Styres forskningen af Kleopatras næse?

Benny Lautrup

9. september 1996

Inden for naturvidenskaben udmærker fysikken sig ved at have udviklet et kraftigt analytisk apparat bestående af matematiske metoder og modeller for fundamentale systemer. Indtil for relativt få år siden var disse metoder begrænset til temmelig enkle mekaniske problemstillinger, men computeren har nu muliggjort en anvendelse af fysikkens metoder på langt mere komplekse systemer. De mekanismer, der underligger livets og tankens basale processer, ser mere og mere ud til at blive tilgængelige for matematisk analyse og modellering, og nye naturlove, for eksempel for systemer der undergår evolution, er ved at dukke op i horisonten.

Dette kapitel samler nogle af mine tanker om samspillet mellem det enkle og det komplekse, mellem orden og kaos, funktion og skønhed, styring og udvikling, del og helhed. Efter en lidt lang indledning, der definerer de grundlæggende begreber, som er nødvendige for forståelsen, vil jeg bevæge mig ind i et af de mere konkrete komplekse områder, nemlig hjerneforskningen. Jeg vil diskutere dette heterogene områdes forskellige begrebsniveauer og den betydning, fysikken har for studiet af den tænkende hjerne, som det for eksempel kommer til udtryk gennem de moderne skannere, der i dag findes på hospitalerne. I slutningen af kapitlet vil jeg komme ind på, hvorledes kunstige neurale netværk kan anskues som matematiske modeller for simple tankeprocesser, og hvilke problemer det rejser.

Lad mig med det samme sige, at jeg er naturvidenskabsmand, ikke filosof. Min videnskabsteoretiske indsigt er baseret på et langt liv i aktiv videnskab og en god portion nysgerrighed, ikke på omfattende litteraturstudier eller et tilhørsforhold til en bestemt filosofisk skole. Nogle vil kalde mig idealist, andre realist, andre igen positivist. Ingen af delene er korrekt. Jeg er min egen kat.

Naturens kompleksitet

Det er klart for enhver, at naturen er et komplekst system. Den indeholder objekter på mange skalaer, lige fra galakser, over mennesker til atomkerner [1]. Videnskaben har brugt århundreder på at indsamle og klassificere naturens objekter på alle tilgængelige skalaer. Vi har kataloger af atomer, bakterier, sommerfugle, stjerner, botanikere og komponister.

[1] Se også Hollis R. Johnson's kapitel i denne bog.

Parallelt med udforskningen af objekternes mangfoldighed søger forskningen også at karakterisere vekselvirkningerne mellem objekterne. For det meste er disse vekselvirkninger selv så komplicerede, for eksempel i sociologien eller biologien, at en eksakt beskrivelse ikke indtil videre har vist sig mulig. I fysikken er det derimod lykkedes at opstille matematiske naturlove med enorme gyldighedsområder. Newtons love med senere udvidelser til kvantemekanik og relativitetsteori er således gyldige for alle fysiske fænomener på både det mikroskopiske og det makroskopiske plan[2].

Naturlovenes enkelhed

På trods af naturens kompleksitet har de fysiske love en enkelhed, der står i skarp modsætning til fænomenernes kompleksitet. I de eksakte videnskaber ser man fænomenerne udfolde sig fra disse enkle love efter strenge matematiske regler. I partikelfysikken er der adskillige eksempler på, at en partikel er blevet opdaget, fordi den matematiske formalisme gjorde opmærksom på muligheden. Dette gælder for eksempel for elektronens antipartikel, positronen, der blev forudsagt af Dirac i 1928, men først opdaget i 1932. [3]

Hvad styrer forskningen?

Naturlovenes matematiske former opfattes af mange som æstetiske. Enkle og perfekte som Kleopatras næse. Newton var i stand til at sammenfatte alle sin tids mekaniske fænomener i tre simple love. Maxwells ligninger, der er meget smukke, enkle og dybe, kræver dog en ret avanceret matematisk indsigt for at se det. Einsteins relativitetsteori blev nærmest født som en skønhed, medens kvantemekanikken tog ti år om at vokse sig køn.

Formel skønhed har formodentlig ikke den store betydning for den aktive videnskab, når man undtager de allermest fundamentale teorier. På fronten af videnskaben hersker der sædvanligvis et frygteligt rod, og formalismens skønhed bliver først klar, når afklaringen ad åre sætter ind. Videnskabelige publikationer antyder kun sjældent den forvredne vej, der har ført forfatteren på sporet af sin opdagelse, men er ofte et skønmaleri af argumenter. Den formalistiske skønhed i naturlovene fremkommer som en efterrationalisering, en slags historieforvanskning. Jeg tror ikke, at det perfekte, Kleopatras næse, er en primær drivkraft for forskningen.

Naturlovene besidder i modsætning til størstedelen af kunsten udelukkende indre skønhed. En formel er kun køn, når den fortolkes som et udsagn om et systems vekselvirkninger; ellers kan den sagtens være grim. Heri ligner fysikkens skønhedsbegreb litteraturens mere end malerkunstens. Skriftsnit og glittet papir er jo heller ikke det væsentlige i skønlitteraturen.

---

[2]Se også Holger Bech Nielsen's kapitel i denne bog.

[3]Som altid er der lidt krøller på historien. Dirac troede i begyndelsen, at den positivt ladede partikel, som hans teori forudsagde, var den velkendte proton, men det viste sig hurtigt ikke at kunne være tilfældet, fordi den nye partikel ifølge teorien måtte have samme masse som elektronen.

Mange ser denne indre skønhed i naturlovene som et fingerpeg om en højere intelligens, en guds værk. Eftersom det ikke har vist sig muligt at sætte fingeren direkte på Vorherre, så indtager de fleste forskere den pragmatiske holdning, at det ikke er nyttigt at beskæftige sig med hverken de æstetiske eller religiøse sider af videnskaben. Det strengt puritanske regelsæt omkring formulering og præsentation af videnskabelige resultater har da også fuldstændig bandlyst sådanne betragtninger i seriøse tidsskrifter.

Skønhed i teknologiens frembringelser er heller ikke en primær drivkraft, men for det meste sekundær i forhold til funktionen. Et Concorde overlydsfly er ikke smukt, fordi et team af designere har formgivet det som en anden sportsvogn fra Ferrari, men fordi aerodynamikkens principper dikterer vingernes fejende form, ganske som det er tilfældet for en albatros. De smukkeste bygningsværker, for eksempel de danske broer, er heller ikke eksplicit designet med skønhed for øje. Skønheden fremkommer som et — meget velkomment — biprodukt af mekaniske beregninger på bæredygtighed og stabilitet overfor vind og vejr.

Det, der driver forskningen for den enkelte forsker, er formodentlig en blanding af flere faktorer. Nysgerrighed om det uopdagede, eller hvis vi skal blive i det ægyptiske, Nilens kilder, spiller nok en stor rolle. Cæsars bud og Faraos penge, altså regeringens krav til forskningens sigte og indhold, bakket op med målrettede midler, spiller også en stor rolle — specielt for grupper af forskere, fordi kun få forskere i dag kan udføre deres arbejde uden en vis adgang til pengemidler. Jeg skal senere kommentere dette i lyset af nogle moderne evolutionstanker.

Reduktionisme

Det er næsten trivielt at sige, at et system, hvad enten det er fysisk, biologisk eller sociologisk, må være elementært (i betydningen udeleligt) eller sammensat af mindre dele. Videnskabelig reduktionisme går ud på, at en opregning af systemets dele, *inklusive* de love, der styrer vekselvirkningerne mellem dem, udgør en tilstrækkelig beskrivelse af systemet. Denne beskrivelse danner ifølge den reduktionistiske opfattelse grundlaget for en fuldstændig forklaring eller beregning af systemets opførsel i alle sammenhænge.

De fleste fysikere, som beskæftiger sig med fundamentale teorier, er overbeviste reduktionister. De har set så mange eksempler på, at det er muligt at forklare sammensatte systemers egenskaber ud fra delene, at de anser det for et generelt princip.

Systemer, der ikke kan splittes ad, er elementære. Grænsen for, hvad der opfattes som elementært, flyttes hele tiden. En gang blev atomerne opfattet som elementære, men det er ikke længere tilfældet. I dag regner de fleste endda med, at det, der kaldes elementarpartikler, ikke fortjener betegnelsen, men er opbygget af de endnu mere elementære superstrenge, og nogen spekulerer endda på niveauet under superstrengene. Det er forunderligt, at vi måske for altid vil være uvidende om, hvad der i grunden er elementært. I praksis kan vi derfor opfatte alle systemer som sammensatte.

Den reduktionistiske opfattelse er upopulær, fordi den også reducerer livet og tanken til i bund og grund fysiske fænomener. Mange vil stadig mene, at levende stof ikke blot er dødt stof sat sammen på den rigtige måde, men at der skal et særlig princip eller en livsgnist til. Endnu flere vil mene, at intelligente og især bevidste systemer ikke blot kan dannes ved at sammensætte celler og forbindelser, men at det kræver et særligt pust af ånd at sætte det i gang. Der er meget, der tyder på, at sådanne 'gnister' ikke er nødvendige for at forstå livet og tanken.

Det er så godt som umuligt at dyrke videnskab uden at være reduktionist. Hvis det virkelig er nødvendigt med den omtalte livsgnist, så må dens egenskaber kunne studeres, karakteriseres og analyseres, og dermed bliver den en del af beskrivelsen af levende systemer. Et etisk eller religiøst begrundet forbud mod at analysere den hypotetiske livsgnist ville stride imod alle videnskabelige principper om åbenhed og redelighed.

Fra atomteori til molekylærbiologi

I dette århundredes fysik er der mange reduktionistiske succeshistorier. Tag for eksempel atomerne. Tanken om, at der skulle eksistere atomer, går langt tilbage, men i sidste halvdel af det forrige århundrede blev det mere og mere klart, at mange af kemiens resultater antydede, at der kunne eksistere sådanne objekter. Ikke desto mindre var det først i begyndelsen af dette århundrede, at atomerne blev opdaget og nogenlunde samtidig blev deres indre struktur klarlagt. Siden da har vi vidst, at et atom består af et antal elektroner og en atomkerne, og at disse bestanddele vekselvirker elektromagnetisk med hinanden ifølge kvantemekanikkens love.

Er denne beskrivelse nu fuldstændig? Er der grænser for gyldigheden af denne atomteori? Jo, såmænd, men de ligger langt væk. Gyldighedsområdet for atomteorien er så enormt, at der kræver stor anstrengelse, både teoretisk og eksperimentelt, at nærme sig grænsen. En af grænserne går mod relatitivetsteorien, som giver bittesmå korrektioner til atomernes egenskaber, men denne teori kan sagtens inkluderes og er ikke en rigtig grænse. Værre er det med atomkernernes indre struktur, som også giver anledning til nogle bittesmå korrektioner. Den begrænsede viden, vi har om kernepartiklernes vekselvirkninger, sætter faktisk også grænsen for den præcision, hvormed vi kan forudsige atomernes egenskaber, men relativt drejer det sig kun om milliontedele.

Atomteoriens success skyldes, at atomkernen er så lille, og at elektromagnetismen er en svag kraft, der gør det forholdsvis let at lave meget præcise beregninger med en række successive og forbedrende korrektioner. Den moderne atomteori er simpelthen verdens bedste teori med hensyn til efterprøvet gyldighedsområde og nøjagtighed.

I kemien beskæftiger man sig med molekylernes egenskaber og opførsel. Molekylerne er sammensat af atomer, og de fysiske love, der gælder for atomer, kan derfor bruges til at udlede de fysiske love, der gælder for molekyler. Molekylernes vekselvirkninger kan i princippet gennem atomteorien afledes af elektromagnetismen, og dette medfører i yderste reduktionistiske konsekvens, at selv det saftigste kys eller den tørreste folketingsdebat er et udslag af elektromagnetiske vekselvirkninger.

En stor del af en moderne teoretisk kemikers tid går faktisk med computerberegninger af molekylers egenskaber ved hjælp af atomteorien og kvantemekanikken. Broderparten af den supercomputertid, der herhjemme bevilges til videnskabsmænd, går netop til sådanne kvantekemiske beregninger.

I praksis kan molekylernes egenskaber dog kun beregnes med den nøjagtighed, computerne tillader. Der kommer et niveau, hvor selv de mest indædte teoretikere bevæbnet med de hurtigste computere kommer til kort overfor molekylernes kompleksitet. Det er her, vi finder de gammeldags kemikere med deres kolber, rør, valenser og reaktionskinetik. De benytter et sprog, der ikke umiddelbart kan reduceres til atomfysikkens, men har sin egen begrebsverden. Helt galt bliver det i biokemien, hvor molekylerne er så store, at det er endnu er utænkeligt at lave *ab initio* beregninger på deres egenskaber, altså beregne deres egenskaber ud fra atomteorien.

Parallelt med den praktiske umulighed af at gennemføre en reduktion af de komplekse molekylers egenskaber sker der en opblødning af den strengt reduktionistiske holdning. Mange biologer vil hævde, at reduktionen selv ikke principielt er mulig, men at der må være specielle regler for udviklingen af liv og tanke, som ikke er indeholdt i de kendte fysiske love. Man kan vel ikke udlede eksistensen af et kløverblad eller en ko fra fysikkens principper?

Grænser for reduktion

Grænserne for gennemførelse af reduktionen sættes oftest af manglende viden om et underliggende fænomen, en forkert underliggende teori eller praktisk uigennemførlighed. I atomteorien er det som sagt kernefysikken, der sætter begrænsningen. For selv om kernepartiklerne er velkendte objekter, så er deres stærke vekselvirkninger kun delvis kendt, hvilket giver anledning til usikkerhed i beregningerne.

På kernernes eget niveau findes der nemlig ingen fuldstændig teori for de stærke kernekræfter. Der findes mange brudstykker af teorier, som hver for sig beskriver forskellige aspekter af kernernes struktur og vekselvirkninger, men for at opnå en samlet teori har det vist sig nødvendigt at gå et niveau længere ned til de såkaldte kvarker, som kernepartiklerne er sammensat af.

Kvarkernes vekselvirkninger er beskrevet ved en enkel og smuk teori, der er en generalisation af den elektromagnetiske vekselvirkning, men i visse henseender også en slags negativbillede af den. Kvarkernes vekselvirkninger er for eksempel ikke svage ved de energier, som findes i kernerne, men først ved langt højere energier. Det fører til stor kompleksitet, og det har derfor ikke endnu været muligt som i atomfysikken at gennemføre detaljerede beregninger af kernernes egenskaber ud fra kvarkernes, selv om alle er overbevist om, at det principielt bør kunne lade sig gøre, fordi kvarkteorien anses for en fuldstændig beskrivelse af naturen på dette niveau.

Kvarkteorien er et negativbillede af elektromagnetismen, fordi den vender op og ned på høje og lave energier. Vekselvirkningens voksende styrke ved lave energier betyder, at det ikke er muligt at isolere enkelte kvarker i fri tilstand. Alle andre sammensatte systemer har kunnet skilles i deres enkelte dele, men kernepartiklerne kan ikke. Alligevel er de ikke elementære, men består af kvarker. Det rejser et mindre sprogligt og filosofisk problem om meningen af begreberne 'elementær' og 'sammensat', og om hvordan reduktionisme egentlig skal defineres, når et systems dele kun kan adskilles matematisk, men aldrig i virkeligheden.

Går vi den anden vej mod større systemer bliver reduktionsproblematikken i reglen mere alvorlig. Cellebiologiens reduktion til biokemi strander på manglende viden om de store molekylers vekselvirkninger, fysiologiens reduktion til cellebiologi strander på manglende viden om cellernes vekselvirkninger, og sociologiens reduktion til fysiologi strander på manglende viden om menneskers vekselvirkning.

Selv om den underliggende teori er velkendt, så kan det som sagt være praktisk, grænsende til principielt, umuligt at gennemføre reduktionen. De ligninger, som beskriver atmosfærens bevægelser eller verdenshavenes strømning, har været kendte i århundreder. Alligevel er det umuligt at forudsige vejret mere end nogle få dage, fordi ligningerne giver anledning til det, der i dag kaldes deterministisk kaos. De ligninger, som korrekt skulle forudsige vejret, er meget følsomme over for små fejl i begyndelsesbetingelserne. Efter forholdsvis kort tid, maksimalt et par uger for vejrets vedkommende, vil disse fejl forstørres op og effektivt sætte en grænse for beregningerne. Selv om computerne er hurtige nok, så er det, der kommer ud af beregningerne, ikke troværdigt, fordi vi ikke kan kende atmosfærens tilstand med tilstrækkelig stor præcision til at begynde med.

Emergens

Fysikken bliver ofte beskyldt for ikke at kunne forklare *emergente* egenskaber, altså egenskaber ved et system, som ikke blot fremkommer gennem en opsummering af delenes egenskaber. Vand er flydende, selv om intet vandmolekyle har denne egenskab. En celle er levende, selv om dens molekyler ikke er det. En hjerne kan tænke, selv om dens celler ikke kan. Et samfund kan konstruere store flyvemaskiner, selv om intet enkelt menneske er i stand til det.

Der findes en moderne filosofisk orienteret folkebevægelse, holismen, som mener, at man aldrig kan forklare et systems egenskaber reduktionistisk, men at helheden spiller ind på ethvert niveau. De emergente egenskaber er lige så fundamentale som delenes. De helligste holister vil endog gå så vidt at hævde, at delenes egenskaber er uvedkommende, kun helheden har betydning, for eksempel i sygdomsdiagnose og -behandling.

En trafikprop i København er fint et eksempel på et emergent fænomen. Her er det indlysende, at ingen af bilerne har egenskaben trafikprop, men samlingen af biler, kollektivet, kan danne den. En trafikprop er absolut ikke en sum over de enkelte bilers trafikpropper, men en konsekvens af vekselvirkningen mellem bilerne indbyrdes og med omgivelserne.

Set fra fysikkens synspunkt er der intet mystisk ved emergente egenskaber. Emergente egenskaber opstår typisk, når et system består af så mange komponenter, at det er mere fordelagtigt at beskrive dets opførsel ved globale makroskopiske parametre i stedet for de mikroskopiske. Radioens trafikmeldinger vil omtale trafikproppens makroskopiske parametre, for eksempel størrelse og varighed, men ikke de enkelte bilers bevægelse, selv om det teoretisk er muligt omend meget upraktisk. Der er intet mystisk ved en trafikprop.

Emergente egenskaber udgår altså fra kollektivet, snarere end fra de enkelte dele. I modstrid med den populære påstand har studiet af kollektive emergente egenskaber faktisk i mange år været en central del af fysikken. Især i de sidste tyve år har computerne gjort det muligt at gå ud over teoretiske betragtninger og simulere, hvorledes systemer med mange vekselvirkende komponenter opfører sig.

Der findes mange eksempler på overgangstilfælde mellem det mikroskopiske og det makroskopiske. I dette grænseland har et system netop så få komponenter, at det opfordrer til en mikroskopisk beskrivelse, medens antallet af komponenter på den anden side er så mange, at en makroskopisk beskrivelse også er på sin plads.

Atomkernerne er udpræget et sådant mellemområde, idet antallet af partikler i en kerne går fra nogle få stykker helt op til et par hundrede. Som sagt ovenfor, findes der ikke på kernernes niveau en afsluttet teori for atomkernerne, men mange brudstykker. Nogle af disse er makroskopiske og tilskriver kernestoffet kollektive egenskaber som for eksempel rotation og vibration, medens andre er mikroskopiske og tilskriver kernerne en skalstruktur på basis af en partikelmodel. Danskerne Aage Bohr og Ben Mottelson fik netop deres Nobelpris i 1976 for udforskningen af teorien for kernernes kollektive egenskaber.

Af andre overgangstilfælde kan nævnes atomklynger, proteiner og DNA, et befrugtet ægs første udvikling, samarbejde i mellem sociale individer i mindre grupper og så videre.

Begrebsniveauer

Videnskabens struktur er karakteriseret ved mange overgange mellem mikroskopisk og makroskopisk. I disse overgange vil det, der forekommer som en partikel på et niveau optræde som et komplekst sammensurium af mindre bestanddele på et dybere niveau. En vanddråbe kan som bekendt betragtes som et helt univers. På hvert beskrivelsesniveau er der udviklet et begrebsapparat, som er karakteristisk for niveauet. Begrebsapparatet udgør for det meste en konsistent beskrivelse, der er udviklet længe førend begreberne på et dybereliggende niveau. Men inkonsistenser — paradokser — kan forekomme og give et fingerpeg om det dybereliggende niveau.

I atomteorien ledte inkonsistenserne i den klassiske beskrivelse af et elektromagnetisk bundet atom til de første skridt ind i den kvantemekaniske beskrivelse af stoffet. Ifølge den klassiske fysik kunne atomet ikke være stabilt, men elektronen måtte hurtigt spiralere ind i kernen under udsendelse af elektromagnetisk stråling. Derfor måtte der ske ændringer i teorien, så elektronen blev stoppet i sin dødsspiral.

Bohrs atommodel og den efterfølgende udvikling af kvantemekanikken gav svaret. Det går ud på, at en indfangning af elektronen i et meget lille område omkring kernen vil tildele den en så stor hastighed, at den ikke kan forblive i området. Der findes en mindste afstand mellem elektron og kerne, hvor de to effekter netop balancerer hinanden, og det er præcis denne mindste afstand, som giver atomerne deres karakteristiske størrelse.

De naturlige fænomener, som forekommer på et givet begrebsniveau, har tit en karakteristisk længdeskala. Atomkerner er groft sagt hundrede tusinde gange mindre end atomer, som er hundrede tusind gange mindre end en celle, som er hundrede tusinde gange mindre end et menneske, som er hundrede tusinde gange mindre end et land, som er hundrede gange mindre end en planet, som er hundrede gange mindre end en stjerne, som er tusind milliarder gange mindre end en galakse, som er en million gange mindre end hele universet. Sådan cirka.

Så længe et begrebsniveau ikke kan reduceres til et dybere i alle sammenhænge, vil det være nødvendigt at opretholde det som et selvstændigt område med sine egne lovmæssigheder. Selv om reduktionen er vidt fremskreden, som i kemien, kan det være praktisk nødvendigt at opretholde begrebsniveauet, fordi det giver en effektiv kommunikation om fænomenerne, selv om man godt ved, at en præcis beskrivelse kræver det underliggende niveau.

Der findes begrebssystemer, som stadig vedligeholdes, men hvor kontakten med andre niveauer er opgivet. Sådanne systemer svæver frit rundt som balloner i vores begrebsverden. Astrologi lever for eksempel i bedste velgående i store kredse, men har så godt som ingen reduktiv kontakt med noget videnskabeligt begrebsniveau, for eksempel astronomien eller astrofysikken. Noget lignende gælder for alkymi og krystalmagi.

Naturvidenskabens begrebsniveauer afspejles i fagopdelingen på universiterne. Denne opdeling er nemlig ikke bare en vedtægt, men i høj grad dikteret af de naturligt forekommende objekter, der er centrale for hvert niveau og dermed hvert fag. Separationen mellem forskningsområderne kan være helt selvfølgelig og skyldes objekternes størrelse eller kræfternes rækkevidde, som det for eksempel gælder for atomfysik og kernefysik, men i andre tilfælde, som for eksempel mellem atomfysik og kemi, hvor der ikke er så stor forskel på objekternes størrelse eller kræfternes natur, kan separationen til tider virke anstrengt.

Niveauerne er heller ikke bare stakket oven på hinanden, men danner et forgrenet hierarki. Dette hierarki antyder ikke, at nogle videnskaber er 'bedre' end andre (og fysikken 'bedst'), men er snarere en sammenfatning af den begrebsmæssige familiestruktur i naturvidenskaben. I rigtige familier er forældrene vel heller ikke 'bedre' end børnene eller børnebørnene, men forekommer blot længere tilbage i slægtens træ.

Mellem orden og kaos

I den nordiske mytologi befinder mennesket sig i Midgård, klemt mellem gudernes ordnede verden i Asgård og jætternes kaos i Udgård. I de senere år er det blevet klarere, at komplekse systemer og kompleksitet typisk opstår netop i grænselandet mellem orden og kaos [1]. I dette grænseland findes der langlivede transiente — i modsætning til stationære — processer, der kan føre til opbygning af ny kompleksitet; transienter, der aldrig helt dør ud, men stadig udvikler nye former. Jo tættere man kommer på det kritiske punkt, hvor overgangen sker, desto rigere bliver de strukturer, der kan dannes.

Opbygning af kompleksitet tager tid. Her på Jorden har livet brugt tæt ved fire milliarder år om at nå til det stade, det er på nu. Næsten alle naturlige komplekse systemer har gennemgået en langvarig evolution (med noget forskellige tidsskalaer). Det gælder for universet som helhed, for livets basale processer, for dyrenes centralnervesystemer, for samfundsstrukturen, for forskningen, teknologien og lovgivningen.

Tendensen mod større organisatorisk kompleksitet i naturens fænomener er ret forbløffende, men kan have en ganske naturlig forklaring[4]. Der findes matematiske modeller for fysiske systemer, som af sig selv søger hen mod det kritiske punkt mellem orden og kaos. Det er muligt, at kompleksiteten i både livets udvikling og i hjernens processer kan føres tilbage til en sådan selvorganiseret kritikalitet [3].

Organisation og diversitet

For evolutionære systemer drejer det sig formodentlig om en overgang mellem på den ene side organisation og på den anden side diversitet [1]. For megen organisation fører til stive og følsomme organismer uden evne til at udvikle sig i takt med omgivelserne. For stor diversitet fører på den anden side til kaotisk mangfoldighed, der også forringer organismernes evne til videreføre de egenskaber, der er nødvendige for at overleve. På overgangen mellem organisation og diversitet vil organismerne netop være i stand til at bevare en stor del af deres indre orden, medens de inkorporerer fornyelserne [2]. Det er muligvis ressourcernes knaphed, som har været en betingelse for livet i næsten hele dets udviklingshistorie, der fordrer en balance mellem konservativ bevarelse af den gamle orden og liberal åbenhed overfor kreativ, men kaotisk, fornyelse.

Dette er stadig blot teori, og det er endnu ikke kendt, hvilke mekanismer, der kan drive evolutionen hen mod denne overgangstilstand. Det er alligevel fristende at benytte sådanne systembetragtninger på forskningens udvikling. Der er ingen tvivl om, at grundforskningen er et globalt evolutionært system med mange lighedspunkter med de levende væseners udvikling. Det, der gives videre til eftertiden er ikke gener, men ideer (memer), og der forekommer en stadig konkurrence på overle-

[4] I Jens Martin Knudsens kapitel i denne bog er det nærmere beskrevet, hvordan man kan forestille sig, at livets kompleksitet er en naturlig og uundgåelig konsekvens af stjernedannelse.

velse mellem disse ideer, som bæres frem af forskerne. Især i dette århundrede har grundforskningen gennemløbet en overordentlig frugtbar udvikling, selv i tider med begrænsede ressourcer.

Om denne udvikling har bevæget sig hen mod et kritisk punkt mellem organisation og diversitet, skal jeg ikke forsøge at demonstrere. Grundforskningens traditionelle frihed til at vælge sin egen retning kan imidlertid ses som et udtryk for, at den er evolutionær, snarere end planstyret. Forskernes aversion mod politiske indgreb i denne frihed kan have sit udspring i en — for det meste latent — forståelse af forskningens evolutionære karakter.

Hvis det er tilfældet, kan man med rette frygte, at et krav om øget 'relevans' af forskningen ikke vil føre til bedre forskning, men til isoleret nichedannelse. Man kan frygte, at grundforskningen vil blive drejet ind i en retning med større teknologisk specialisering, større organisation, og deraf følgende mindre evne til at absorbere nye og tilsyneladende unyttige ideer. Sagt på en anden måde: nye tøvende vilde, men på langt sigt frugtbare, ideer vil have sværere ved at trænge ind i et forskermiljø, hvor det er relevansens benede bundlinie, der tæller.

Forskningsfrihed er simpelthen uforenelig med moderne styringsmetoder og hierarkisk kontrol. Som fysikeren Poul Olesen har påpeget, kunne et relevanskrav til Maxwell have tvunget ham til at forbedre olielampeteknologien i stedet for at udforske grundlaget for elektromagnetismen!

Endnu mere betænkeligt bliver det, hvis der bliver bygget et udvælgelseskriterium ind, som konkret belønner de forskere, der anses for at yde mest relevant forskning. Her kan man direkte sammenligne med udvælgelsen af avlsdyr i landbruget. Denne udvælgelse af specielle dyr og samtidige fravælgelse af naturlige varianter fører uden tvivl til ensartede højtydende kreaturer, som til gengæld er så sarte, at de ikke har en chance i naturen. Hvor skulle et svin af dansk landrace dog gå hen og få sit daglige skud penicillin fra ude i naturen? Hvad skal en forsker, der aldrig har haft frihed til at skifte emne, gøre, når den globale udvikling går i en ny retning?

Det er ikke kampen om de knappe ressourcer, som står i vejen for en kreativ evolution. Denne kamp findes i enhver sammenhæng, hvor der optræder evolution, og er måske hoveddrivkraften bag evolutionen. Det er de specielle foranstaltninger, der sigter mod at forøge den målrettede produktivitet, der er problemet, fordi den reducerer den naturlige diversitet. Dette er ganske analogt med gensplejsede bakterier, der for det meste er så splejsede i den gængse forstand, at de prompte går til grunde, hvis de slipper ud i naturen! Beskyttede og overforsynede nicher skabt af kortsynede politiske betragtninger om forskningsrelevans, vil give grobund for specielle typer 'mem-splejsede' forskere, som godt nok yder det, der forventes, og derfor opfylder de opstillede betingelser for at få bevillinger, men måske til gengæld har mistet evnen til at finde helt nye veje.

Fysikimperialisme

Anvendelse af fysikkens metoder uden for dens egentlige domæne bliver ofte mødt med indædt modstand. Fysikerne bliver beskyldt for at være imperialister, der prøver at underlægge sig andre discipliner. Desuden kommer de med deres naive metoder og blander sig i fagområder, der er langt mere komplicerede end deres egen fysik. Deres primitive matematiske modelbyggeri er en fornærmelse mod den virkelige naturs righoldighed.

Historisk må man dog medgive, at nogle af de største fremskridt inden for naturvidenskaberne i dette århundrede har haft deres udspring i fysikken. Bohr's atommodel lagde grunden til en helt ny forståelse af kemien, specielt oprindelsen til det periodiske system. Eddington's måling af lysets afbøjning omkring Solen, Hubbles lov for galaksernes himmelflugt og kernefysikkens forklaring på stjernernes energiproduktion slog benene væk under den traditionelle astronomi. Endelig blev biologien revolutioneret af Crick og Watson's simple model for DNA-strukturen.

Der er således godt belæg for at tro, at de videnskabelige metoder, der er udviklede i fysikken, kan have gyldighed langt ud over dens grænser. Det er endnu for tidligt at hævde, om fysikkens indtog på hjerneforskningens arena vil være en revolution eller et flop, men det er et faktum, at der i dag er langt flere fysikere involveret med forskning i hjernen end for blot ti år siden. I det følgende vil jeg forsøge at give to eksempler på brug af fysik i hjerneforskningen. Det første er relativt uskyldigt og drejer sig om anvendelse af fundamental fysik i konstruktionen af de moderne skannere. Det andet eksempel er en smule mere odiøst, fordi det i sin arroganteste form er et forsøg på at forklare mekanikken bag tankeprocesserne.

Hjernen — verdens mest komplekse objekt

I de senere år har forskningen bevæget sig længere væk fra de rene matematiske modeller og begyndt at se på kompleksiteten i naturens mest komplekse objekt, hjernen, eller rettere centralnervesystemet, hvoraf hjernen jo blot er en del. Moderne elektronik og skannere kombineret med computere har givet helt nye indblik i hjernens anatomi og funktion.

Nogle tal kan illustrere menneskehjernens kompleksitet. Den består af 100 milliarder nerveceller (og endnu flere celler af andre typer), som hver er forbundet med andre nerveceller gennem måske 10 tusinde forbindelser, alt i alt op mod en million milliarder nervetråde. Den samlede længde af forbindelserne i dette netværk kan vurderes til en million kilometer, sammenlignelig med længden af Apollo 13's tur omkring Månen eller 25 gange rundt om Jorden. På grund af den store forgrening kan man alligevel i gennemsnit nå fra den ene ende af hjernen til den anden i omkring fire trin fra celle til celle.

Signalerne løber i nervetrådene med op til 100 meter per sekund, eller omkring 360 km i timen, hvilket er tre millioner gange langsommere end elektroniske signaler. Det ville faktisk tage et enkelt nervesignal adskillige måneder serielt at gennemløbe alle forbindelser i hjernen. Alligevel slår hjernen de elektroniske computere på næsten alle fronter, fordi nervecellerne arbejder i parallel. Jeg anslår, at det kræver mere end en million af de allerhurtigste supercomputere for at simulere en menneskehjerne i realtid.

Hjernen kan som ethvert komplekst system anskues på mere end et niveau.

På det øverste — makroskopiske — niveau finder vi psykologien, der handler om de mentale fænomener og deres vekselvirkning med hinanden, kroppen og omverdenen. Der mangler her en definition af, hvad et mentalt fænomen er[5]. Dette begreb er faktisk ikke så let at præcisere, og der har tidligere været behavioristiske skoler, som simpelthen benægtede eksistensen af mentale fænomener og processer. Dette radikale standpunkt er nu for det meste forladt til fordel for teorier for psyken, der opererer med sådanne begreber. Der er dog stadig nogle, som mener, at bevidstheden er en ren konstruktion uden hold i virkeligheden.

På det nederste — mikroskopiske — niveau finder vi neurovidenskaben, som udforsker nervecellernes funktion og vekselvirkning med hinanden. Der ingen diskussion om eksistensen af nerveceller, men til gengæld er der stor afstand mellem nervecellernes forholdsvis enkle opførsel og psykens kompleksitet. Det kan diskuteres, om det underliggende biokemiske niveau i virkeligheden skulle betragtes som det nederste med relevans for hjerneforskningen, fordi det er på det niveau psykofarmaka påvirker hjernen. En moderne og omstridt teori for bevidstheden opererer også med subneuronale elementer [4].

Det kan være instruktivt i denne sammenhæng at sammenligne med sædvanlige computeres konstruktion. Der indgår en forfærdelig masse naturvidenskab i en chip, men det nederste relevante niveau for diskussionen af, hvad en computer kan, er det grundsprog, chippen programmeres i. De underliggende niveauer er nødvendige for at implementere dette sprog, men ikke for sprogets indhold, og kan trygt ignoreres af brugeren. Det er derfor ikke urimeligt at spørge, om noget lignende kan gøre sig gældende for netværk af nerveceller, men svaret er ikke kendt endnu.

De makroskopiske og mikroskopiske beskrivelsesniveauer for hjernen er på ingen måde blevet bragt i reduktiv forbindelse med hinanden. Den reduktionistiske forestilling er naturligvis, at det mikroskopiske forårsager det makroskopiske, at neurovidenskaben er basis for psykologien og kognitionsforskningen. Men bortset fra hjerneskaders og psykofarmakas empirisk veldokumenterede indvirkning på psyken er der endnu ikke etableret mange reduktionistiske neurale brohoveder i det psykologiske. For de overbeviste reduktionister er målet klart: det drejer sig om at forstå 'mekanikken' i hjernen og gennem den psyken.

Niveauer i hjernen

Mellem det mikroskopiske og makroskopiske ligger der formentlig en række endnu ukendte niveauer. Nogle af disse niveauer kan dog allerede anes. Den følgende liste giver mit private bud på, hvad de kunne indeholde.

[5]Se også Rasmus Fog's kapitel i denne bog.

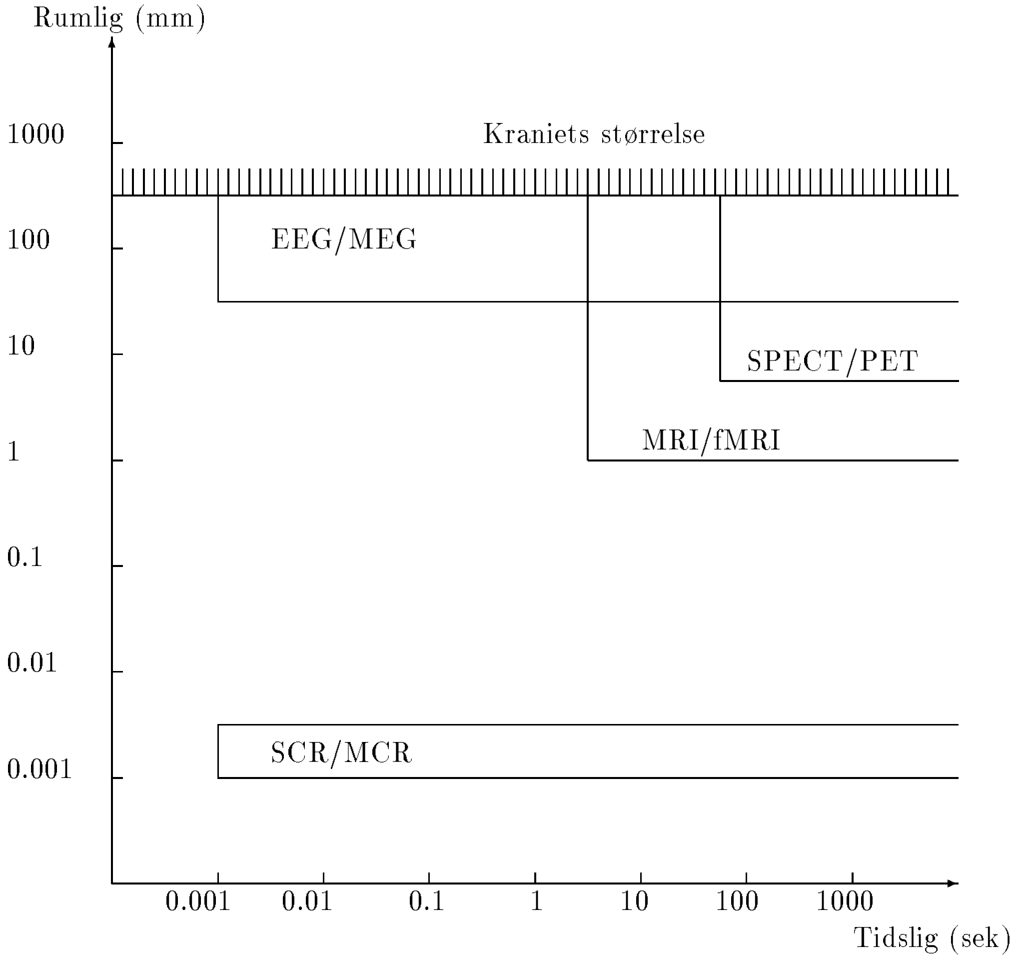
Lige over det traditionelle neurovidenskabelige niveau med nerveceller som de centrale objekter, ligger et niveau, som vi i mangel af bedre betegnelse kan kalde det "computologiske". På dette niveau studeres, hvorledes mindre netværk af nerveceller spiller sammen for at udføre de beregninger, som i hjernen bruges til at analysere elementer af sanseindtryk eller styre elementære bevægelser. Det er dette niveau, der har inspireret de kunstige neurale netværk.

Disse temmelig mekaniske beregningsprocesser er imidlertid ikke hele historien. Der er stadig lang vej til psykologien. Det næste stadium lige over det computologiske kunne være et niveau, hvor nervecellernes individualitet blev underordnet kollektivet, og hvor ermergente fænomener — tankestumper — ville danne basis for en beskrivelse. Læren om dette niveau kan vi kalde "emergologi", og man kunne håbe på, at der her kunne findes en beskrivelse af hjerneprocesserne, hvor kontinuitet er af afgørende betydning, ligesom det er tilfældet for de fleste faste eller flydende stoffer.

De moderne instrumenter, der som omtalt nedenfor benyttes til at iagttage den levende, tænkende hjerne, antyder, at der kan eksistere et makroskopisk beskrivelsesniveau, der ligger under det psykologiske, men over de mikroskopiske niveauer. I skanbilleder af hjernefunktionen ses en række "blobs", altså klatter, der groft set angiver, hvor der er makroskopisk neural aktivitet. Det er et helt åbent spørgsmål, om disse klatter kan danne basis for en selvkonsistent makroskopisk beskrivelse af hjerneprocesserne, en "blobologi", og om det er muligt at nedskrive dynamiske bevægelsesligninger for deres tidslige opførsel. Det er ikke utænkeligt, at den halvmikroskopiske beskrivelse, som vi betegnede emergologi, kunne have stærkt overlap med den blobologiske, men på nuværende tidspunkt er disse spørgsmål slet ikke afklarede. I dag består blobologien næsten kun af statiske billeder af aktiviteten under repetitive handlinger som for eksempel bevægelse af en enkelt finger, men der er ingen tvivl om, at den kommende udvikling vil bevæge sig ind i det tidslige domæne og derved åbne op for en dynamisk blobologi.

Hjernens moderne instrumentpark

Indtil for relativt få år siden var hjernelæsioner, hjerneblødninger og blodpropper den eneste vej til at forstå, hvad der foregik i forskellige områder af hjernen. Hvis et stykke af hjernen blev destrueret af en geværkugle, en blødning eller iltmangel på grund af en blodprop, så kunne man notere sig, hvilke funktioner, der herved faldt ud. Kombineret med anatomisk viden og teoretiske ideer opbyggedes langsomt en ret detaljeret viden om hjernens funktionelle indretning. Operative indgreb mod for eksempel hjernesvulster gav tilsvarende viden, og et særligt mørkt kapitel i hjerneforskningens historie handler om anvendelse af lobotomi, "det hvide snit", til dæmpning af voldsomme symptomer på sindssygdom. Under hjerneoperationer, hvor patienten sommetider er ved bevidsthed, kan man også påvirke hjernen med elektriske spændinger og gennem kroppens reaktioner eller patientens beskrivelse af hjerneoperationer opnå ret detaljeret viden om fordelingen af funktioner hen over hjerneoverfladen.



Figur 1: *Moderne instrumenters opløsningsevne i tid (horisontale akse) og rum (vertikale akse). Forkortelserne betyder: EEG — electroencephalography, MEG — magnetoencephalography, SPECT — single photon emission computed tomography, PET — positron emission tomography, MRI — magnetic resonance imaging, fMRI — functional MRI, SCR — single cell recording, og MCR — multiple cell recordings. Bemærk det store rumlige gab mellem de mikroskopiske og makroskopiske instrumenter. Det falder netop der, hvor man allerhelst ville kunne registrere hjernens aktivitet.*

Moderne enkeltcellemålinger ved hjælp af elektroder (SCR), der føres ind i hjernen, er beslægtet med disse metoder. Denne grove invasion af hjernen bevirker, at sådanne eksperimenter næsten udelukkende foretages på dyr, der efter tilstrækkelig lang brug går til grunde på grund af ophobede skader. Selv om medicinstuderende er villige til at tage del i mange eksperimenter, er de dog lidt tøvende over for at få lukket kraniet op! Det er også muligt at benytte flere samtidige elektroder (MCR) og derved få ideer om korrelation og synkronicitet mellem hjernecellers reaktioner på stimuli. Tidsopløsningen er den bedst tænkelige, fordi tid kan måles med en præcision, der langt overstiger det, der kræves for at udforske hjernen, nemlig blot omkring et millisekund. Derimod har disse metoder kun meget ringe rumlig opløsning, fordi man kun får fat i celler enkeltvis og ikke kan integrere mange signaler sammen til et udstrakt billede.

Den moderne fysik og fysikbaserede teknologi har ført til en række specielle maskiner, som tillader at undersøge den levende tænkende hjerne under minimal påvirkning. Det karakteristiske ved alle disse maskiner er, at de for det meste er baseret på enkle fysiske begreber. De er næsten udelukkende fysikmaskiner. Nedenfor vil principperne bag hovedtyperne af disse maskiner blive beskrevet.

I Fig. 1 vises opløsningsevnen i tid og rum for de forskellige metoder, altså hvor små detaljer, der kan iagttages. Det fremgår tydeligt, at der er et gab i den rumlige opløsningsevne fra nogle mikrometer til nogle millimeter. Desværre forekommer de mest interessante neurale processer netop i dette gab, hvor integrationen af mange cellers aktivitet til et kollektivt hele finder sted. Det er her tanker opstår gennem myriader af nervecellers samarbejde.

EEG — Electro-encephalography

Signalerne i nervebanerne er elektrokemiske, altså kemiske processer med elektriske effekter. De fleste af de elektriske signaler er mikroskopiske og inkohærente og giver derfor ikke anledning til makroskopiske signaler uden for hovedet. Men der findes også kohærente processer i hjernen, som giver elektriske signaler udenfor, der kan opfanges af elektroder anbragt på kraniets overflade. I dag benyttes der op til 128 elektroder, og det gør det muligt at rekonstruere et billede af de elektriske aktiviteter inden i hovedet. Metoden er helt uskadelig, men behæftet med stor usikkerhed, fordi hovedet og hjernen udgør et både ledende og polariserbart medium. De elektriske signaler bliver stærkt deformeret på vej ud af hjernen, og en præcis rekonstruktion kræver en detaljeret model for det aktuelle hoved. Den rumlige opløsningsevne er ringe, medens den tidslige er så god, som man kan ønske. I den nyeste tid er man begyndt at kombinere EEG med PET billeder for at få et bedre udgangspunkt for rekonstruktionen af EEG signalet.

MEG — Magneto-encephalography

De makroskopiske elektriske strømme i hjernen giver også anledning til magnetiske felter, der kan detekteres udenpå. I modsætning til det elektriske tilfælde er hovedet så lidt magnetiserbart, at de magnetiske felter slet ikke ændres af hjernen, kraniet eller det øvrige væv. Når de måles udenpå, er de helt fri for forstyrrelser af denne karakter. Problemet er imidlertid, at de typiske magnetfelter er milliarder af gange svagere end Jordens magnetiske felt og også langt svagere end tilfældige magnetiske forstyrrelser fra det utal af elektromagnetiske apparater, som omgiver os. De små felter kan kun måles ved hjælp af superledende kvanteinterferens detektorer (SQUID). Heldigvis kan disse detektorer konfigureres, så de kun måler lokale rumlige variationer i magnetfeltet, og det er derfor muligt at bruge dem i et normalt hospitalsmiljø uden særlig magnetisk afskærmning. Det er i dag muligt at bruge op mod 64 detektorer samtidig, og som ved EEG kan de samtidige signaler kombineres til et rekonstrueret billede af de strømme, der fremkalder magnetismen. Den rumlige opløsningsevne er lige så ringe som for EEG og den tidslige lige så god.

PET — Positron Emission Tomography

Elektronen har en antipartikel, som kaldes positronen. Den er identisk med elektronen i næsten alle egenskaber, blot har den positiv ladning i stedet for elektronens negative. Når en positron støder sammen med en elektron, vil begge partikler tilintetgøres, og i stedet opstår to hårde lyskvanter, gamma-stråler. Når hastigheden er lav i sammenstødet, vil gamma'erne forlade sammenstødspunktet i diametralt modsatte retninger. Når deres retning så senere observeres, hvilket ikke er teknisk svært, så kan man bestemme retningen af den rette linie, hvorpå sammenstødet skete.

Dette er fysikken bag de moderne PET-skannere. Ved hjælp af en cyklotron kan man fremstille radioaktive isotoper, for eksempel ilt, der aktivt udsender positroner. Ilten kan bindes i vand og indsprøjtes i blodbanen, hvor den kort tid efter ankommer i hjernen. Ved at iagttage gamma-kvanterne kan man bestemme et meget stort antal retninger til steder, hvor positroner har ramt elektroner, og ved hjælp af computere kan man rekonstruere et tre-dimensionalt billede af positron-aktiviteten i hjernen.

Den fysiologiske side af PET-skanninger er mere speget. Erfaringsmæssigt vides det, at når en større gruppe nerveceller i hjernen aktiveres, for eksempel til at styre en håndbevægelse, så sker der nogle sekunder senere en udvidelse af blodkarrene omkring disse celler. Derfor vil positron-aktiviteten blive forstærket i det pågældende område. Hvis man nu fratrækker et billede af hjernen, der er optaget, når hånden ikke bevæges, så skulle det område, der styrer bevægelsen, træde frem. Der fremkommer et 'blob' af aktivitet, der kan gives en anden farve på billedet.

Ved PET-skanninger kan man altså ikke direkte se cellernes aktivitet, men kun det relativt langsomme sekundære respons i blodgennemstrømningen. Det er ikke fysiologisk klart, hvad mekanismerne er bag karudvidelserne. Denne indirekte observation af nerveaktiviteten forringer den rumlige opløsning, og en yderligere forringelse kommer fra, at positronerne bevæger sig et et par millimeter før de taber hastigheden og indfanger en elektron. Alligevel regner man i dag med rumlige opløsninger på under en centimeter. Den tidslige opløsning er i alt væsentligt bestemt af henfaldstiden for den positron-aktive isotop, som for ilts vedkommende er på omkring 90 sekunder. Hurtigere henfaldende isotoper ville kunne forbedre den meget.

MRI — Magnetic Resonance Imaging

Den menneskelige krop består af atomer. Størstedelen af atomerne består af elektroner, der danner en sky omkring de utroligt små atomkerner. Disse kerner spiller så godt som ingen rolle for os i vores liv, bortset fra at de er årsagen til, at vi vejer så meget. Det vi føler og ser som os selv (og andet stof) er disse elektronskyer, som samlet udgør mindre end en halv promille af legemsvægten, nemlig omkring 30 gram. Resten af vægten ligger i kernerne. Et atom består hovedsageligt af en æterisk sky af elektroner med en lillebitte, hårdt pumpet kerne i centrum. Kernernes samlede volumen i et menneske er faktisk ikke større end en bakterie. Det meste af et menneske udgøres altså af "tomrummet" mellem atomkernerne og elektronskyerne.

I MRI manipulerer man de ellers så betydningsløse atomkerner. De fleste atomkerner er magnetiske ligesom små stangmagneter. Det gælder også for den simpleste atomkerne, brintkernen, som kun består af en enkelt partikel, en proton. I et vandmolekyle indgår som bekendt to brintatomer, hvis kerner er sådanne protoner. I et kraftigt ensrettet magnetfelt vil de små magneter ret hurtigt rette sig ind efter feltet, for eksempel på langs ad kroppen. Ved at overlejre dette homogene magnetfelt med en lille inhomogent korrektionsfelt og ved påtrykke et svingende elektromagnetisk felt i radiofrekvensområdet kan det lade sig gøre at dreje en udvalgt gruppe af kernemagneterne væk fra feltretningen.

De drejede kernemagneter begynder da at rotere i takt omkring feltets retning, men taktfastheden kan ikke vedligeholdes på grund af små uregelmæssigheder i hjernens stof. Den fælles takt i rotationen — kohærensen — går derfor langsomt i opløsning. Samtidig retter kernemagneterne sig langsomt ind i retning af det homogene felt. Begge disse processer kan følges ved hjælp af en passende antenne, og man kan måle de karakteristiske tider for opløsningen af kohærensen. Ved som før at overlejre med en (anden) inhomogen korrektion til feltet og ved omhyggeligt at vælge den frekvens, der lyttes på i antennen, kan man selektivt udvælge rumligt afgrænsede grupper af roterende kernemagneter og derved få et rumligt billede af, hvor mange der er, og hvorledes opløsningstiden for kohærensen varierer hen over hjernen.

Ved omhyggelig programmering af de magnetiske korrektionsfelter og de radiofrekvente elektromagnetiske impulser er det muligt at optage en række forskellige billeder af hjernen, som ikke bare viser tæthedsvariationer og kohærenstider for kernemagneterne. Der kan også dannes billeder af vandets strømning og diffusion i hjernen (og andre organer, for eksempel hjertet), hvilket kan være af stor diagnostisk betydning.

I de seneste år er det lykkedes at iagttage de små magnetiske variationer, som følger af blodets iltning. Når blodkarrene udvider sig på grund af neural aktivitet, vil der strømme mere iltet blod til end nødvendigt for aktiviteten, og det vil derfor ændre de magnetiske egenskaber af vævet. Variationen drejer sig blot om nogle få procent, men det er muligt at afbilde den ved hjælp af de omtalte metoder. Denne teknik kaldes funktionel magnetisk resonans billeddannelse (fMRI), og er blevet en stærk konkurrent til PET metoden i udforskningen af hjernens makroskopiske funktioner.

Fordelen ved MRI og fMRI er den ikke-invasive natur af disse metoder. Der skal ikke som i PET indsprøjtes radioaktive stoffer i kroppen med alt, hvad det indebærer af bekymringer over dosis og langtidsvirkning. Der er, såvidt det vides, ingen fysiologiske effekter af at ligge i en lang magnetspole eller blive udsat for svage radiofrekvensfelter. Derimod kan man godt få klaustrofobi. Både rumlig og tidslig opløsningsevne er bedre end for PET, og de mange muligheder for at studere specielle effekter vil formodentlig føre til, at MRI erstatter PET inden for nogle få år.

Modeller for det makroskopiske niveau

De nye fysikbaserede skannere er ikke særlig komplekse sammenlignet med den hjerne, de bruges til at udforske. Næsten dagligt hører vi om nye opdagelser, for eksempel et center for sproglig mening, for farvesyn eller formsyn, ja endda for psykologiske funktioner som bevidsthed eller intelligens. Alle disse smukke farvebilleder giver bestemt indsigt i hjernen og dens funktionnelle anatomi, men man kan med rette spørge, om dette 'blobologiske' beskrivelsesniveau reelt giver os indsigt i hjernens egentlige funktion, eller om beskrivelsen faktisk er for grovkornet til at lære noget om hjernens enorme funktionelle kompleksitet.

Som fysiker kunne man håbe på, at der kunne findes en makroskopisk dynamisk model, hvor de basale variable er de klatter, der observeres. For at finde og udforske en sådan model vil det især være nødvendigt at forbedre den tidslige opløsning af skannerne, og her er MRI nok det mest lovende bud på en teknik. Med en sådan model ville det være muligt at begynde en egentlig reduktion af det psykologiske beskrivelsesniveau til et underliggende niveau, men det bliver måske ved drømmen. Det er på ingen måde givet, at en rigtig 'blobologi' kan etableres. Tværtimod er der mange, som mener, at de mikroskopiske og makroskopiske niveauer i hjernen er så dybt viklet ind i hinanden, at det umuliggør en reduktion af psykologien til lavere niveauer. Kun tiden og eksperimenterne vil vise, om 'blobologi' kan føre til et egentligt dynamisk beskrivelsesniveau.

Modeller for det mikroskopiske niveau

Helt anderledes stiller situationen sig for det mikroskopiske 'computologiske' niveau, som drejer sig om primitive beregningsfunktioner i centralnervesystemet. I det sidste tiår er der sket en rivende udvikling i forståelsen af neural beregning i netværk af modelnerveceller.

Kunstige neurale netværk udgør mindst to forskellige forskningsområder. I det ene forsøges det at opbygge kunstige netværk, der er forbundet på samme måde som de virkelige neurale netværk i simple organismer. Der er opnået en del resultater i denne retning (se for eksempel [6]), selv om de kunstige netværk, der anvendes, er meget forsimplede udgaver af de naturlige. Der foregår også en hel del forskning i kunstige neurale netværk som modeller for sygdomstilstande, for eksempel Alzheimers sygdom.

Det er stadig uafklaret, hvor mange detaljer det er nødvendigt at simulere for at opnå en troværdig repræsentation af et naturligt neuralt netværk. Det kunne som tidligere nævnt være nok blot at abstrahere de egenskaber, der er væsentligst for beregningen i netværkene. Hvis man vil forstå skelettets betydning for kroppens bevægelseskapacitet, er det heller ikke nødvendigt at gå dybt ind i knoglernes fysiologi, men man kan nøjes med at abstrahere de mekaniske egenskaber som elasticitet og brudgrænse.

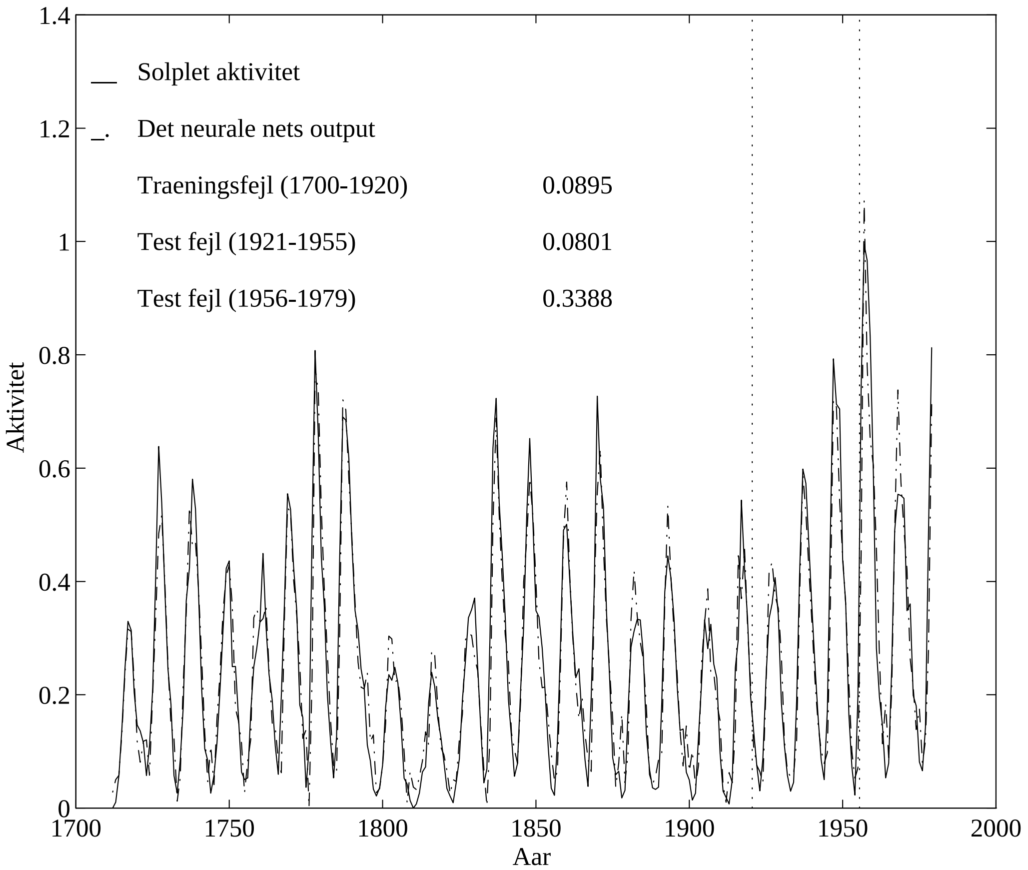
De fleste kunstige neurale netværk bliver i dag simuleret i sædvanlige computere. Det har uden megen succes været forsøgt at markedsføre egentlige neurocomputere, hvor elektriske strømme udgør de kunstige nervesignaler, men udviklingen af den digitale computer har hele tiden været så hurtig, at simuleringerne overhaler neurocomputerne indenom.

I det andet forskningsområde for kunstige neurale netværk er man til gengæld ret ligeglad med forbindelsen til de naturlige netværk og studerer blot de kunstige neurale netværk som en alternativ måde at udføre beregninger på. De er simpelthen en computerteknik, der er velegnet i visse sammenhænge, hvor sædvanlig programmering bliver besværlig eller helt kommer til kort. Det drejer sig især om problemer, hvor mønstergenkendelse er af betydning. Der er udviklet et omfattende teoretisk apparat og skrevet mange lærebøger om emnet (se for eksempel [7]). Blandt anvendelserne kan nævnes talegenkendelse, optisk læsning af karakterer, automatisk styring af køretøjer, klassifikation af radarbilleder, medicinsk diagnose, og mange andre. Blandt specielle danske anvendelser kan nævnes kvalitetskontrol af slagtesvin, diagnose af hudkræft og grøn stær og fortolkning af hjerneskanbilleder.

Forudsigelse af pletter på Solen

Som et eksempel på en typisk anvendelse af et kunstigt neuralt netværk til mønstergenkendelse skal vi se på forekomsten af solpletter. At der forekommer pletter på Solen har været kendt i mere end 2000 år, men det er først i de senere år, man overhovedet har opnået en forståelse af deres natur og sammenhæng med Solens indre dynamik (se for eksempel [8]). Solpletterne fremkommer i et samspil mellem konvektionsstrømme i Solens gasser, Solens magnetfelt, og det faktum, at den roterer med forskellig hastighed på forskellige breddegrader, og kan i en vis forstand betragtes som et udslag af vejret på Solens overflade. Solpletterne er et par tusinde grader koldere end de omgivende områder og er forbundet med magnetfelter, som træder ind eller ud af Solen.

Allerede siden 1801 har det været kendt, at der er en sammenhæng, korrelation, mellem klimaet på Jorden og solpletforekomsten (se for eksempel [9]). Når der er få solpletter, er der tendens til køligere klima med vådere somre i Vesteuropa. Solpletforekomsten varierer med en cyklus på omkring 11 år og vil igen nå et minimum i 1997. I fig. 2 ses et plot af solpletforekomsten siden slutningen af det berømte Maunder minimum, også kaldet den lille istid. Den 11-årige periode er meget fremtrædende, men toppenes højder ser ikke ud til at have meget system i sig. Denne tidsserie af solpletforekomster er derfor et yndet eksempel til afprøvning af nye metoder til forudsigelse af mere eller mindre kaotiske tidsserier, hvilket er en vigtig problemstilling i praksis. Tænk for eksempel på dollarkursen, der også ser uforudsigelig ud.

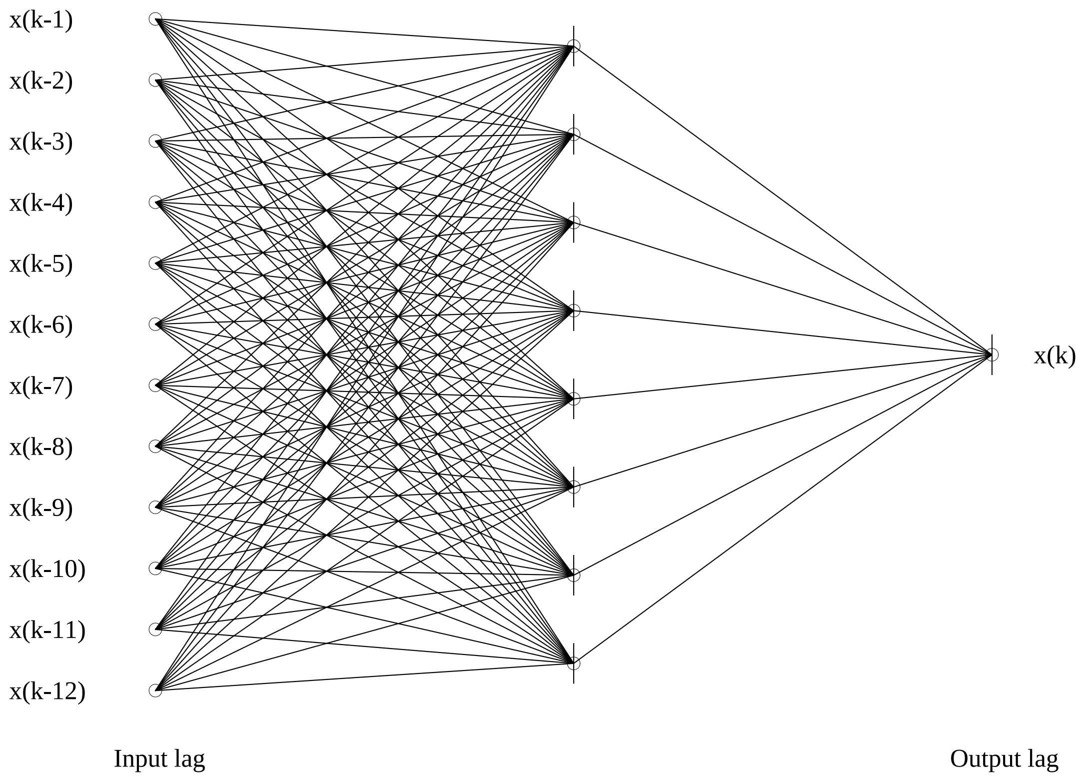


Figur 2: *Forekomst af solpletter fra 1700 til 1979. Den 11-årige periode ses tydeligt, men det er vanskeligt at finde system i toppenes højde. Det kunstige neurale netværks forudsigelse er også indtegnet, men falder næsten lige oven i den målte forekomst. Fejlens størrelse er ikke angivet i de samme enheder som aktiviteten.*

Kan vi kommunikere med et neuralt netværk om, hvad dollarkursen vil blive næste år? Eller i 2004? Kan netværket hjælpe os med at forstå, om Jordens klimavariationer er bestemt af den samme mekanisme, som bestemmer solpletforekomsten? Er det den slags spørgsmål, neurale netværk kan anvendes til at besvare? Her vil vi nu koncentrere os om solpletforekomsten, fordi den er en god illustration af både styrken og svagheden i de kunstige neurale netværk.

Det neurale netværk

I fig. 3 ses det benyttede netværk. Netværkets opgave er at forudsige årets solpletforekomst, der produceres af den kunstige neuron yderst i højre side af tegningen, når det som input i venstre side af tegningen får den faktiske solpletforekomst i de 12 forudgående år. Netværket virker altså som en lille maskine, der transformerer det talmæssige input i venstre side til et talmæssigt output i højre side. Imellem input og output ligger 8 såkaldte skjulte neuroner, som er forbundet med alle input i venstre

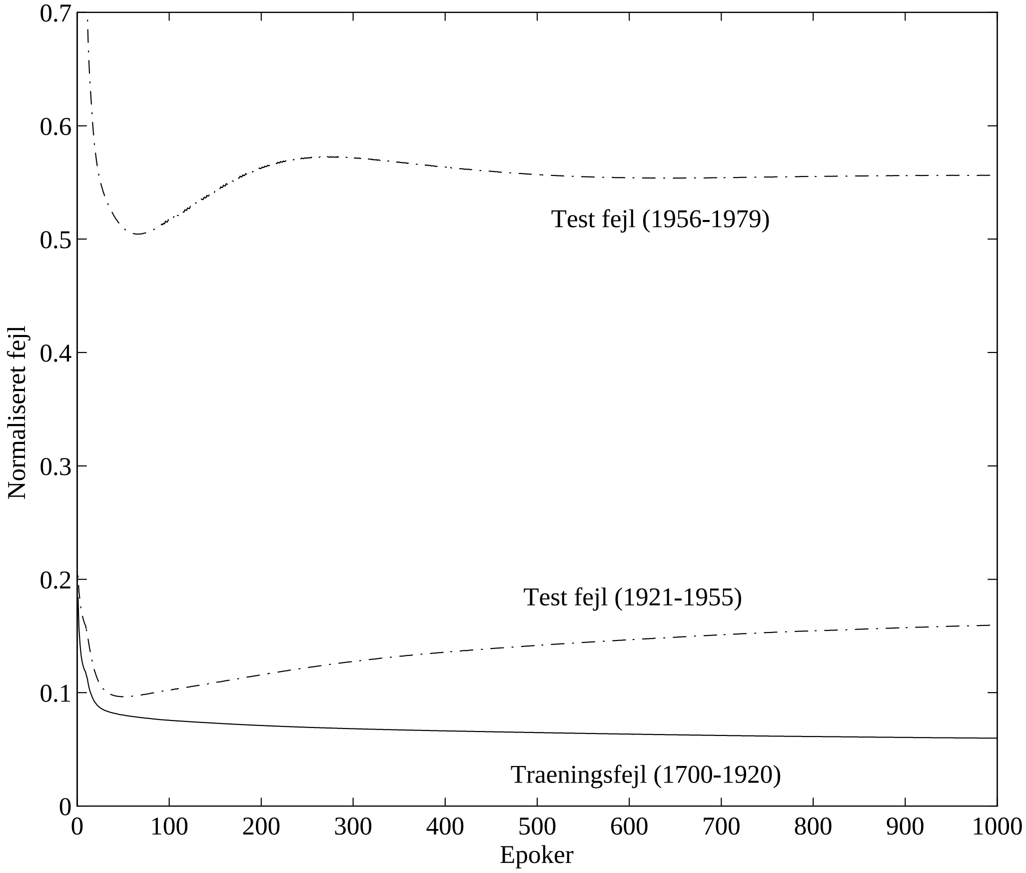


Figur 3: *Det neurale netværk til forudsigelse af solpletforekomsten. På venstre side gives de 12 forudgående års solpletforekomst som input og på højre side giver netværket det næste års som output. I midten er der et sæt skjulte neuroner.*

side og med outputneuronen i højre side. Hver forbindelseslinie er en justerbar parameter, en slags knap der kan drejes, og der er alt i alt 113 ($= 12 \times 8 + 8 \times 1 + 8 + 1$) sådanne parametre (også kaldet vægte) i netværket, fordi de skjulte neuroner og outputneuronen også har en indre tærskelværdi, som vi straks skal omtale.

Det, der sker i netværket, er ganske simpelt. Hver af de 8 skjulte neuroner og outputneuronen virker på samme måde. Ethvert input til en neuron ganges med den vægt, som forbindelsen har, og resultatet adderes op. Dernæst sammenlignes denne vægtede sum med neuronens indre tærskelværdi, og hvis summen er større end tærsklen bliver neuronens eget output positivt, ellers negativt, med en ikke-lineær graduering, der afhænger af, hvor meget over eller under tærsklen den vægtede sum er. Hvert input har derfor kun den indflydelse, som forbindelsens vægt tillader. Hvis vægten er nul, har den ingen indflydelse og forbindelsen kan simpelthen skæres væk (se for eksempel [10]).

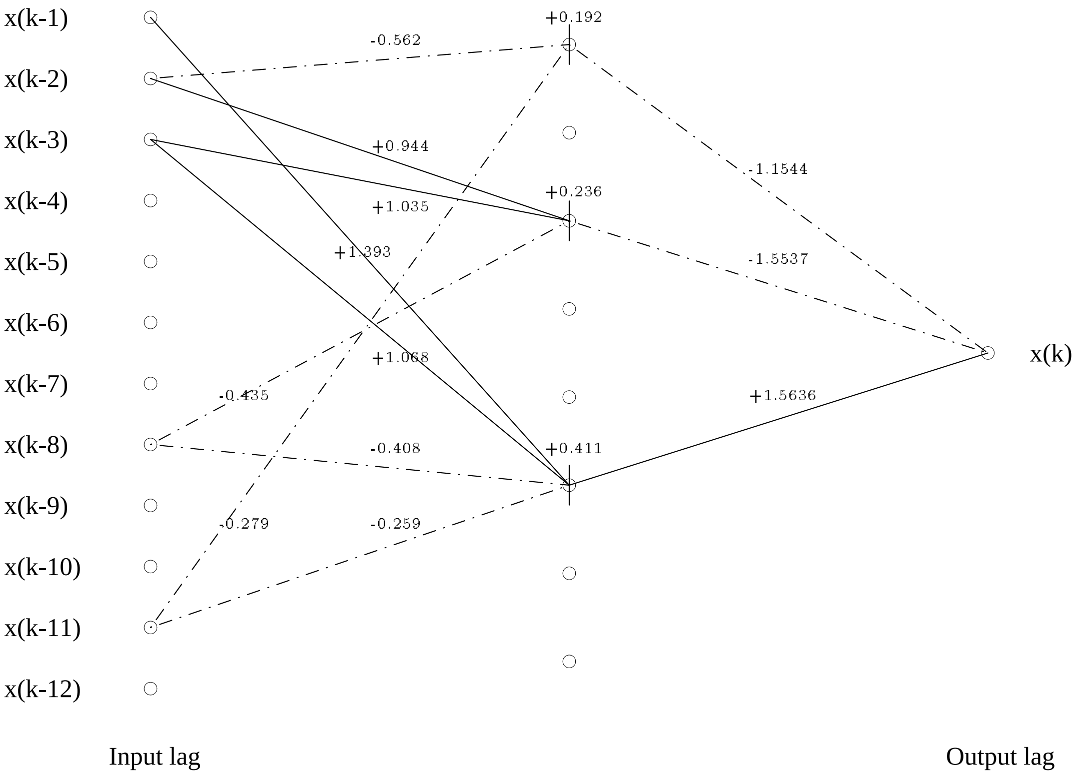
I begyndelsen indstilles vægtene helt tilfældigt. Netværkets forudsigelse er derfor også helt tilfældig og ligner overhovedet ikke det korrekte output. For at indstille vægtene rigtigt benyttes de 221 år fra 1700 til 1920. Nettet gives som input 12 fortløbende år et vilkårligt sted i denne periode og dets opgave er at forudsige det 13. år. Der er i alt 209 sådanne eksempler på en "korrekt forudsigelse" mellem



Figur 4: *Forløbet af fejlen under træningen som funktion af tiden målt i epoker, d.v.s. fulde gennemløb af træningseksemplerne. Bemærk at træningsfejlen (den fuldt optrukne linie) aftager jævnt, medens testfejlene (de stiplede linier) når et minimum, hvorefter fejlen begynder at stige igen.*

1700 og 1920. Hver gang netværket svarer forkert på et af disse eksempler, bliver dets vægte automatisk justeret af netværkssimulatoren, så at det bliver lidt bedre til at svare rigtigt næste gang. Ved igen og igen at præsentere eksemplerne og justere vægtene “trænes” netværket langsomt til at svare helt rigtigt på alle de 209 eksempler. Hver runde af træning med de 209 eksempler kaldes en epoke, og netværket køres igennem hundredevis af sådanne epoker for at “øve sig” på solplettallene. I fig. 4 ses tidsforløbet af fejlen under træningen som den fuldt optrukne kurve, og det er tydeligt, at netværket bliver bedre og bedre.

Netværket kan altså godt lære at gengive de 209 eksempler med en fejl, der aftager mod nul. Det svarer til udenadslæren. For at afgøre, om det virkelig har lært noget, skal netværket til “eksamen”, hvor det testes på eksempler, det aldrig før er blevet præsenteret for. Som det fremgår af fig. 4 er netværket blevet testet på to perioder, henholdsvis fra 1921–55 og 1956–79. Det er helt klart, at netværket er blevet vældig godt trænet til at forudsige den første periode, medens den anden har langt større fejl. På fig. 2 ses det, at der faktisk begynder at optræde en ny



Figur 5: *Det beskårne netværk med de fundne vægte. De fuldt optrukne linier svarer til positive vægte og de stiplede til negative. Bemærk, at der kun er tre aktive skjulte neuroner. Bemærk også netværkets interesse i det 11-te forudgående år, hvilket ikke er så mærkeligt, fordi der er en 11-årig cyklus i solpletforekomsten.*

struktur i diagrammet omkring 1955. Det vides ikke, om det faktisk svarer til en ændring af solpletdynamikken, men netværket fortæller os, at det i hvert fald ikke har set noget lignende før.

Det er også interessant, at netværkets testfejl først ser ud til at nå et minimum for derefter igen at stige, jo længere der trænes. Det der sker her,A er en overtræning, hvorved netværket bliver ekspert på de eksempler, det har set, men til gengæld bliver dårligere til at generalisere. Det kan meget vel have en dyb analogi til den måde, vores egen hjerne lærer på. Indterpning af salmevers har aldrig hjulpet den kreative tænkning! I de seneste år er dette fænomen blevet studeret indgående og er nu fuldstændig klarlagt, i hvert fald for de kunstige neurale netværks vedkommende. Grunden til overtræningen er, at det oprindelige netværk med 113 justerbare vægte har for stor kapacitet og derved bringes til at lære tilfældige småfejl i stedet for at ignorere dem. For at undgå overtræning er det nødvendigt at begrænse kapaciteten, for eksempel ved at beskære netværket.

En af beskæringsmetoderne går under den lidt skøre betegnelse “Optimal Brain Damage”. Den går ud på successivt at fjerne de forbindelser, der har mindst indflydelse på fejlen. Langsomt fjernes flere og flere af vægtene, indtil testfejlen ikke længere vokser under træningen. I dette tilfælde ender man til sidst med et langt simplere netværk med kun 15 vægte. I fig. 5 ses det færdige netværk med slutvægtene og tærskelværdierne. Det giver et klart billede af, hvilke input der er vigtige for resultatet. Netværket lægger i bogstaveligste forstand vægt på tre umiddelbart foregående år, år -8 og år -11. Den sidste vægt er uden tvivl forbundet med den 11-årige solpletcyklus.

Ovenstående netværk er en af de bedste modeller til forudsigelse af solpletforekomsten. Beskæringsmetoden har ikke alene undgået overtræning, men også ført til et netværk, hvor forbindelserne har en vis mening. Dette netværk har lært at gengive en kaotisk tidsserie og udtrykker sin erfaring ved hjælp af 15 parametre.

Der er grund til at tro, at megen tidlig indlæring i hjernen også sker gennem en beskæring af netværkene. Cirka 75% af alle de forbindelser, vi har ved fødslen, går tabt i de første par leveår. Selv om det omtalte netværk er uendelig meget simplere end hjernens netværk, kan det ikke desto mindre pege imod et generelt princip om, at tidlig indlæring sker gennem beskæring af netværkene for derved at opnå bedre generalisationsevne.

Forstår vi overhovedet noget som helst?

Det neurale netværk har altså lært at gengive solpletforekomsten og kan bruges til at forudsige fremtiden, i hvert fald et stykke ad vejen. Men kan det reelt fortælle os noget om, hvad det har lært? Netværkets samlede viden efter træningen udtrykkes gennem vægtene, og dette er tydeligvis en tilstrækkelig mikroskopisk forklaring på, hvorfor det reagerer, som det gør. Enhver kan selv bruge vægtene til at beregne netværkets forudsigelse for det følgende år. Men er det forståelse?

Vi ser her et eksempel på, at et system, netværket, kan reduceres til et underliggende mikroskopisk niveau, vægtene, uden at det bibringer os en egentlig forståelse for den indre logik i det, systemet har lært. Et kunstigt neuralt netværk er simpelthen et fikst klamphuggeri, der løser et praktisk problem uden hensyn til den dybere mening. Det kan være meget nyttigt i praksis, men vi opnår ingen rigtig forståelse for den indre logik i de data, netværket har lært, endsige de processer, der fører til solpletvariationen. For at forstå dette er det nødvendigt at danne egentlige fysiske modeller for Solen [8]. Et neuralt netværk er altid den næstbedste løsning — næst efter en god model!

Mange af vore færdigheder — måske alle — kan have deres oprindelse i lignende neurale klamphuggerier, der ikke besidder et gran af forståelse for den indre natur af de fysiske systemer, vi vekselvirker med. Det er en foruroligende, men også fornøjelig tanke, at vores højt estimerede hjerne i virkeligheden er et gigantisk klamphuggeri, tunet af evolutionen til at udføre de mest sofistikerede opgaver, inklusive forskning i hjernens funktion. Men hvis hjernens netværk ikke forstår et dyt af omverdenen, blot tilpasser sig den, hvor kommer vores bevidste forståelse så fra? Hvordan kan vi overhovedet dyrke videnskab? Hvad betyder det egentlig, at Kleopatras næse er smuk?

Litteraturliste

[1] S. Kauffman: *At home in the universe*, Oxford University Press (1995).

[2] S. Kauffman: *Investigations*, Santa Fe Institute manuskript, Aug. 1996.

[3] P. Bak og K. Chen: *Self-Organized Criticality*, Scientific American, Jan. 1991.

[4] R. Penrose: *Shadows of the Mind*, Oxford University Press (1994).

[5] P. S. Churchland, T. J. Sejnowski: *The Computational Brain*, MIT press (1992).

[6] S. Grillner: *Neural Networks in Vertebrate Locomotion*, Scientific American, Jan. 1996.

[7] C. M. Bishop: *Neural Networks for Pattern Recognition*, Clarendon Press, Oxford (1994).

[8] E. Nesme-Ribes, S. L. Baliunas and D. Sokoloff: *The Stellar Dynamo*, Scientific American, Aug. 1996.

[9] U. G. Jørgensen: *Solen — en livgivende stjerne*, Gyldendal 1993.

[10] S. Brunak og B. Lautrup: *Neurale netværk — computere med intuition*, Munksgaards Forlag (1988).

[11] C. Svarer, L. K. Hansen, og J. Larsen: *On Design and Evaluation of Tapped-Delay Neural Network Architectures*, i Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco (1993).