

TORBEN SMITH SØRENSEN

## KAOS OG ORDEN I NATUR OG SAMFUND

## Indledning

I denne indledning fremstilles visse fundamentale termodynamiske begreber i stikordsform. Mere skønnes ikke nødvendigt, for jeg tror, at situationen har ændret sig til det bedre, siden C.P. Snow i sin berømte bog om "De to Kulturer" omtalte de kløfter, som herskede i det britiske samfund i midten af tresserne mellem åndens dannelse inden for humaniora og naturvidenskab. Begge parter skildredes som fagidioter i bred forstand, og specielt omtaltes det som lige så flovt ikke at kunne differentiere og integrere, som ikke at kunne stave. At indrømme ikke at kende grundsubstansen i termodynamikkens anden hovedsætning, svarede til ikke at have set eller læst et værk af Shakespeare. Jeg tror, at denne tilstand har forbedret sig siden, så jeg vil forudsætte, at læseren har et vist kendskab til loven om entropien og dens vækst. (Derimod er det vist stadig for meget at forlange, at humanister skal kunne "stave" i naturvidenskabelig forstand!). Entropien - denne negligerede tvilling til energien - skabt af den tyske fysiker Clausius under navnet "forvandringsindhold" i 1854. Senere (1865) ændrede han - gudskelov! - navnet til entropi, et græsk kunstord ligesom "energi", der blev almindeligt omkring den samme tid.

Rudolph Clausius var en tør og saglig, tysk videnskabsmand. Han udtrykte sig temmelig abstrakt, og det er tvivlsomt om hans begreb var slået an i det mere praktiske England, hvis det ikke havde været for William Thomson (den senere Lord Kelvin) og hans mere populære fremstillinger af termodynamikken. Han skabte f.eks. glosen "varmedøden", som altid har fascineret dem, der stødte på begrebet. Clausius sagde: "Die Energie der Welt ist konstant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu." Når

universets entropi var blevet maksimal, var vi nået til varmedøden, hvor alt var kaotiske, termiske bevægelser, og den termodynamiske tid gået i stå.

Begrebet varmedød er dog af tvivlsom værdi. Termodynamikken har altid haft sine primære anvendelsesområder på begrænsede og let overskuelige systemer, som elektriske batterier, sæbebobler, luftarter bag stempler o.s.v., snarere end i det kosmiske. Isoleerer man et sådant system fra omgivelserne, så kan det nå sin egen private "varmedød", hvor alt er i ligevægt. Det ville dog være betydeligt bedre at tale om "entropidød", for det er langt fra altid, at systemet bliver varmere, når de irreversible, entropiproducerende processer forløber. For eksempel vil der ikke komme mere varme, fordi en spand varmt vand hældes sammen med en spand koldt vand. Men der er kommet mere entropi, og det betegner noget uopretteligt. Der kommer også mere entropi, når sukker går i opløsning i vand, men denne entropi har ikke noget med varme at gøre. På det molekylære plan er entropi et mål for systemets uorden, det vil sige for antallet af forskellige måder, som systemets molekyler kan arrangere sig på, uden at man udefra kan "se forskel". Dette antal er uhyrligt (fordi der er ca. en kvadrillion molekyler i en sodavand), men ved at tage logaritmen til tallet får man det ned på et fornuftigt niveau, og sikrer sig, at entropi er noget der kan lægges sammen som to bundter gulerødder. Disse sammenhænge påvistes allerede i forrige århundrede af den østrigske fysiker Ludwig Boltzmann.

Entropi er (også) et mål for roderiet i et system, eller den manglende information vi har om det. Imidlertid er der to slags rod, og kun den ene slags har forbindelse til "varmt" og "koldt" i daglig tale. Det er uorden i den molekylære bevægelse, som vi kalder "temperatur", jo bredere den statistiske fordeling af molekylernes bevægelse er, jo højere er temperaturen. Molekylerne kan imidlertid også "rode" på den mere velkendte, rumlige måde. Når sukker opløses i vand for at fremstille foromtalt sodavand, så stiger entropien, for efter opløsning og omrystning ved vi mindre om, hvor sukker- og vandmolekylerne befinder sig, end før denne proces.

### Kosmisk termodynamik

Med vor nuværende viden kan vi dog også anvende termodynamikken kosmisk, men der ser dog snarere ud til at være tale om en "varmefødsel" (Big Bang) end om den klassiske varmedød. Det sidste vil kun finde sted, hvis gravitationen kan vinde over udvidelsesinertien og universet er endeligt krumt i relativitetsteoriens forstand. Hvis vi har et saddelformet (uendeligt) univers, vil det fortsætte med at udvide sig - omend med stadig aftagende hast - og det vil lide kuldedøden. I øvrigt er grundlaget for Big Bang-teorien en temmelig naiv anvendelse af ligevægts-termodynamik. Det er den gamle historie med den ideale gas indespar-

ret bag et stempel med lodder, som bliver koldere under udvidelse, når lodderne tages langsomt af (dvs. i små vægtenheder). En sådan proces er reversibel, og der skabes derfor ingen entropi. Entropien skulper blot fra en form (der termiske: rod i molekylebevægelsen) til en anden (den rumlige: rod i rumlig fordeling). I kosmologien er stemplet med lodderne blot erstattet af tyngdekrafterne, og "gassen" består af et brølende inferno af fotoner (lys) og neutrinoer med en massefylde (1/100 sek e.B.B.) på 4 milliarder gange vands og en temperatur på 100 milliarder grader. Dantes helvede er en fantasiløs godnathistorie i sammenligning. I dette inferno var der - efter fysikernes beregninger - en uendelig lille forurening af kernepartikler, som i løbet af de næste 18 milliarder år e.B.B. på dette sted i universet gennem indviklede procesforløb skulle samle sig i dig, min læser! Det fantastiske består i, at fysikerne altså regner på verdenshistoriens mest dramatiske instabilitet som på en fredsommelig reversibel proces uden den ringeste entropiproduktion. Enhver termodynamiker ved, hvor svært det er at udføre reversible processer i laboratoriet, fordi sådanne processer i princippet skal forløbe uendeligt langsomt. Men her er der tale om voldsomme forandringer inden for hundrededele af et sekund. Det lyder næsten utroligt, og Steven Weinberg ("De første tre minutter") lader da også et sted en sidebemærkning falde, om der dog ikke skulle være nogen "indre gnidning" i denne ret så kraftige grød. Det er tænkeligt, at den nærmeste fremtid vil bringe betydeligt mere realistiske modeller frem, der tager højde for entropiens vækst. Hvis det hele ikke er et kollektivt fysiker-flop, foranlediget af utidig ekstrapolation af vor yderst begrænsede viden til områder, hvor vor dumhed kan udfolde sig modsigelsesfrit! Det er før set.

### Det molekylære kaos og termodynamisk ligevægt

Vi forlader nu det termiske kaos i sekunderne efter urbraget, og rykker frem til planeten jorden år 1985, hvor grundsubstansen er forskellige former for molekyler. Selv om vi finder døden uanturlig, så er det dog livet, som er mærkeligt, mens døden i form af det molekylære kaos er grundvilkåret. Et dødt pindsvin bliver en kort tid hjemsted for en mindre fest i form af maddiker o.l., som her boltrer sig som olieselskaberne i Nordsøen, men snart er de højst ejendommelige, ekstremt ordnede (og derfor laventropiske) molekyler i pindsvinets celler nedbrudt til trivielle komponenter i kemisk ligevægt med den omgivende muld. Ud over at den evige molekylebevægelse (temperaturen) holdes i gang af det milde solskin, så kan der ikke ske nogen udvikling i et termodynamisk ligevægts-system, fordi der er molekylært kaos. Dette indebærer, at alle processer sker lige hurtigt i fremadgående og i tilbagegående retning (detailleret balance). Skulle der ved et tilfælde blive dannet molekyler med en lidt mere kompliceret

struktur. så bliver de lige så hurtigt nedbrudt igen. Alt videregående konstruktionsarbejde er ørkesløs Sisyfos-beskæftigelse. Spørgsmålet rejser sig naturligt, hvordan i alverden livet i al dets kompleksitet dog har kunnet hæve sig op over dette molekylære kaos. Er det som med Münchhausen, der reddede sig selv og sin hest op af sumpen ved at trække sig i håret? Hertil giver termodynamikken det svar, at jorden ikke er et isoleret system (hvor entropien blot ville blive maksimal og så færdig), men et energetisk åbent - omend stofligt lukket - system, der i middel holdes i en såkaldt stationær tilstand i en vis afstand fra termodynamisk ligevægt. Solskin og jordrotation i forening skaber de store strømhvirvler i atmosfæren og i verdenshavene. Disse makrobævægelser har skabt en orden i det molekylære kaos lang tid før livet udviklede sig. Overlejret på denne orden finder vi en ny form for kaos (makrokaos) i form af delvist uforudsigeligt vandrende høj- og lavtryk, skypumper og tordenvejr o.s.v. Denne form for kaos skal vi vende tilbage til senere.

I det energetisk åbne system, som planeten jorden er, har vi stationaritet i døgnmiddel. D.v.s. at indstrålingen af energi fra solen svarer til udstrålingen af energi fra jorden til verdensrummet. Det, der kan få tingene til at løbe rundt hernede, er det forhold, at den modtagne energi har en højere kvalitet end den udstrålede energi. I de 8 minutter, som fotonerne er om at rejse gennem verdensrummet fra solen til jorden vekselvirker de stort set ikke med stof, og da fotoner ifølge deres natur heller ikke vekselvirker med hinanden, så har de ved ankomsten til jorden en temperatur på ca. 6000 grader Kelvin svarende til temperaturen i solens yderste lag (fotosfæren), som de var i ligevægt med, før de røg ud i verdensrummet. Der er langt fra denne temperatur ned til de sædvanlige temperaturer i atmosfæren omkring os, og det er denne temperaturforskelle, der kan udnyttes som nyttig energi til at drive forskellige processer på jordens overflade, f.eks. Golfstrømmen, opbygningen af stivelse i en kartoffel eller vedligeholdelse af skyskrabere i New York. Når fotonerne er kommet i ligevægt med temperaturen i atmosfæren eller på jorden, så er deres energiindhold værdiløs som arbejdskilde. De stråles da tilbage til verdensrummet i form af betydelig mere langbølget infrarød varmestråling. Liv på jorden er altså ikke forbudt i følge termodynamikken, hvilket jo heller ikke ville være så godt, idet man da måtte forbyde denne videnskabsgren. Men der er jo langt fra dette faktum til en forklaring på, hvorfor dette usandsynlige liv måtte bryde frem.

### Livets byggeklodser

Alt tyder på, at jordens uratmosfære var meget anderledes end den nuværende. Den har hovedsageligt indeholdt kvælstof, kulilte, brint og vanddamp. For 4,5 milliarder år siden må man forestille sig en temmelig varm jord (overfladetemperatur omkring

25 grader C) med en livlig vulkansk aktivitet, intens ultraviolet stråling, ustandselige heftige tordenvejr og store mængder af meteoritnedslag.) Hvis der var brint i overskud, kan man beregne, at praktisk taget al kulilte ville reagere med brint og danne metan og vand. Termodynamisk set skulle kvælstof og brint også danne ammoniak, men det sker dog kun, hvis der er passende katalysatorer til stede. Udfra sådanne forestillinger foretog Miller og Urey i 1953 deres berømte eksperiment, hvor de sendte elektriske udladninger gennem en blanding af metan, ammoniak og vanddamp. Der anvendtes 60.000 Volt og udladningerne foregik i flere dage, en energitilførsel svarende til 50 millioner af års ophold i uratmosfæren. Vanddampen fortættedes og heri fandt man flere af de i de nuværende proteiner forekommende aminosyrer, mælkesyre, urinstof og en mængde andre organiske forbindelser.

Eksperimentet er imidlertid oversimplificeret. Uratmosfæren har snarere været i en kaleidoskopisk tilstand af stadig skiftende sammensætning. Vulkanske gasser med svovl, svovlilte eller svovlbrintedampe har krydret det hele godt. Energikilden har nok været den ultraviolette stråling snarere end lyn. Der er i en sådan blanding rigelig mulighed for at få dannet samtlige aminosyrer, fedtsyrer, pyrimidin og purinbaser. Alle elementære byggeklodser i det vi nu kalder liv. I øvrigt viste Wollin og

Ryan for nylig (1979) i et interessant eksperiment, at hvis man blot blander det reaktive stof cyanamid med kalium nitrit ved stuetemperatur og lader dette reagere i fra 2 til 13 måneder, så sker der under en mængde flotte farveskift en lang og kompliceret række af kemiske reaktioner. Der blev isoleret egentlige proteiner, nukleinsyrebasen og nukleosider (baser bundet til sukkerarten pentose). De sidste er byggeklodser i DNA og RNA. Cyanamid kan let dannes. Det er fundet i meteoritter og det fremkommer ved ultraviolet bestråling af en vandig opløsning af ammoniumcyanid. Kvælstof-iltforbindelser kan dannes af vanddamp og ammoniak ved UV-bestråling. Heraf kan kalium nitrit dannes, da der er rigeligt med kalium i jordens bjergarter. I øvrigt har det almindelige lermineral montmorillonit også været foreslået som katalysator af den første proteinsyntese fra aminosyrer. Vi kan let forestille os, hvordan det har sydet og boblet overalt i den store heksekedel. Som Shakespeare skriver i Macbeth: "In the cauldron boil and bake, eye of newt and toe of frog, wool of bat and tongue of dog..."

### Leg med klodser, der fører til noget

Af det foregående ser man, at der har været rige muligheder for at skabe samtlige molekylærbiologiske byggeklodser i jordens "ur-suppe". Problemet er imidlertid, hvorledes yderligere organisation har kunnet foregå, helt op til de ekstremt specifikke makro-

molekyler, der præger den nuværende levende celle. Man kunne måske mene, at 1 mia. år har været rigeligt til eksperimenter med kemiske processer, hvis tidsskala er under et sekund, men det er ikke tilfældet, hvis kun den rene tilfældighed hersker. Man kan hurtigt overbevise sig om, at hele universets alder ikke rækker til en totalt tilfældig syntese af et lille protein som insulin udfra en ligelig blanding af de 20 aminosyrer, selv om hver påhægtning eller afklipping af en aminosyre kun tager et 1 mikrosekund. Det er kampen mod den detaljerede balance, der ødelægger det hele.

For at kunne forstå, hvad der skal til for at kemien begynder at organisere sig selv, kunne vi anvende en mere velkendt historie. Den fattige opfinder i en baggård og hans kamp mod en uforstående omverden. For det første må en sådan opfinder naturligvis ikke glemme de fremskridt, han har gjort dagen før. I ovennævnte tilfældighedsmodel var dette tilfældet: selv i en situation, hvor 90% af proteinmolekylet er bygget korrekt op, er der intet til hinder for, at det bliver nedbrudt igen. Vores opfinder må dernæst forsvare sin opfindelse mod folk, der kunne tænkes at hugge ideen. Opfinderen må altså protokollere og beskytte sin information. Måske er hans eneste mulighed at finde en velvillig større og stærkere organisation (eller selv skabe denne) i form af et mindre firma. Her starter konkurrencen på et højere niveau i hierarchiet. Bliver produktionen en succes, må firmaet og organisationen enten udvides eller blive opkøbt af et større og mere kapitalstærkt firma o.s.v. Langt de fleste produktioner bukker under for konkurrencen på et eller andet trin. Meget få produktioner ender som verdensomspændende, højt organiserede kæmpekonger med skyskrabere i New York og Singapore. En sidste vigtig ting: analyserer vi grundlaget for de forskellige udvidelser af produktionen, så ser vi, at reproduktion og innovation er to væsentlige aspekter på hvert trin. Man kan f.eks. blive multinational ved simpelthen at kopiere produktionsmetoden i stamvirksomheden i en række andre lande. Det vil dog hurtigt vise sig, at man må indføre en række større eller mindre ændringer i organisations- og produktionsformen alt efter de lokale forhold. Der må skabes en kvalitativt ny, overordnet organisationsform til at styre alle datterselskaberne (administrativ innovation). Endelig vil den hårde konkurrence med andre multinationale hurtigt tvinge firmaet til en teknisk-videnskabelig innovation. Innovationen er på hvert trin ikke ukritisk, men behandles stærkt selektivt. Som enhver forsknings- og udviklingsafdeling i et større firma ved det, er ledelsen og salgsafdelingen kritiske over for nye, "gode" ideer.

Der må altså findes tilsvarende oplagrings- og beskyttelsesmekanismer for den molekylære information, som den, der er givet ved peptidsekvensen i et proteinmolekyle. Der må også findes processer, der sørger for reproduktion og innovation, samt filtrering af de opståede innovationer (mutationer). Som vi ser,

gælder det om at føre Darwins teorier om konkurrence og selektion ned på det molekylære niveau. Naturligvis uden at vi skal til at besjæle molekylerne (antropomorfisme), som f.eks. Teilhard de Chardin har forsøgt. Det har måske mening i en teologisk sammenhæng, men næppe i en naturvidenskabelig. Naturvidenskabens spilleregler (som naturligvis kan vise sig forkerte i det lange løb, evt. "forkerte" p.g.a. deres moralske konsekvenser) går altid ud på at "forklare" denne komplekse verden ud fra velstuderede mindsteenheder og deres - ofte mindre velstuderede - vekselvirkninger.

Den tyske fysisk-kemiker Manfred Eigen, som fik Nobelprisen for sine metoder til at studere hurtige, kemiske reaktioner, kastede sig gennem 70'erne ud i omfattende teoretiske spekulationer om, hvordan livet kunne være opstået. Selv om der stadig er mange problemer i hans teorier, så virker det dog som om, han er på rette spor, idet han får inddraget netop alle de elementer, der beskrives ovenfor. Eigen ser det centrale i den næsten perfekte kopiering af informationen. I dag sker dette i cellekernen v.h.a. DNA-molekylerne i kromosomerne (i de eukariotiske organismer). Reproduktionen er meget præcis, fordi den bliver hjulpet af enzymer med stor specificitet. Disse enzymer er proteiner, hvis aktivitet bestemmes af peptidsekvensen, som der er kodet for i DNA-dobbeltspiralen. Det er altså hønen og ægget-problematikken.

Eigen mener, at et primitivt transfer-RNAmolekyle kunne dannes tilfældigt og beskyttes mod termisk nedbrydning gennem sin spontant dannede kløverbladsstruktur med baseparringer enkelte steder langs nucleotidkæden. Selv om bindinger skulle gå i stykker, bliver stumperne hængende i kløverbladet og har lettere ved at finde sammen igen. Et sådant t-RNAmolekyle har en vis evne til ukatalyseret selvreproduktion p.g.a. simpel baseparring, omend det er et meget ufuldkomment negativ, der dannes. I cellen er t-RNA et slags håndtag, som fører de enkelte aminosyrer til ribosomerne (cellens proteinfabrikker), hvor de sætter sig på en matrix af messenger- (budbringer-)RNA, der som lange tråde syntetiseres i cellekernen og føres ud til ribosomerne. m-RNA svarer til en arbejdsseddel for fremstilling af et bestemt protein (enzym), og t-RNA kommer med aminosyrerne og sætter sig på de rigtige steder på m-RNAmolekylet på ribosomets overflade v.h.a. det sædvanlige baseparringsprincip med 3 baser svarende til en kodon for en bestemt aminosyre. Herefter strikkes aminosyrerne sammen. Der er altså en t-RNA for hver aminosyre.

Alle disse processer er enzym-assisterede, og skemaet er alt for indviklet som prototype for livsprocesserne. Men hvis det primitive t-RNA har en vis selvkopierende evne, så kunne man forestille sig en række forskellige, dårligt selvkopierende t-RNAmolekyler, hvoraf nogle ville have en vis specificitet for at binde bestemte aminosyrer. Samtidig kunne t-RNAmolekylerne virke som

m-RNA nu, således at små bitte peptider kunne syntetiseres med en meget mangelfuld nøjagtighed. Nogle af disse kunne virke som primitive enzymer, der hjalp med til at forbedre nøjagtigheden af t-RNA-molekylernes selvkopiering. Det ville være usandsynligt, om t-RNA nr. p kunne syntetisere et peptid med virkning på dens egen kopiering, men måske kunne der dannes et med virkning på en anden t-RNA-reproduktionscyklus, lad os sige nr. p+1. Ad lange omveje kunne ringen til sidst slutes tilbage til t-RNA nr. p, og vi har da fået dannet en såkaldt hypercyklus. I ursuppen er der nu en betydelig konkurrence om nucleotider, og en hypercyklus vil bedre klare denne konkurrence, især jo færre led den indeholder. Højere oppe i hierarchiet vil konkurrencen mellem forskellige hypercykler derfor favorisere de små hypercykler, indtil der opstår én eller flere cykler med kun ét medlem, d.v.s. et selvkopierende t-RNA-system, der koder for et enzym, der hjælper med til at gøre kopieringen nøjagtigere og hurtigere.

I det lange løb kan kun meget nøjagtige informationskopieringssystemer "overleve" konkurrencen, og dog er det den uhyre ringe mængde mutationer, der driver evolutionsprocessen mod stadig større perfektion. I bogen "Das Spiel: Naturgesetze steuern den Zufall" har Eigen og Winkler med udgangspunkt i forskellige underholdende spil diskuteret virkningen af forskellige vækstlove på konkurrence og evt. sameksistens f.eks. for hypercykler. Det viser sig, at med konstant væksthastighed (lineær vækst) kan forskellige hypercykler sameksistere, men dette er ikke tilfældet med en væksthastighed, der vokser lineært med koncentrationen (eksponentiel vækst) eller kvadratisk med koncentrationen (hyperbolsk vækst). De to sidste vækstmekanismer vil føre til "sejr" for hypercyklen med størst vækstkoeficient. Sejren er dog kun betinget for eksponentiel vækst, for der kan til enhver tid dukke en rival op på scenen med en endnu større vækstkoeficient. Den hyperbolske stabiliserer imidlertid den sejrende hypercyklus' position for evigt, for det er praktisk umuligt for selv en "mere kvalificeret" hypercyklus at vokse op under et "hyperbolsk tyranni", hvis da ikke den slutter sig til den dominerende hypercyklus, som en hjælpekreds.

Da den genetiske kode med tilhørende protein-maskineri i dag er ens fra *E. Coli* til menneske, kan det slutes, at den nuværende arbejdsdeling mellem lovgivende og udøvende magt i cellen (DNA hhv. enzymer) er blevet indledt af hypercykler med hyperbolsk vækst (eller endnu stærkere vækst). Effektive stumper af konkurrerende cykler kan så være blevet fejlet op undervejs.

### Dissipative strukturer

Det stærkeste i Eigens argumenter er egentlig det kvalitative skema for selvorganisation og udfaldet af modelsimulationer, mens selve det biokemiske grundlag for selvorganiseringen stadig fore-



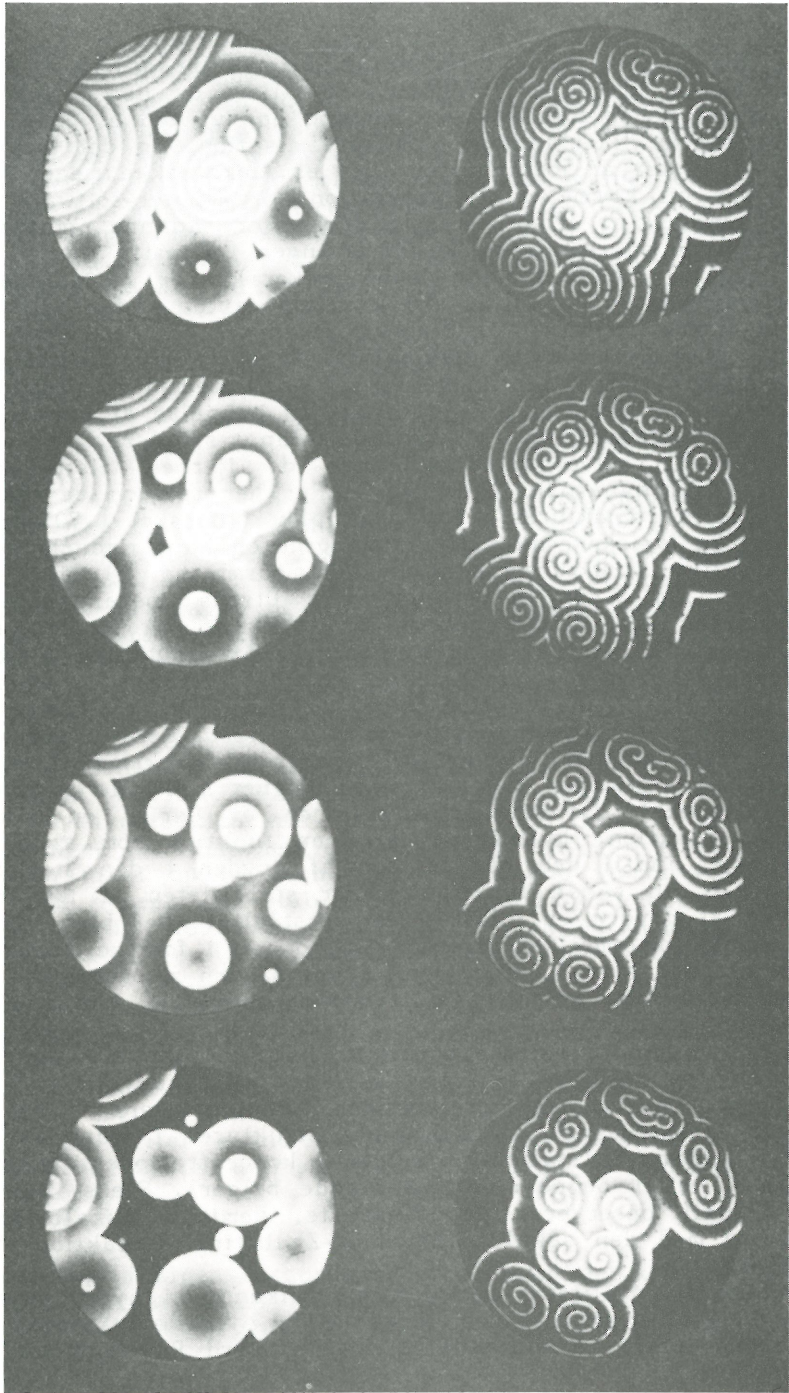
kommer noget tåget. Men vi får naturligvis heller aldrig at vide, hvordan denne proces er foregået i detaljer, da den jo ikke har efterladt sig nogen fossile spor. Derimod har vi ved at bruge vor kreative fantasi fået indsigt i selvorganisation, og det kan man bruge i tusinder af forbindelser. Der er f.eks. ikke megen tvivl om, at der vil komme en ny generation af computer-software, der har en evne til at organisere sig selv efter sådanne principper. Det vil betyde en revolution for forskningen i kunstig intelligens.

Jeg skal imidlertid forlade denne tankerække og gå tilbage til det termodynamiske grundlag. Det er klart, at en sådan selvorganisering kræver tilførsel og forbrug af fri energi, eller som det hedder i termodynamikken: dissipation. Efter at have kastet læseren hovedkuls ind i den biokemiske verden med dens ufattelige, funktionelle kompleksitet, vil det være en befrielse at kunne konstatere, at systemer, der er funktionelt langt simple, kan udvise tilsvarende selvorganisering, når de fjernes tilstrækkeligt langt fra termodynamisk ligevægt. Der er her tale om de såkaldte "dissipative strukturer", som også blev udforsket i 70'erne af den belgiske fysisk-kemiker Ilya Prigogine og hans medarbejdere.

Dissipative strukturer skal ses i modsætning til ligevægtsstrukturer (som f.eks. krystaller eller Utzons operahus). Disse sidste kræver ikke tilført energi for at kunne opretholdes. Lars Onsager viste i 1931, at hvis man prøver at opretholde tilstande med egenskaber, der er uafhængige af tiden (såkaldte stationære tilstande), så vil disse altid være stabile, hvis vi ikke er for langt fra ligevægt (hvor dissipationen er nul). Dette skyldes, at det kan vises at dissipationen (eller entropiproduktionen) er minimal i den stationære tilstand sammenlignet med alle omgivende (ikke-stationære) tilstande. Dissipationen er derfor en såkaldt Lyapounov-funktion, hvilket vil sige en funktion som altid kun kan aftage, indtil den når bunden af gryden i den stationære tilstand. At en sådan funktion sikrer stabiliteten af tilstanden i bunden af gryden er intuitivt let forståeligt. Det blev vist af den russiske matematiker/ingeniør Lyapounov i forrige århundrede. (Princippet blev i øvrigt også brugt af den matematiske ligevægtstermodynamiks grundlægger, amerikaneren J.W. Gibbs 19 år før Lyapounov.)

Onsagers princip svigter imidlertid længere væk fra ligevægt, og her er der mulighed for, at stationære tilstande bliver instabile, f.eks. ved at små forstyrrelser (fluktuationer) i specielle retninger forstærkes op til kohærente strukturer i tiden (svingninger), i rummet (stationære bølger i koncentrationer, temperaturer m.v.) eller begge dele (vandrende bølger). F.eks. kan der eksperimentelt observeres de smukkeste, kemiske spiralbølger i forbindelse med den såkaldte Belousov-Zhabotinskii-reaktion (Winfree, 1974).

Sådanne instabiliteter var faktisk velkendte i hydrodynamikken (videnskaben om væskers bevægelser), hvor de er blevet studeret siden forrige århundrede, f.eks. af Lord Rayleigh (en om-



fattende monografi herover er skrevet af Chandrasekhar, 1961). Vi skal blot nævne eksempler som en væskestråles opbrydning i dråber, krusning på vandoverflader når vinden overstiger en vis hastighed og dannelse af hexagonale strømningsceller i et tyndt væskelag, der opvarmes eller afkøles nedefra (Benard, 1900). Det sidste meget smukke fænomen, som læseren selv kan iagttage på en pande med lidt salatolie tilsat en smule aluminiumspulver for at gøre strømmingen synlig, blev af Lord Rayleigh fejlagtigt tilstrevet opdriften på den varme bundvæske. Nu vides det, at instabiliteten skyldes variationer i overfladespændingen (se flere af artiklerne i den af forfatteren udgivne monografi "Dynamics and Instability of Fluid Interfaces", Springer-Verlag, 1979).

I øvrigt var muligheden for stationære kemiske bølger ved kobling mellem kemiske reaktioner og diffusion blevet påpeget allerede i 1952 af den matematiske biolog Turing i hans berømte studier over morphogenesen (æggets udvikling til foster), specielt hvorledes det er muligt for de ensartede celler i blastula pludselig at differentiere sig fra hinanden, så indkrængningen til gastrula og dannelsen af endoderm kan finde sted.

Derfor kom det nok som en overraskelse for mange inden for feltet, at Prigogine i 1977 alene modtog Nobelprisen i kemi for begrebet "dissipative strukturer", som stort set blot er et (udmærket!) ord, for ting, der havde været velkendte i lang tid. Det havde været mere tilfredsstillende, hvis han havde fået den for sin mangesidede indsats inden for termodynamikken, som strækker sig fra hans fremragende studier over elektrolyt-teori i slutningen af 30'erne over banebrydende arbejder inden for den irreversible termodynamik i 40'erne til vigtige monografier over kemisk termodynamik, grænsefladers termodynamik, statistisk mekanisk væsketeori og mangepartikelsystemers dynamik gennem 50'erne og 60'erne. Prigogine har altid været en "termodynamikkens poet", en central figur og en inspirerende personlighed, og det burde han have haft prisen for snarere end for begrebet "dissipative strukturer", som var blevet lanceret kun få måneder før prisuddelingen.

Måske er det en generel vanskelighed ved "termodynamiske Nobelpriser". Der har kun været én tidligere, nemlig Lars Onsagers, som blev givet for hans symmetri-relationer i den irreversible termodynamik, som er ækvivalente med det ovenfor omtalte stabilitetsprincip (minimal dissipation). Disse symmetri-relationer fik en temmelig uklar begrundelse i hans 1931-artikler, og de var kendte siden forrige århundrede. Niels Bohr gav essentielt den samme begrundelse (symmetri mellem fortid og fremtid i mekaniske systemer) i sin doktorafhandling over metallernes elektron-teori fra 1911 (før studiet over brintatomet). Igen skulle man snarere have givet prisen for Onsagers elegante bidrag til teorien for elektrolytopløsninger m.v. Men det er åbenbart svært at til

dele priser til termodynamikere, der i følge sagens natur er generalister og behandler emner, der tages op igen og igen gennem halve og hele århundreder. Nå, det var et sidespring.

Med hensyn til de "dissipative strukturer" er de af flere grunde på det seneste blevet problematiske for denne artikels forfatter:

1. - de bliver omtalt som ordnede rum-tids-strukturer med lav entropi, der dannes ved gigantiske fluktuationer ud fra en tilstand med højere entropi over en vis kritisk tilstand. Men der er ikke nogen simpel sammenhæng mellem tidlige strukturer (oscillationer) og orden i entropisk forstand. Desuden er væskebevægelse ikke udtryk for orden i entropisk forstand (Bénard-strømning), og Prigogine og Glansdorff (1971) måtte da også temmelig vilkårligt tilføje et ekstra kinetisk energiled (divideret med temperaturen) til entropien i deres termodynamiske stabilitetsprincip. Dette kan dog gøres pænere ved at tale om udnyttelig energi ("exergi") som den drivende kraft i stedet for entropien. Her hører den kinetiske energi naturligt hjemme (Sørensen, 1981).

2. - det af Prigogine og Glansdorff formulerede termodynamiske stabilitetsprincip (1971) er kun en tilstrækkelig betingelse for stabilitet og ikke en nødvendig betingelse. Dette gør princippet ret uanvendeligt til praktisk brug. Det er meget kompliceret at anvende på systemer med flere variable, og det giver stabilitetsgrænser, der ikke har meget med de virkelige grænser at gøre (Sørensen, 1985).

3. - Prigogine gør meget ud af at understrege, at det biologiske livs kompleksitet udspringer af den store afstand fra ligevægt. Dette er en sandhed med modifikationer. Fidusen ved den meget udviklede metabolisme i cellen, hvor f.eks. brændstoffer som sukker og fedt med middelstor fri energi nedbrydes af enzymer i mange trin gennem en mængde mellemprodukter, og hvor samtidig f.eks. proteiner med høj energi opbygges trinvis er snarere den modsatte. Ved at fordele den kemiske drivende kraft (affinitet) over så mange trin som muligt, nedsættes affinitetsspringet over hvert enkelt trin, som derved opererer tæt ved ligevægt. Dette betyder, at cellens metabolisme stort set foregår i det selvstabiliserende Onsager-område, hvilket er en enorm fordel, da stabilitet er nøgleordet i en kompliceret organisme snarere end instabilitet. På den anden side har cellen også mulighed for at udnytte instabilitets-tærskler og lignende. Ved at anvende hastighedsregulerende modifikatorer for nogle enzymtrin (Allostere enzymer, Jacques Monods Nobelpris) kan der hurtigt skabes flaskehalse ved enkelte trin. Herved bliver affinitetsspringet samlet over flaskehalsen, og denne reaktion foregår da langt fra ligevægt med mulighed for instabiliteter. Kraft er en anden sørgelig vigtig instabilitet i cellernes maskineri.

Alt i alt foreligger der næppe endnu en virkelig konsistent termodynamisk teori for ustabile fænomener. Prigogine-gruppen er i 80'erne blevet overhalet indenom af den generelle systemteori, der i disse år oplever en utrolig kvalitativ og kvantitativ udvikling. Dette er beklageligt, fordi man som termodynamiker føler, at fremkomsten, væksten og stabilisering af nye strukturer i høj grad har noget at gøre med den til rådighed værende udnyttelige energi, som kan kanaliseres forskellige steder hen. Men vi vil lade dette aspekt ligge og se lidt på system-teoriens nylige landvindinger. Først dog lidt historie.

### Brudstykker fra systemteoriens historie

Det første forsøg på opstilling af en mere generel systemteori skete som bekendt inden for mekanikken. Efter Newtons gennembrud m.h.t. at forklare planetbevægelsen m.m. fulgte den elegante formalisering af den analytiske mekanik af Lagrange, Laplace og Hamilton. Endemålet stod for mange som den totale og entydige beskrivelse af ethvert af naturens fænomener. Især Laplace er gået ind i videnskabshistorien som den ultimative determinist med udsagnet: "Lad os et øjeblik tænke os en intelligens, som kunne sammenfatte alle naturens kræfter og den tilhørende beliggenhed af alle de legemer, der udgør naturen, - en intelligens så uhyre, at den kunne underkaste disse data en analyse - så ville denne intelligens kunne sammenfatte i en eneste formel al verdens bevægelser fra de største legemers til de letteste atomers; for denne intelligens ville intet være usikkert og fremtiden så vel som fortiden, ville være blotlagt for dens øjne". Dette væsen kaldes undertiden spøgefuldt for Laplaces dæmon. Det morsomme er, at citatet ikke stammer fra Laplaces celeste mekanik, men fra forordet til Laplaces banebrydende værk om sandsynlighedsteorien, som han netop grundlagde i erkendelsen af umuligheden af ovenstående program.

Et konkurrerende paradigme begyndte at bane sig vej fra midten af forrige århundrede med Clausius's, Joule's og Thomson's termodynamik (idet ingen rigtig tog notits af den geniale franske artilleriingeniør Sadi Carnot og hans banebrydende arbejde om ildens bevægende kraft fra 1824). De to paradigmer er i konflikt med hinanden, for i mekanikken kan tiden vendes om, uden at det virker unaturligt (symmetri mellem fortid og fremtid), mens tiden i termodynamikken har fået en naturlig retning (voksende entropi). Den store termodynamiske systembygger, amerikaneren J.W. Gibbs undgik denne problematik, og skabte i 1870'erne en imponerende systemteori for termodynamisk ligevægt. Kort før sin død (1902) udkom hans banebrydende bog om statistisk mekanik, hvor han forsøger at forlige de to synspunkter ved sin konstruktion af ensemble-begrebet, et stort antal ens systemer med forskellige mekaniske begyndelsesbetingelser. Hvert dynamisk system beskrives ved et punkt, der bevæger sig i en bane (i følge me-

kanikkens love) i et multi-dimensionelt "faserum" med 3 akser for hver partikels position og 3 akser for hver partikels bevægelsesmængde. Ensemblet er da en sky af punkter i faserummet, der kan vises at bevæge sig som en usammentrykkelig væske (Lionvilles sætning), vel at mærke en kvadrillion-dimensional væske for almindelige termodynamiske systemer. Ved at opstille forskellige ensembletyper, som fordelte sig stationært over det tilgængelige faserum, kunne Gibbs opstille metoder til beregning af middelværdier og fluktuationer for termodynamiske størrelser ved ligevægt, idet tidsmiddelværdier for et enkelt system erstattedes af ensemble-middelværdier. Denne geniale konstruktion holder stadig (den blev blot endnu mere effektiv med fremkomsten af kvantemekanikken). Gibbs' metoder er i dag det kraftigste hjælpemiddel til at beregne termodynamiske størrelser ud fra molekylære vekselvirkninger, som vi råder over.

I slutningen af det nittende århundrede rasede ellers voldsomme debatter mellem tilhængerne af de to paradigmer. Maxwell og Boltzmann begyndte at opstille ligninger for molekylers sammenstød ved en kombination af Newton'sk mekanik og Laplace'sk sandsynlighedsteori ud fra en noget anden filosofi end Gibbs' (den kinetiske gasteori). De blev kritiseret af "rene mekanikere" som f.eks. Zermelo og Henri Poincaré for at øve vold mod mekanikkens deterministiske principper ved med vold at indføre det "molekylære kaos" et bestemt sted i deres ligninger (i den såkaldte kollisionoperator). Boltzmann opstillede et udtryk for entropien ud fra sandsynlighedsfordelingerne og viste, at entropien aldrig kunne aftage, men mekanikerne kunne ikke anerkende dette. Zermelo hævdede under henvisning til et generelt teorem uledt af Poincaré (om at et isoleret mekanisk system igen og igen vil komme vilkårlig tæt forbi et hvilket som helst punkt i faserummet), at Boltzmanns entropi før eller siden ville vende tilbage til sin oprindelige værdi, og derfor ikke ensidigt kunne vokse.

Boltzmanns svar gik ud på, at denne "tilbagevendingsperiode" i systemer med en kvadrillion molekyler er ufattelig lang og uden praktisk betydning. Joseph Loschmidt påpegede, at hvis alle molekylers hastigheder blev vendt  $180^\circ$  (af en "Loschmidts dæmon"), så kunne vi have en proces, hvor luftmolekylerne i den ene halvdel af en beholder af sig selv samlede sig i den anden halvdel og efterlod et vacuum i den første halvdel. Dette ville ikke stride mod mekanikken. Boltzmann medgav dette, men sagde at vendingen af hastighederne skulle være så uhyggeligt præcis, at en sådan begyndelsestilstand ville være helt usandsynlig sammenlignet med alle andre tilstande, der ville føre til voksende entropi. Kun tæt ved ligevægt kan der være signifikante fluktuationer i retning af mindre entropi.

Al erfaring og sund fornuft understøtter Boltzmann, men hans argumenter er ikke logisk fejlfri, da han hele tiden imødegår kritik over at indføre sandsynlighed i en deterministisk teori

med sandsynlighedsargumenter. Med kvantemekanikken og Heisenbergs usikkerhedsrelationer ved vi nu, at man ikke kan bestemme alle partiklers positioner og bevægelsesmængder samtidig med en vilkårlig stor nøjagtighed, da produktet af usikkerhederne på de to størrelser er større end Flacksa konstant (divideret med 2). Indførelsen af et mindste fasevolumen i Gibbs' ensemble-teori giver mulighed for absolut bestemmelse af entropien for tilstrækkelig simple systemer. Sådanne beregnede entropier er fuldstændig i overensstemmelse med eksperimentelt målte entropier. Jeg er derfor af den mening, at kvantemekanikkens usikkerhedsrelationer er den egentlige årsag til den voksende usikkerhed m.h.t. systemets mikrotilstand, som loven om entropiens vækst er udtryk for. Det samme er tidligere blevet antydnet af de to russiske fysikere Landau og Lifschitz. Jeg er derfor ikke rigtig i stand til at forstå f.eks. Prigogines utrættelige bestræbelser på at forstå den mikroskopiske årsag til den voksende entropi. Denne verden er simpelthen irreversibel både p.g.a. omtalte usikkerhedsrelationer og fordi, det er praktisk umuligt at isolere et system fuldstændigt fra resten af universet. Som Borel engang har udtrykt det, så vil selv en flytning af 1 g stof på 1 cm på Sirius influere på den nøjagtige dynamik af en kvadrillion partikler i en jordisk sodavand.

For at vende tilbage til den matematiske systemteori, så viste Poincaré i 1880'erne, at ulineære dynamiske systemer med to variable kunne opvise et hidtil ukendt træk: grænsecykler. En grænsecyklus er en bane i faseplanet (faserummet) med en ganske bestemt omløbstid, som "suger" alle banekurverne fra den nærmeste omegn til sig. Poincaré var også i stand til at udlede et meget kraftigt teorem vedrørende grænsecyklers eksistens: hvis man optegner en simpel, lukket kurve i faseplanet, og hvis man finder, at den todimensionale "fasevæske" strømmer ind i det lukkede område langs hele omkredsen, så findes der en grænsecyklus i det lukkede område, forudsat der ikke er noget tiltrækkende stationært punkt i området. Kort sagt, der må være en attraktor i området, og hvis der ikke er en punkt-attraktor, så må der være en cyklisk attraktor. Der kan også være grænsecykler i tre eller flere dimensioner, men eksistensen af en analog, lukket "Poincaré-flade" er kun en nødvendig og ikke en tilstrækkelig betingelse for eksistensen af en grænsecyklus. Andre muligheder er her en torus-attraktor (redningsbælte) med kvasiperiodiske svingninger og en "mærkelig attraktor", som har forbindelse med kaotisk adfærd (se næste afsnit).

Poincaré nåede også før århundredeskiftet at grundlægge den fundamentale bifurkationsteori. Denne beskæftiger sig med stabiliteten af forskellige løsningsgrene til ulineære algebraiske ligninger eller differentiaalligninger, når man ændrer på de forskellige parametre i systemet. I modeller skelner man mellem variable og parametre. De variable afsættes ud af akserne i et "faserum". Med givne begyndelsesbetingelser aftegnes banekurver,

der nærmer sig til forskellige typer af attraktorer i faserummet, hvis ikke der er tale om algebraiske ligninger, hvor løsningerne er på attraktorerne "med det samme". Alt dette er for konstante parametre i systemet. Varieres dernæst på parametrene (massen af et legeme, en varmfylde etc.), så kan de ovenfor fundne stabile løsningsgrene optegnes i et parameterrum sammen med evt. ustabile løsningsgrene. Man ser da ofte "tvedelingspunkter" (bifurkationer), hvor en stabil løsningstype bliver ustabil og en anden løsningstype bliver stabil. Heraf navnet bifurkationsteori.

Bifurkationsteori er i dag en livskraftig (men temmelig svær) matematisk disciplin, men man har ikke overblik over alle typer af bifurkationer, som kan forekomme, bortset fra René Thoms katastrofeteori (1972), som er en underafdeling af bifurkationsteorien med stærkt begrænsede forudsætninger.

Endelig må vi nævne kybernetikken, som med Norbert Wiener og W. Ross Ashby som bannerførere spillede en stor rolle i 1950'erne og 1960'erne. Herfra kom glosen "feed back" og interessen for generel systemteori i forbindelse med automatisk kontrol i maskiner og i fysiologiske organismer blev genoplivet. Disciplinen er stort set død nu, idet den blev splittet op i nyttige special-discipliner, f.eks. kontrolteorien som var forudsætningen for månerejserne og missilkapløbet og for den automatiske styring af kemiske fabrikker m.m. Man kan måske sige at den såkaldte "Systems Dynamics"-skole, som er ret populær hos den altædende management-branche, er en slags (udvandet) fortsættelse af kybernetikken. Der er meget gammel vin på nye flasker, når det gælder systemteori.

### Kaos og fraktaler

I 1963 fremkom der i Journal of Atmospheric Sciences en artikel af Edward N. Lorenz, som blev startskuddet for en helt ny vending indenfor systemteorien. Lorenz beskæftigede sig med en (lidt tvivlsom) model for atmosfærisk cirkulation drevet af opvarmningen ved jordoverfladen. Den drivende temperaturforskel udtrykkes i det såkaldte Rayleigh-tal  $Ra$  (en parameter i modellen). Rayleigh viste, at når  $Ra$  passerede en kritisk værdi  $Ra(1)$ , så kunne luften ikke længere holde sig i ro. Den varme, lette luft nede ved jordoverfladen må nu bytte plads med den kolde, tunge luft foroven. Dette sker ikke ved lavere værdier af  $Ra$ , fordi der er en vis indre gnidning i luften, der skal overvindes.

Ved  $Ra(1)$  sker der en bifurkation, idet den "stillestående" løsningsgren mister sin stabilitet. I stedet bliver to grene svarende til såkaldte "rulleceller" stabile (cirkulerende luft med uret og mod uret). Dette mønster bevares indtil vi når en højere kritisk værdi  $Ra(2)$ . Luftens cirkulationshastighed bliver bare hurtigere og hurtigere. Hvilken cirkulationsretning, der vælges, beror på tilfældigheder. Ved  $Ra(2)$  har vi et nyt bifurkationspunkt, hvor rullecelle-grenene mister deres stabilitet. I stedet



begynder nye typer løsninger med vuggende, eller "mavedansen-de" rulleceller. I faserummet ser man, at fasepunktet fjerner sig fra rullecellegrenen i en spiral. Når det kommer langt nok væk, kommer det under indflydelse fra den anden rullecelle-gren, som jo også er blevet ustabil. Den bliver derfor frastødt af denne. På den anden side kan man finde en Poincaré-flade, som omslutter et område i faserummet, som suger alle banekurver til sig. Der er altså en "mærkelig attraktor" derinde (dette navn er kommet til senere, efter Lorenz' ligesom betegnelsen kaos). Ved computersimulationer kan man få en fornemmelse af attraktorens form. Den ligner en slags propel, og fasepunktet kører rundt i udadsøgende spiraler på hvert propelblad. På uforudsigelige tidspunkter springer fasepunktet fra det ene propelblad til det andet. Det uhyggelige er, at denne uforudsigelighed er absolut. Kører man to computersimulationer med variable begyndelsesbetingelser uendeligt tæt ved hinanden, så adskiller banekurverne sig efter en vis tid fuldstændig fra hinanden. Lorenz drog heraf den konklusion, at langtidsprognoser for vejret var principielt umulige. Den virkelige atmosfæres differentialligninger er jo blot endnu mere komplekse og mangfoldige end den simplificerede Lorenz-models sølle tre, ulineære ligninger. Så mulighederne for kaotisk og kompleks adfærd kan kun stige (konklusion i disse sparetider: fyr langtidsmeteorologerne!). Vi har i Lorenz-modellen et eksempel på makro-kaos af en helt anden natur end det tidligere omtalte molekyllære kaos. Det har senere vist sig, at der er temmelig meget struktur i dette kaos alligevel.

Lorenz-attraktorens geometriske egenskaber er af en temmelig ejendommelig karakter. Den er uendeligt meget rynket. For at forstå, hvad der menes hermed, må vi betragte en lille stump fasevæske, der lægger an til landing på den mærkelige attraktor. I modsætning til fasevæsken i Gibbs' faserum, der altid strømmer som en usammentrykkelig væske, så skrumper fasevæsken (næsten) altid i dissipative systemer. Den behøver imidlertid ikke at skrumpes i alle retninger, f.eks. udvider fasevæsken sig på tværs af fasepunktets bevægelse og parallelt med den mærkelige attraktors gennemsnitlige overflade, mens den skrumper (så meget desto mere) i de to andre retninger. Skrumpningen eller udvidelsen karakteriseres kvantitativt gennem negative eller positive Lyapounov-eksponenter. I den retning, hvori udvidelsen sker, er der visse pladsproblemer, for fasevæsken skal jo holde sig inden for Poincaré-fladen. Den er derfor nødt til at krølle sig mere og mere sammen. Da attraktoroverfladen i princippet først nås efter uendelig lang tid, så når attraktor-overfladen at blive uendeligt krøllet på tværs af bevægelsesretningen. Det er nu let intuitivt at forstå den uendelige følsomhed på begyndelsesbetingelserne, som Lorenz fandt. Selvom to punkter ligger uhyre tæt på attraktoren, så ligger de jo alligevel uendeligt langt fra hinanden, for der er uendelig mange krøller på lagenet imellem dem!

Uendeligt krøllede flader har en dimension mellem 2 og 3. Lorenz-atraktoren har en dimension tæt ved to, men lidt større. Det er altså nærmest en flade, men den fylder "lidt" af rummet ud. Dimensionen kan beregnes af de ovenfor omtalte Lyapounov-eksponenter. Der findes også endeligt krøllede kurver med dimension mellem 1 og 2. Et eksempel er den kurve, som en lille partikel opslemmet i vand beskriver under de såkaldte Brownske bevægelser (som skyldes uregelmæssigt bombardement fra vandmolekylernes termiske bevægelse - se min artikel herom i Naturens Verden, marts 1979). Sådanne geometriske fænomener kaldes nu fraktaler, et navn der blev foreslået i slutningen af 1970'erne af IBM-videnskabsmanden Benoît Mandelbrot, der i særlig grad har studeret deres egenskaber. Først opfundet og navngivet viser de sig at være meget nyttige også i praktisk brug. Lad os tage et eksempel: hvor lang er Danmarks kystlinje? Et elementært spørgsmål, som man ofte finder svar på i leksika o.lign. Men dette svar har ikke megen mening, hvis kystlinjen måles i almindelige længdemål som km. eller m. Man vil finde, at længdeangivelsen simpelthen afhænger af målestokken af de kort man benytter til at måle. Jo mere detaljeret målestok, der benyttes, jo finere kan man gøre opmålingen af kysten, men på hvert kort ser strukturen stort set ens ud: der er nyopdukkede bugter, halvøer og odder på hvert eneste kort og svaret på spørgsmålet om kystlinjens længde bliver nærmest, at den er uendelig lang. Men et sådant mål kan man ikke bruge til noget, for så er kysten af Fyn, Jylland og Sjælland hver for sig også uendelig lange, eller kysten af Sydsjælland lige så lang som kysten af hele Sjælland, nemlig uendelig.

Det viser sig imidlertid, at man kan opnå et fornuftigt mål ved at måle i kilometer i en eller anden potens mellem 1 og 2, f.eks. km. i 1,34, altså en mellemting mellem km. og kvadratkilometer. Potensen afhænger af den valgte kystlinje. Nogle kystlinjer er mere krøllede end andre. Med et sådant mål har det mening at tale om Danmarks kystlinjes længde, og længden kan opdeles i en række additive stumper. Dette eksempel skulle tjene til at gøre læseren mere fortrolig med den slags ruhed, man finder på en mærkelig attraktors overflade. Det er en ruhed, der ser ens ud, ligegyldigt hvor stor forstørrelse man betragter den under. Man siger, at ruheden er selv-similær, om ikke nøjagtigt så statistisk selv-similær.

### Feigenbaums vej til kaos

Den måde, hvorpå kaos bryder ud på i Lorenz-systemet, er ret speciel. I 1980 skete der et nyt gennembrud, idet Mitchell Feigenbaum fra Los Alamos fandt en vej til kaos, som følges af mange forskellige systemer, nemlig den såkaldte periode-fordobling. Det utrolige er, at denne komplekse adfærd udvises af så simple ligninger som følgende ulineære differens-ligning:

$$x(n+1) = ax(n)[1 \div x(n)] \quad (1)$$

Meningen med en sådan ligning er følgende: vælg en værdi for  $a$ , f.eks.  $a = 1,2$  og en værdi for  $x(1)$ , f.eks.  $x(1) = 0,5$ . Indsæt dette på højre side og beregn  $x(2) = 0,3$ . Indsæt dette på højre side og beregn  $x(3) = 0,252$  o.s.v. Efter fyrré successive beregninger (også kaldet iterationer) fremkommer  $x(40) = 0,1667$ , og dette tal ændrer sig ikke videre derefter. For  $a = 1,2$  (fikse-ret parameter) har vi altså et stabilt attraktor-punkt ved  $0,1667$ . Bifurkations-diagrammet fås ved at variere parametren  $a$  og gentage beregningerne for alle  $x$ -værdier mellem 0 og 1. Så længe  $a$  er mindre end 1, er der kun én stabil attraktor, nemlig  $x(\text{uendelig}) = 0$ . Ved  $a = 1$  kommer der et bifurkationspunkt, hvor nulattraktoren mister sin stabilitet, mens en anden attraktorgren vokser op, hvorpå den ovenfor nævnte værdi  $0,1667$  ligger. Denne gren når igen til et bifurkationspunkt ved  $a = 3$ . Attraktorværdien findes her til  $2/3$ . For  $a$ -værdier over 3 ligger de stabile løsninger på to forskellige grene, hvor den ene løsning følger den anden i en uendelig følge. For eksempel for  $a = 3,1$  finder vi de to successive attraktor-værdier til hhv.  $0,55801$  og  $0,76457$ . Hvor der før kun skulle én iteration til for at få den samme værdi hver gang, så skal der nu to iterationer til, idet vi kun havner i f.eks. værdien  $0,55801$  hver anden gang. Man siger, at der er sket en periode-fordobling. Når  $a$  stiger, sker der en række successive periodefordoblinger i intervallet fra  $a = 3$  til  $a = 4$ . (For  $a$  større end 4 sendes  $x$  ud af intervallet fra 0 til 1, så disse værdier har ingen interesse). Vi kalder de forskellige værdier af bifurkationsparametren  $a$  for  $a(1) = 3$  (periode-fordobling),  $a(2)$  (periode-firdobling),  $a(3)$  (periode-ottedobling) o.s.v. Disse bifurkationspunkter ligger tættere og tættere og nærmer sig en værdi  $a(\text{kaos})$ , der svarer til uendelig-dobling af perioden. Dette punkt ligger omtrent midtvejs mellem  $a = 3$  og  $a = 4$ . Her gentages en  $x$ -værdi aldrig, men alligevel ser man tydeligt, at alle  $x$ -værdier suges ind i et skarpt afgrænset underinterval af 0 til 1, som er det kaotiske attraktor-område.

Feigenbaum fandt også, at hvis man dannede brøken

$$\{a(n) \div a(n+1)\} / \{a(n+1) \div a(n)\}$$

af successive bifurkationsværdier for stigende værdier af  $n$ , så nærmer denne brøk sig hurtigt til tallet  $4,66920\dots$ , som nu kaldes Feigenbaums tal. Betydningen af dette tal ligger i, at det er uafhængigt af modellen, det er f.eks. ret ligegyldigt hvad der står på højre side af ligning (1), blot der er bifurkationer og en bifurkationsparameter. Tallet er altså universelt, ligesom tallet  $\hat{\pi}$  (der også må udtrykkes i en uendelig decimalbrøk).

Denne Feigenbaum-kaskade af successive periode-fordoblinger følges også af mange svingende systemer, der beskrives ved komplicerede differentiaalligninger. Dette skyldes, at man kan konver-

tere løsningen af differentiaalligninger til løsningen af differensligninger ved et snedigt trick, som blev anvist af Poincaré. Man kan lave et snit gennem faserummet af én dimension mindre end faserummets dimension. Vi optegner nu skæringspunktet mellem en banekurve og Poincaré-snittet, når banekurven har en bestemt retning i forhold til snittet (f.eks. nedefra og op). Efter en tid kommer fasepunktet tilbage med samme retning gennem Poincaré-snittet, så der optegnes et andet punkt. Vi har derfor fået ét punkt sendt over i et andet ligesom ved ovennævnte simple differensligning, ligning (1). Det faktum, at højresiden i ligning (1) nu svarer til løsningen af en kompliceret differential-ligning på en datamat gør ingen principiel forskel. For et faserum i 3 dimensioner, er Poincaré-snittet en todimensional flade. En simpel svingning svarer til, at et Poincaré-punkt sendes hen i det samme punkt. Ved periode-fordobling kommer der to punkter, derefter fire o.s.v., indtil konturen af en torus tydeligt aftegner sig i Poincaré-snittet. Til sidst har vi kaos.

Feigenbaums kaskade er blevet eksperimentelt observeret for vidt forskellige systemer spændende fra temperaturdreven strømning af væsker eller luftarter i en kasse til oscillerende kemiske reaktioner. Man finder altså periode-fordoblinger indtil kaos, og man finder Feigenbaums tal i de eksperimentelle data. I det første eksempel svarer kaos til det, man tidligere ville kalde turbulent væskestrømning. I det andet kunne man tale om "kemisk turbulens".

### Hvad kan der nu siges om samfundets processer?

I bedste post-modernistiske stil har jeg nu overdænget min læser med løsrevne brokker fra naturvidenskabernes slagmark, og humanister kan med rette spørge om, hvad i alverden dette har med mennesket, samfundet og dets historie at gøre. Jeg skal i det følgende forsøge at antyde nogle forbindelser.

#### I

For det første er det hævet over enhver tvivl, at samfundet rent materielt består af mennesker, husdyr, maskiner og strukturer, der alle følger termodynamikkens love for mangepartikel-systemer. Den anden hovedsætning kan ikke ophæves af Folketinget! Man kan f.eks. ikke sætte samfundets hjul i gang udelukkende ved fiktive manipulationer i penge- og kreditsystemet, som man synes at tro i øjeblikket. Der skal energi og ressourcer til, og de bliver mindre og mindre tilgængelige!

#### II

For det andet så vi i afsnittet om livets udvikling en næsten perfekt analogi mellem udviklingen fra en individuel opfindelse over et mindre til et større firma og udviklingen af informations-

reproduktions-systemet i den levende celle. Analogien var ment som mere end en spøg. Selvorganiserende processer har særdeles mange fællestræk. I øvrigt når Eigen og Winkler kun at kradse i den omfattende spilteoris overflade i bogen "Das Spiel". Til trods for bogens titel synes de ikke særlig kompetente i egentlig spilteori, en matematisk disciplin af stor betydning for økonomi og sociologi.) Spilteorien grundlagdes i det klassiske værk "Theory of Games and Economic Behaviour" af von Neumann og Morgenstein (1946). Den er dog stærkest for såkaldte nulsums-spil (den enes gevinst = andres tab), men kan dog udvides. Mange spil i virkelighedens verden er ikke nulsums-spil, selvom aktørerne tit lider af den illusion, f.eks. DA og LO ved overenskomstforhandlingerne. Maynard-Smith og andre har udformet en spilteori til beskrivelse af Darwinistisk udvikling, idet arterne repræsenteres ved forskellige typer med faste reaktionsmønstre på aggression og underkastelse. Det gælder da om at finde "evolutionært stabile strategier" (ESS). I Henry Hamburgers bog "Games af Models of Social Phenomena" (1979) gives mange underholdende eksempler på anvendelse af spilteori i politiske konflikt-situationer (også ikke-nulsumsspil), f.eks. er et beslutningstræ med "pay-off"-værdier opstillet for Cromwells dilemmaer i forbindelse med henrettelsen af Charles I! Danske historikere kunne sikkert få noget ud af at opstille beslutningstræer vedrørende Jarlen af Bothwells indespærring på Dragsholm etc.

### III

For det tredje kan begrebet "dissipative strukturer" muligvis have nogen relevans for samfundsprocesser. Sikkert er det, at var hele samfundet tæt ved termodynamisk ligevægt, så kunne der ikke finde nogen instabilitet sted i de med energi og stofstrømme vekselvirkende materielle processer i samfundet. Selvom jordkloden rent termodynamisk ikke er tæt ved ligevægt, så kan man godt have sub-systemer, der opererer med stor stabilitet tæt ved ligevægt. Dette er tilfældet med den levende celle i de fleste situationer, men det moderne samfund er meget langt fra termodynamisk ligevægt. Den levende celle ville aldrig have en centraliseret produktion af f.eks. det meget reaktive stof chlor, som den der foregår på Islands Brygge i København. Cellen ville i stedet decentralisere og opdele processen i små bidder ved at synthetisere via en lang række mellemprodukter. Med den nye bioteknologi (gensplejsning, membranbundne enzymer etc.) synes en egentlig efterligning af cellens produktionsmåde i samfundets stofskifte at være rykket nærmere indenfor rækkevidde. Dette kan man kun glæde sig over.

Spørgsmålet rejser sig naturligt, om man på alle niveauer skal søge en perfektionering af samfundet efter den levende celledes forbillede. Man må indrømme naturen, at den har frembragt et mesterværk af stabilitet og effektivitet i denne livets mindste byggekloids samt i den overordnede fysiologiske organisering af

disse byggeklodser i kirtler og organer. Man behøver imidlertid ikke tænke længe over sagen for at kunne konstatere, at et sådant samfund er temmelig frastødende for et vestligt orienteret, individualistisk-demokratisk menneske. Det ville være et uhyre komplekst samfund med en uhyre kompleks administration og en benhård og effektiv kontrol.) Konturerne af et sådant embedsmands- og teknokratstyret samfund er jo allerede ved at tone frem. Det er muligt, at et verdensomspændende samfund af denne type ville være løsningen på vore økologiske og energimæssige problemer, men det ville betyde afslutningen for de vestlige demokratier. I den forbindelse skal man dog ikke lade sig vildlede af diverse, tilsyneladende velmenende utopisk tænkende filosoffer, politikere og teknokrater (Oprør fra Midten f.eks.). Karl Popper ("The Poverty of Historicism") har klart nok demonstreret den uhellige alliance mellem utopister og folk, der tror på uundgæelige historiske lovmæssigheder (historicister), en alliance som ofte stiftes for at gennemtvinge autoritære styreformere. Utopister eller ej, målet er den rene magt.

Endnu er samfundene med tilhørende økosystemer dog langt fra så effektive. De er fyldte med problemer og konflikter men med mulighed for individuel udfoldelse. Instabiliteter af alle typer florerer i skøn overensstemmelse med principperne bag de dissipative strukturer. Alene et fænomen som den eksplosionsagtige vækst af Mexico City til verdens største by i løbet af et årti viser, at intet her er under kontrol. P.M. Allen og andre fra Prigogines gruppe har foretaget interessante computersimuleringer af byvækst og har vist, at dannelse af byer med flere vekselvirkende centre ("tvillingbyer") fremkommer som et naturligt resultat af de dynamiske modeller. Dette iagttages i dag mange steder, f.eks. Minneapolis/Saint Paul-komplekset. Prigogine-gruppen har også foretaget modelstudier over fremkomsten af arbejdsdeling hos insekter etc. Der synes dog at være et logisk uafklaret problem her. Prigogine-gruppen selv indregner sådanne fænomener som bydannelse og fremkomst af arbejdsdeling som eksempler på dissipative strukturer. Jeg vil ikke anfægte, at der tale om strukturering samt om dissipation, men spørgsmålet er, om der er nogen logisk forbindelse mellem disse ting. Er det ikke snarere den ikke-lineære natur af de beskrivende differential-ligninger, der fremkalder sådanne instabiliteter?

Med hensyn til de menneskelige samfund er det jo i øvrigt nok så meget spørgsmålet om indkomsternes og formuernes fordeling, der optager sindene og skiller de politiske partier. Jeg vil her tillade mig at pege på en temmelig overset lovmæssighed, som efter min mening er den fundamentale, strukturerende instabilitet i det økonomiske liv. Det er den italienske økonom Vilfredo Paretos lov. Pareto opdagede, at de højere indkomster i alle lande fulgte en bestemt fordeling, uanset hvilket politisk system, landenes respektive regeringer måtte bekende sig til. Det er let at påvise forbindelsen mellem Paretos fordeling og fordelingen af

biomasse på de forskellige specier i et hvilket som helst mosehul. Fra økologien vides det, at denne fordeling meget ofte er en såkaldt geometrisk fordeling. Denne fremkommer efter princippet "børnefødselsdag uden voksent opsyn". Det stærkeste barn tager en (temmelig stor!) brøkdel  $y$  af lagkagen. Det næststærkeste tager  $y$  tager brøkdelen  $y$  af den resterende brøkdel  $1-y$ , dvs.  $y(1-y)$  osv. Således fremkommer den geometriske fordeling. I samfundet indtager de voksne børnenes plads, og der er ingen super-voksne til at holde opsyn (!), men samfundskagen er uhyre stor, så selv den mest grådige kan kun overkomme en meget lille brøkdel. Ved at lade  $y$  gå mod nul i den geometriske fordeling fremkommer Paretos fordeling. Jeg kan huske, at jeg engang i midten af 70'erne fandt Paretos lov i en fodnote i Paul Samuelsons økonomibog. Jeg undrede mig over, at en så central lovmæssighed fik denne beskedne plads i standardlærebogen i økonomi. Stor var min forbavselse, da jeg for nylig fandt en pudsigt bog "En kapitalists bekendelser" af E.J.P. Benn fra 1927 i en bogkasse. Forfatteren har her et kapitel med titlen "Paretos lov: ulighedens uundgåelighed", hvor han hævder, at Paretos lov (fra slutningen af forrige århundrede) undertrykkes i nationaløkonomisk litteratur, som ved en stiltiende sammensværgelse!

Jeg mener, at Paretos princip er fundamentalt og uomgængeligt. Det vil altid være tilfældet, at de personer der har mest tid og ressourcer, også kan anvende disse goder til erhvervelse af mere af disse. Det er også forståeligt at samfundene, hvis top altid består af lag på lag af "pampere" (undertiden trods alt med visse nyttige funktioner) med stigende snedighed opefter prøver at undertrykke udbredelsen af kendskabet til Paretos simple princip, for den mere officielle analyse af ethvert samfund forestår jo af de samme personer. Problemet er imidlertid, at hvis man vil undertrykke Paretos skævhedsprincip og skabe lighed, så er man (næsten) oppe imod en naturkraft, og lighed kan kun skabes kunstigt gennem vold og undertrykkelse, som under den kinesiske kultur-revolution. Herved skabes imidlertid nye lag af pampere (rødgardister, fire-banden), så man er ikke blot lige vidt, men situationen er yderligere forværret!

#### IV

For det fjerde: teoretiske resultater fra systemteorien har umiddelbar interesse for samfundenes udvikling, specielt de mere kvalitative begreber om grænsecykler, bifurkationer og kaos. Dette skyldes, at mange vigtige fænomener i samfundene kan beskrives som sammenhørende differential-, integral- eller differensligninger. Jeg er naturligvis bekendt med Karl Poppers kraftige advarsler mod "scientismen", den bevidstløse søgen efter paralleller mellem "samfundets bevægelseslove" og f.eks. bevægelseslovene i Newtons mekanik med de muligheder for forudsigelser, der måtte ligge heri. Jeg tror heller ikke meget på sociologiske forudsigelser, hvad enten de udføres på computer eller ej. Sporene skræm-

mer fra 70'ernes Danmark med de tåbelige perspektivplaner, der var forældet fra de fremkom og med de pseudo-videnskabelige computerslagsmål om Danmarks fremtidige energiforsyning med eller uden atomkraft. Jeg tror (efterhånden) kun på Poppers "piecemeal engineering" (i betydningen: selvkritisk lappeskræderi) som en anvendelig vej frem. Men hvis man ikke kaster sig ud i politisk misbrug, så mener jeg alligevel at systemteorien har meget at sige om kvalitative foreteelser i politik og sociologi, især set med bagklogskabens øjne. Man skal kun spå om fortiden! Sagen er, at selv den Newtonske mekanik er under opbrud i lyset af den seneste kaos-revolution. Selv bevægelsen i det Gibbs'ke faserum (uden Heisenbergs usikkerhedsrelationer!) er ikke længe-re så deterministisk, som man tidligere troede. Der findes mærkelige "svage stabiliteter" og en speciel form for kaos med sit eget Feigenbaum-tal (8,72109...). Vi må simpelthen lære at leve med erkendelsen af, at hverken i naturvidenskaberne eller i samfundsvidenskaberne er præcise forudsigelser mulige undtagen i relativt få, simple tilfælde. Det matematiske kaos-begreb forhindrer langtidsprognoser i de fleste komplekse systemer, og i det moderne samfund betyder de ustandselige teknologiske og politisk-ideologiske innovationer en yderligere principiel uforudsigelighed (som Popper også har understreget det). Der kommer simpelthen nye akser til i det "sociologiske faserum". Hvem ville i 60'erne have kalkuleret med lyslederkabler eller Ayatollah Khomeinis religiøse fundamentalisme i den fremtidige udvikling af verden?

**Kolklusion: ingen, alt fortsætter...**

For de, der søger en konklusion i alt dette, er der intet håb. Der er ingen. I hvert fald ikke én, der kan skrives på få linjer. Vi må se at blive voksne og turde træde ind i den virkelige verdens utrolige kompleksitet, med alle sanser åbne og vor nysgerrighed i behold. Ubelastede af tvangstanker fra vor årtusindlange materielle og idéhistoriske udvikling. Det er sikkert umuligt, men kampen mod det umulige adler et menneske. Vi kan lære at træde varsomt frem med vores generaliseringer, når det gælder komplekse fænomener. Vi kan lære at gode, men naive intentioner kan slå over i deres absolutte modsætning. Vi kan måske lære ikke at blive så frygteligt skuffede, når vores små lom-mefilosofiske betragtninger bliver gjort til skamme af en ubarmhertigt fremtrodende virkelighed. Ud over dette er der ingen konklusion. Alt fortsætter med rivende hast mod et ukendt fremtidssamfund.

Torben Smith Sørensen er deltager i Danmarks Tekniske Højskoles indsatsområde MIDIT = Modellering, Ikke-lineære systemers Dynamik og Irreversibel Termodynamik.