

Biologi og fysik: Konvergens mod én videnskab?

Claus Emmeche, Center for Naturfilosofi og Videnskabsstudier, Niels Bohr Institutet

Skal vi kort karakterisere forholdet mellem biologi og fysik som videnskaber, kan vi starte med det alle ved: Fysikken var i en lang periode – lad os sige fra antikken til år 1950 – den mest avancerede af de to, den videnskab som med størst held og dygtighed havde opnået en serie grundlæggende forståelser af stoffets natur, mens biologien haltede bagefter, var vanskeligere at matematisere, og kæmpede med at undersøge fænomener, som ikke var lige så åbenbart tilgængelige for den reduktionistiske metode – at skille ting ad og analysere et system i sine enketdele, finde de almene bevægelseslove for systemet, for derudfra at beregne eller udlede generelle egenskaber ved systemets samlede dynamik. Det var som om, at når biologer skulle forklare organismers struktur og funktion, henviste de til årsager, der for mange i betænkelig grad mindede om rent menneskelige formål – et organ har den form 'for at' opfylde denne funktion (som om nogen havde haft et mål om at designe en organisme således) – altså henviste til årsager, som ansås for at være fremmede og irrelevante for studiet af fysiske systemer, der jo ifølge det mekaniske verdensbillede styredes af rent 'effektive' årsager, en mekanisk kausalitet.

Denne modsætning mellem videnskaben om de naturkræfter, der lader sig beskrive mekanisk og matematisk, og de dele af naturen, som er kompleks, organiseret, og i al fald ser ud 'som om' den er designet, findes stadig, selvom den tager sig anderledes ud i dag, hvor biologi og fysik mødes i tværfaglige områder, fx biofysik og studiet af ikke-lineære komplekse systemer på mange organisationsniveauer. En forståelse af kausalitet, eller årsagsbegreber, er her et centralt aspekt, når man skal udrede det filosofiske forhold mellem fysik og biologi.

Forskellige forklaringstyper

Det er grundlæggende i både videnskab og i den almindelige forståelsen af vores verden, at ting og processer vi erfarer, ikke er helt tilfældige, men ordnede på bestemte måder, som tillader rationel forståelse gennem forskellige typer forklaring. Her er et historisk tilbageblik relevant. I overgangen fra et mytologisk til et rationelt verdensbillede blev begrebet skyld (græsk *aitia*) – som i 'han er skyldig i mordet' – brugt metaforisk til at beskrive ikke-personlige naturprocesser hvor et fænomen nødvendigvis følger et andet. Da den moderne videnskabs formål er at afdække den dybdestruktur i verden, som skjuler sig bag vor umiddelbare erfaring, vil dens forklaringer henvise til forskellige determinanter (eller årsager) til processernes mønster.

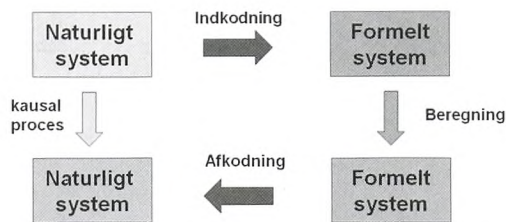
Tre klassiske opfattelser af videnskabelig undersøgelse har dybt påvirket de fremherskende ideer om kausale forklaringsformer. De er knyttet til traditionerne efter hhv. Platon, Aristoteles og Arkimedes. I sin historie har fysikken især været knyttet til den arkimediske tradition, mens biologien har haft tætte forbindelser til den aristoteliske.

Ifølge den platoniske tradition kunne bestemte egenskaber af naturen afledes apriori (forud for erfaringen) af givne matematiske strukturer. Som de pythagoræiske filosoffer opdagede, kunne en bestemt matematisk struktur (fx forhold mellem små heltal) være nøglen til en del af naturen (dens lyde, studeret i akustik), så hvorfor ikke se, om den samme struktur også kunne beskrive andre områder (som himmellegemerne, studeret i astronomi). Selvom dette forsøg fejlede, og Kepler eksempelvis måtte give op mht. sin platoniske opfattelse af 'sfærenes harmoni', er det stadig en helt vital generel idé i mange områder af fysik, inklusiv kosmologi og højenergifysik, at bruge matematikkens formelle eller logiske nødvendighed som et kraftfuldt redskab til at beskrive naturlig kausalitet. Brugen af analoge matematiske strukturer til at beskrive fænomenerne er blevet standard. Metodens succes forudsætter, at den kausale nødvendighed (eller kausale determinations) i det fænomen, man vil studere, udtømmende kan beskrives via deduktiv nødvendighed, som kendetegner den logik eller matematik man benytter – en overensstemmelse, som bl.a. den teoretiske biofysiker Robert Rosen har sat spørgsmålstejn ved (figur 1A og 1B).

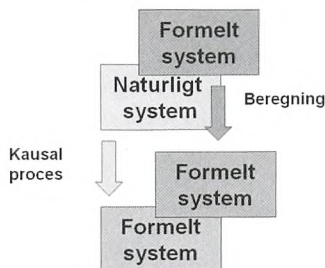
Den aristoteliske tradition afviste ikke de matematiske beskrivelser, men anså dem blot for et redskab til at søge efter tingenes virkelige årsager. For Aristoteles var der fire årsagstyper:

1. Den *materielle årsag* (hyle eller *causa materialis*) som beskriver det stof en ting er lavet af
2. *Form-årsagen* (eidos eller *causa formalis*) som beskriver den måde tingen er organiseret på
3. Den *effektive årsag* (to kineti'kon eller *causa efficiens*), som beskriver de aktive kræfter, som virker på eller frembringer tingen
4. *Mål- eller formålsårsagen* (to 'telos eller *causa finalis*) som beskriver det formål tingen tjener til.

Tager vi et hus, er mursten og mørtlen den materielle årsag, arkitekttegningen af huset er dets formårsag, mureren der bygger huset er dets effektive årsag, og det at yde husly for en familie dets finale eller formålsårsag.



Figur 1A. Modelrelationen. En model for hvordan vi laver modeller i fysik. Processer i det naturlige system repræsenteres (indkodes) i en formalisme, som er tilgængelig for matematisk manipulation (beregning), som dernæst tillader fortolkning (afkodning), hvorved det naturlige systems næste tilstand søges forudsagt. (Efter Robert Rosen og Donald C. Mikulecky).



Figur 1B. Faren ved modeller: Man glemmer at skelne klart mellem model og virkelighed, og overser bestemte begrænsninger i den indkodnings- og tolkningsproces, der kræves, for at komme fra 'virkelighed' til model og tilbage igen. Derved overser man let begrænsningerne i den matematiske formalisme, og kommer til at antage, at naturen opfører sig ligesom den matematik, vi vælger.

Aristoteles anså som sin samtid de fleste fænomener i verden som havende bestemte formål. De fire årsager var for ham ikke så meget adskilte aspekter af naturen, som en art forklaringsprincipper, der af og til flød sammen, fx når form-, den effektive, og formålsårsagen tilsammen virker i det spirende agern, som med tiden vokser sig til et egetræ. I renæssancen fremførtes en populær kritik af formålsårsagen. Man hævdede, at den var lidt mystisk i og med den forudsatte forestillingen om, at noget endnu-ikke eksisterende (et mål, en fremtidig tilstand) kunne påvirke en nuværende tilstand, som om fremtiden kunne trække i nutiden. En sådan måde at forstå formålsårsagen på må selvfølgelig fremkalde skepsis. At det ikke var en retfærdig tolkning af Aristoteles, er så en anden sag. I al fald førte det mekanicistiske verdensbillede efter renæssancen til at man forbød forestillingen om naturlige formål, og anså andre årsager end de effektive for at være for menneskelignende. Livsvidenskaberne kunne dog ikke leve op til denne reduktion, og fortsatte primært som naturhistorie med en aristotelisk indstilling, helt frem til Darwin og den moderne genetik. Her lod det så til at 'formålet' eller måltrettetheden i organismernes komplekse tilpasninger nu kunne forklares som et kompliceret resultat af mekanismerne i den naturlige selektion og arveligheden. Men end ikke det moderne neodarwinistiske paradigme (som etableredes fra 1920'erne og frem) kunne redegøre for de ikke-lineære mekanismer i den selvorganisering, man ser i organismens udvikling fra foster

til voksen. De målrettede (teleologiske) egenskaber i fosterudvikling og formering forblev selv nødvendige men uforklarede forudsætninger for at den naturlige selektion kunne virke.

Det mekaniske verdensbilledes succes – og begrænsninger

Den arkimediske tradition var blevet grundlagt i discipliner, som var mere fysiske end matematiske, men kombinerede dem i fx optik, astronomi og akustik. De matematiske forhold, som Arkimedes (ca. 287-212 f.v.t.) opdagede og beskrev i sine værker om mekanik, var ikke aprioriske, som i den platonske tradition, men afledt af erfaringen. Dog blev den aristoteliske bestræbelse på at afdække fænomenernes årsager, især de finale årsager, opfattet som metafysisk og derfor opgivet. Den arkimediske tradition omfatter navne som Ptolomæus, Johannes Kepler, Galileo Galilei og Isaac Newton. Kepler var i starten en platoniker, som ønskede at beskrive det kopernikanske system (med Solen i centrum, i modsætning til det ptolemæiske) vha. regulære polyedre, men fejlede i dette, og fandt de rigtige love for planeternes bevægelser gennem en matematisk analyse af Tycho Brahes empiriske iagttagelser. Galilei fandt sine love for faldende legemer ved at droppe antagelsen om en hypotetisk gravitationel kraft og i stedet anvende mål, som var proportionale med et bevægende legemes hastighed, for virkningen af denne kraft.

Selvom det mekaniske verdensbillede kun understreger den rolle 'de effektive årsager' har som forklaringsprincipper i fysik, blev selve idéen om årsager nedtonet i en lang periode, enten på grund af skepsis med hensyn til årsagers virkelige eksistens (David Humes positivisme), eller man anså begrebet om årsag snarere som en logisk forudsætning for overhovedet at erfare noget empirisk (Immanuel Kants transcendentale idealisme), dvs. det blev en egenskab ved subjektet. Dog fik naturens love i fysikken, som de kunne udtrykkes matematisk, en afgørende rolle i årsagsforklaringen af et systems bevægelse. Det antoges, at ethvert naturligt system kunne indkodes i en formalisme (fx et sæt differentilligninger som repræsenterer de basale love der styrer systemet) og at den logiske følgestruktur i formalismen perfekt afbilder den (effektive) kausale struktur i naturen. Dette synspunkt var foreneligt med mikro-determinisme, hvor et systems makroskopiske egenskaber og processer ses som fuldstændigt determinerede af de indeholdende partiklers adfærd, som de er styret af deterministiske love. Dette synspunkt er der bl.a. blevet sat spørgsmålstegn ved gennem opkomsten af kvantefysikken, og med Robert Rosens arbejde med fundamentale grænser for dynamiske modeller af kausale systemer.

Årsager i selvstyrende systemer

Årsagsfænomenets kompleksitet, især i målrettede systemer, blev delvis erkendt af den kybernetiske forskning i 1940'erne, hvor man studerede negativ feed-back

kontrol i såvel dyr og som artefakter (som selvstyrende missiler) og den rolle information spiller i regulering af adaptive systemer. Et paradigmatiske eksempel er de næsten lukkede kausale sløjfer, som sammenkæder forskellige hormoners niveauer i kroppen; essentielt for opretholdelsen af den fysiologiske balance (homeostasis) - en moderne udgave af den klassiske uroboros, slangen, der spiser sin egen hale (figur 2).

Da de ikke-lineære studier af fysiske systemer for alvor dukkede op sidst i det 20. århundrede betød det en øget interesse for den gamle ide om, at ikke alle kausale forklaringer kan reduceres til en simpel én-til-én korrespondance mellem årsag og virkning. Den opnåede indsigt, at komplekse systemer kan optage forskellige dele i faserummet af mulige tilstande - som er karakteriseret af kvalitativt forskellige attraktorer, evt. adskilt af grænser med en fraktal struktur - har været med til, at sætte spørgsmålstejn ved mikrodeterminismen. Tvivlen på mikrodeterminismen er også øget pga. af det forhold, at mange af disse ikke-lineære systemer har en høj følsomhed på begyndelsesbetingelserne (sommerfugleeffekten).



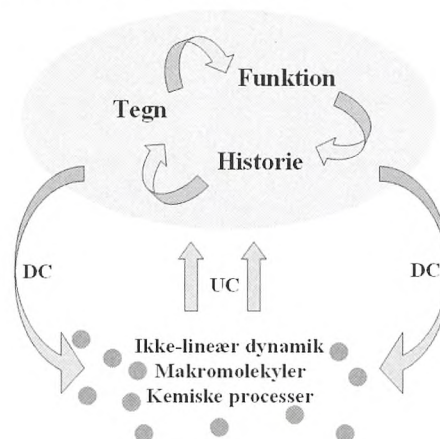
Figur 2. Uroboros: Et urgammelt symbol, her fra en græsk-byzantinsk alkymistisk tekst. Slangen, der spiser sin egen hale, har man tydet som visende en stadig fornyelsesproces. Kybernetikere og biologer i det 20. århundrede (bl.a. C.H. Waddington) benyttede billedet som symbol på kybernetiske, selvorganiserende og selvstyrende processer.

Emergens af kollektivt adfærd og nedadgående kausalitet

En anden vigtig indsigt er at komplekse ting ofte selvorganiserer sig som højniveau-mønstre via dynamiske processer hvor systemets simple dele vekselvirker lokalt. Man kan se denne 'emergens' af helheder (kollektiv adfærd af mange dele) afspejlet i de kausale forklaringer: I stedet for blot top-down reduktive forklaringer giver de ikke-lineære studier anledning til en yderligere type 'bottom-up forklaringer' af de emergente fænomener. Selvom disse forklaringer også er reduktive (i metodisk forstand forstået sådan at man eksakt kan se hvad der foregår trin for trin i en simulering af systemet) gør selve kompleksiteten af systemet forudsigelse (som den beregningsmæssige foregribelse af det faktiske systems udvikling) umulig; dvs. en simpel beregningsmæssig genvej for at forudsige en fremtidig tilstand vil sjældent være opnåelig.

Da en emergent helhed dannes bottom-up, vil dens organisation begrænse helhedens komponenter på en 'top-down' facon, hvilket er blevet kaldt for 'downward

causation' (DC) eller 'downward determination', altså 'nedadgående begrænsning' (figur 3).



Figur 3. Stærkt skematisk billede af to kausale niveauer i en organisme, fx en fritlevende celle. Nederst, det bio-fysiske niveau med den ikke-lineære lokale vekselvirkning mellem de enkelte molekyler, øverst det biologiske niveau, med nogle af de emergente egenskaber (se teksten), som karakteriserer liv. UC: 'upward causation' (opadgående kausalitet, emergens af kollektiv adfærd); DC: 'downward causation' (nedadgående kausalitet).

Der er i al fald tre mulige fortolkninger af fænomenet:

(1) I 'stærk DC' vil den emergente helhed (fx det menneskelige sind) bevirke ændringer i selve de regler eller lovmæssigheder, som styrer neuronernes adfærd i hjernen. Denne fortolkning er dog svær at forene med et naturvidenskabeligt verdensbillede, og de, som støtter den, hælder ofte til en dualistisk opfattelse af forholdet mellem fx fysik og liv, eller hjerne og bevidsthed.

(2) I 'middel-DC' vil lav-niveau regler eller love forblive de samme, men deres grænsbetingelser påvirkes kraftigt af det emergente mønster (fx et mentalt billede, eller et begreb) som her opfattes lige så virkeligt som systemets komponenter (fx signalstofferne dynamik i synapserne). Her virker det højere niveau tilstand som en selektionsfaktor, der bestemmer hvilken af de mange mulige næste tilstande på det højere niveau, som skal fremkomme (eller 'opkomme', emergere) fra det lavere niveau.

(3) I 'svag DC' anses det emergente højere niveau som reguleret af stabile (cykliske eller kaotiske) attraktorer for dynamikken på det lavere niveau. Den kendsgerning at en biologisk art består af dynamisk stabile organismer, er ikke kun et resultat af naturlig selektion (samspillet mellem gener og miljø), men også af sådanne indre, formale egenskaber ved systemets organisation - den naturlige selektions 'job' bliver her blot at udvælge de mulige stabile organismer, som er bedst tilpasset det pågældende miljø (eller som har evnet at lave dette miljø om bedst muligt), men ikke at 'skabe' disse former selv. Bl.a. de teoretiske biologer Stuart Kauffman og Brian Goodwin har været med til at påpege dette. Man ser her den gamle biologiske skelnen mellem to udviklingsformer, evolution (ved naturlig

selektion mv.) og 'development' (dvs. fosterudvikling og fysiologiske dynamikker) genspillet som en skelnen mellem to vidt forskellige ikke-lineære dynamikker.

Det skal tilføjes, at DC ikke er en form for effektiv årsag-virkning (som ofte ses som en temporal sekvens fra årsag til virkning), men er synkron, og kan anskues som en moderne version af de aristoteliske form- og mål-årsager.

De ikke-lineære studier af fysiske og biologiske systemer kan ses som forenende dels den platoniske værdsættelse af universalitet i naturforklaringen (universelle matematiske egenskaber findes i mange af de ligninger, der karakteriserer kaotiske systemer, desuagtet deres individuelle materielle natur som økonomiske, økologiske, fysiologiske, eller kemiske), dels den aristoteliske accept af forskellige typer principper i forsøget på at give årsagsforklaringer, og endelig den arkimediske pragmatisme med hensyn til den dybere betydning af determinisme og kausalitet. Det sidste reflekteres i det faktum at selvom deterministisk kaos karakteriserer en stor klasse af systemer, betyder dette jo ikke, at naturen 'er' fuldt deterministisk. Determinismen henviser her til den matematiske beskrivelse og dens værktøjer, snarere end til et ontologisk begreb om kausalitet.

Biologiens beskrivelse af en organisme

Skønt ikke-lineær dynamik er et vigtigt tværfagligt forskningsfelt, som har været med til at belyse hidtil ukendte egenskaber ved biologiske systemer, er der ingen tvivl om at kompleksiteten i de systemtyper, vi normalt kalder levende, er meget høj. En vigtig lærdom af biokemi og molekylærbiologi er, at 'biologisk information' (som i dag ofte sidestilles med DNA-sekvens information) oprindeligt betød 'specificitet' og henviste til den egenskab ved stofskiftet, at de mange reaktioner i en celle er medieret af højspecifikke og funktionelt stærkt organiserede reaktioner (bl.a. via enzymer). Det betyder, at en beskrivelse af systemets komponenter på atom- eller lavmolekylært niveau er utilstrækkelig.

Det interessante i en organisme, for så vidt den anskues som et stykke biologi og ikke et stykke fysik, er dens *funktionalitet*, *historicitet* og *semioticitet*, og det forhold, at disse tre egenskaber alle er (bio)logisk forbundet:

- *Funktionaliteten* er den målrettede forbindelse mellem enkeltdele og helheden, hvor hver delproces er både mål og middel for organismens selvopretholdelse.

- *Historicitet* er det forhold, at de enkelte funktioner hver er et historisk produkt af komplekse evolutionære processer, hvori bl.a. indgår en særlig hukommelseskomponent (så fx cellen kan producere netop de få funktionelle ud af de mange mulige tredimensionelle makromolekyler).

- *Semioticiteten* (som kommer af semiotik, læren om tegn) er den måde, som hukommelsen er implementeret på, og det forhold, at tegnene (som fx de enkelte gener, eller de enkelte domæner for fx molekylær genkendelse) er organiseret i semantiske

rum, der udgør de egentlige grænsebetingelser for selve systemets fysiske dynamik. Herved opnår mønstret i dynamikken betydning for organismens overlevelse.

I den forstand kan man også teoretisk anskue liv som en række indbyrdes forbundne egenskaber, der tilsammen definerer en anden og højere (eller mere specifik) bevægelsesform end fx det, som karakteriserer galakser eller oceanplader.

Liv genskaber liv på en bemærkelsesværdig specifik måde, som har fascineret generationer af forskere, helt tilbage fra før der fandtes videnskaber som fysik og biologi. Selvom vi regner med at liv er opstået af rent fysiske systemer, er grænsen mellem biologi og fysik ikke blot kunstig, men repræsenterer altså reelle emergente egenskaber, eller reelle forskelle i naturens organisationsprincipper. Men dermed ikke sagt, at man ikke engang opnår en så integreret forståelse af livets opståen, dynamik, og tegnprocessering, at grænsen mellem fysik og biologi som videnskaber opløses som kunstig.

Litteratur

- [1] Depew, David, J. and Bruce H. Weber (1995), *Darwinism evolving. System dynamics and the genealogy of natural selection*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [2] Emmeche, C. (2005), "Causality", s. 100-102 i: Alwyn Scott, ed.: *Encyclopedia of Nonlinear Science*. New York and London: Routledge.
- [3] Emmeche, C., Stjernfelt, F. og Køppe, S. (2000), "Levels, Emergence, and Three Versions of Downward Causation", ss. 13-34 i: Peter Bøgh Andersen, Claus Emmeche, Niels Ole Finnemann and Peder Voetmann Christiansen, eds. (2000), *Downward Causation. Minds, Bodies and Matter*. Aarhus: Aarhus University Press.
- [4] Gregersen, Niels Henrik og Aksel Wiin Nielsen, red. (1992), *Kaos og Kausalitet*. Århus: Aarhus Universitetsforlag.
- [5] Pedersen, Olaf (1990), "Videnskabens fødsel – et sprogligt problem", s. 13-35 i: Thor A. Bak og Erik Dal (red.): *Videnskabens Enhed – ?*, København: Munksgaard.
- [6] Rosen, R. (1985): "Organisms as causal systems which are not mechanisms: an essay into the nature of complexity", ss.165-203 in R. Rosen (ed.): *Theoretical Biology and Complexity*. Orlando, Oxford: Academic Press.
- [7] Rosen, R. (1991): *Life Itself. A Comprehensive Inquiry Into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*. New York: Columbia University Press.
- [8] Rosen, R. (2000), *Essays on life itself*. New York: Columbia Univ. Press.



Claus Emmeche (her på spor efter muligt liv ved den islandske sø Jökulsárlón) er biolog og videnskabsteoretiker og leder af Center for Naturfilosofi og Videnskabsstudier, Københavns Universitet (www.nbi.dk/natphil). Han forsker i biologiens filosofi, herunder dens forhold til fysik, og i brugen af tegnteori (semiotik) til at forstå informationsaspektet af levende systemer.