeligt begreb, som er trængt ind i hverdagen og som af menigmand forstås intuitivt og oftest korrekt.

Intet system kan være mere komplekst og forvirrende end et menneskeligt samfund. Visse træk af dets funktion kan beskrives med økonomiske begreber. Men økonomiske teorier har ikke samme prediktive og analytiske kraft som fysikkens teorier. Ikke desto mindre er det lærerigt at forsøge at kombinere økonomiske begreber og begreber fra fysikken.

Den første vanskelighed, man møder ved et sådant forsøg, er et *måleproblem*. En fysiker måler energimængder i joule og energistrømme i watt. Hvis han skal gøre sig forståelig for en bredere kreds, er han villig til at acceptere andre enheder, for eksempel 1 liter benzin, som energienhed. Energi vil stadig være en målelig størrelse.

Inden for økonomi er det ikke så meget de fysiske størrelser som betyder noget. Det er *værdi*. Værdi, i sin monetære sammenhæng, er et begreb, som er ukendt for naturvidenskaben. Værdien af noget udtrykkes ved dets pris. Pris er en størrelse, som bestemmes af *markedet* gennem en iterativ procedure, hvor forsyning (som stiger med prisen) og efterspørgsel (som falder med prisen) til slut vil mødes. Fysikere er naturligvis meget forbeholdne over for så upålidelige og endog fluktuerende måleenheder som dollars, yen eller svenske kroner. Nogle fysikere har derfor foreslået, at man skulle bruge *energi* som mål for værdi. Hvis noget er svært at skaffe, vil det ofte være, fordi dets tilvejebringelse kræver megen energi eller i det mindste anstrengelse. Energi er ret sparsomt tilgængelig, energi er nødvendig for næsten enhver aktivitet i et samfund. så hvorfor ikke indføre en energiteori for værdi?

Økonomer har rystet på hovedet af sådanne forslag, hvilket er forståeligt. Man kan lige så lidt undertrykke loven om forsyning og efterspørgsel, som man kan ophæve tyngdeloven. Over for en sådan afvisning har også naturvidenskabsmænd vel efterhånden accepteret det økonomiske værdibegreb.

Den totale værdi af alle varer og tjenester i et samfund finder udtryk i *bruttonationalproduktet* (BNP), som eksempelvis kan måles i dollars per år. (\$/a). Hvert år sam-

mentæller nationale og internationale statistiske institutioner det hele og når, ved ikke helt gennemskuelige metoder, frem til BNP i faste \$ eller andre møntenheder.

### Box 10: Energiintensitet

Energiforbrug og BNP hænger ret nøje sammen. Forholdet mellem energiforbrug og BNP kaldes ofte *energiintensiteten* af den pågældende nationaløkonomi. Tabellen viser energiintensiteten for forskellige områder i verden for året 1975. Senere værdier er vanskelige at præsentere, da de internationale institutioner stort set har opgivet at producere sammenlignelige økonomiske data, som også omfatter de kommunistiske eller tidligere kommunistiske områder.

Om tabellen er det værd at notere, at indkomsten per person i de præsenterede områder adskiller sig med adskillige størrelsesordener. På trods af dette er energiintensiteten konstant indenfor en faktor to.

#### Energiintensitet (1975)

	Energi EJ/a	BNP 10 <sup>9</sup> \$/a	Intensitet MJ/\$
Nordamerika	80.5	1678	48
Latinamerika	12.5	327	38
Japan	14.2	496	29
Vesteuropa	50.3	1695	30
Danmark	0.8	34	22
USSR, Østeuropa	59.5	925	64
Kina	16.3	315	52
Asien (ekskl. Kina)	10.9	210	52
Afrika	5.0	163	31
Mellemøsten	4.1	153	27
Australien	3.1	94	33
Verden	256.6	6056	42

Energi fra BP Statistical Review (1976). BNP fra World Bank Atlas (1977). 1 EJ=10<sup>18</sup> J.

Den nære forbindelse mellem indkomst og energiforbrug er ikke noget mysterium. Næsten enhver aktivitet, som medregnes i bruttonationalproduktet, kræver energi. Men ser man på detaillerne ved denne forbindelse kan man godt få øje på nogle tendenser. De rige lande har gennemgående lavere energiintensiteter end de fattige. Dette er ikke overraskende i betragtning af produktionens forskellige sammensætning. De rige lande har økonomier som er præget af tjenesteydelser, de fattige lande har økonomier som præges af landbrug og tunge basale produkter som stål og cement, som alle er energikrævende.

Energi er af afgørende betydning for alle nationer. Det er blevet tydeligt gennem de sidste tyve år, hvor prisen på energi har undergået voldsomme svingninger. Udviklingen af vore samfund, fattige som rige, afhænger af pålidelige forsyninger af energi, som er til at betale. Det er en af de lektioner vi har lært.

Der er en lang vej fra den vage forestilling om *vis viva* til vore dages *kvantechromodynamik* og langt fra hestevogne til rumfærger. Videnskaben og samfundene har sammen gået denne vej. Det har været sagt, at videnskaben skylder dampmaskinen mere end dampmaskinen skylder videnskaben. Men selv om denne påstand skulle være rigtig, så har videnskaben vel fuldtud tilbagebetalt sin gæld gennem udviklingen af det almene *energibegreb*, som i dag gennemsyrrer både videnskab og samfund.

#### Referencer:

- 1) Abraham Pais, *Subtle is the Lord. The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, Oxford, 1982.
- 2) Abraham Pais, *Inward Bound. Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press, Oxford, 1986.
- 3) J.T. McMullan, R. Morgan and R.B. Murray, *Energy Resources and Supply*, John Wiley & Sons, London, 1976.
- 4) Bent Elbek, *World Energy Problems i Physics and Contemporary Needs*, Plenum Press, New York, 1979.



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.