

Tankelæsning med EEG og super-computere

Henrik Flyvbjerg, Afd. for Biosystemer og Dansk Polymercenter, Forskningscenter Risø

Det mest komplekse system vi kender

Den menneskelige hjerne er det mest komplekse system i Universet, vi kender til. Men selv om vi alle har et eksemplar, er den det system, vi ved mindst om. Vi ved ikke rigtigt hvordan den fungerer. En hjerne giver jo ikke sin ejer adgang til at følge med i hvordan den fungerer "under motorhjelmene." Ikke uden hjælpemidler.

Der findes en række målemetoder som kan "se" ind i en fungerende hjerne. Ingen af dem har tilstrækkelig rumlig opløsning til at vise hjernens "elektroniske komponenter," nervecellerne. CAT, PET, SPECT, MRI, og fMRI¹ har også for dårlig tidsopløsning til at følge med i nervecellernes aktivitet.

Hjerneceller signalerer med impulser som varer ca. 1 ms. Sådan en impuls består fysisk af en ændring i det elektriske potentiale henover cellens membran, forårsaget af ioner som strømmer gennem ionkanaler i membranen. Når det sker samtidigt i mange hjerneceller på samme sted i hjernen, fx fordi de deltager i samme aktivitet, kan ændringen måles udenfor hjernen med perfekt tidsopløsning, med MEG (*magnetoencephalografi*) og med EEG (*elektro-encephalografi*). Begge metoder er begunstiget af hjernens arkitektur: Storhjernens er groft sagt to-dimensional og ligger lige under kraniet, lidt krøllet, men lige til at måle på.

MEG og EEG

Styrken af magnetfelter fra hjernen er kun 0,1–1 picotesla ved skalpen, 10⁸ gange svagere end Jordens magnetfelt. De kan kun måles med ekstremt følsomme sensorer, såkaldte SQUIDS (Superconducting QUantum Interference Device). For at det kan lade sig gøre, skal lokalet det foregår i være omhyggeligt magnetisk afskærmet². Dertil skal måleinstrumentet, en hjelm med over hundrede SQUIDS indbygget, køles med flydende helium for at opnå superledning. Men så har man også et måleinstrument med millisekund tidsopløsning og en rumlig opløsning på under 1 mm.

Elektriske felter fra hjerneaktivitet måles med elektroder klistret på skalpen. EEG er derfor teknisk simple, og EEG-udstyr er langt billigere end MEG-udstyr.

"Projekt Tankelæsning"

Prisen på udstyr betød nu ikke noget for os da vi startede vores "Projekt Tankelæsning," selvom hjerneforskning var helt nyt for os. Vi var en ph.d.-studerende, Björn Peters, undertegnede, og lidt senere også en postdoc, Johannes Müller-Gerking. Vores baggrund var statistisk fysik på computere, og vi var ansat i Tysklands supercomputer-regnecenter i Jülich³. Der var en afdeling af Düsseldorfs Universitetshospital vores nabo. Denne hospitalsafdeling laver udelukkende hjerneforskning og behandling, og ligger i Jülich på grund af kerneforskningen dér: Man har brug for kortlivede isotoper. Men nu havde man udvidet aktiviteterne med MEG og EEG, havde investeret massivt i state-of-the-art hardware, og ansat en kransekage af nyt personale. De ville snart have masser af data og havde allerede problemer. Det måtte teoretiske fysikere med erfaring i statistik og computerberegninger da kunne gøre noget ved, mente forskningscentrets ledelse. Tjah... Men adgang til udstyr manglede vi altså ikke.

Grundlæggende ønsker man at løse "det inverse problem," dvs. regne baglæns fra de felter, man måler på skalpen, til de kilder i hjernen, som er årsag til felterne. Men problemet er matematisk set ufuldstændigt: Der er ingen entydig løsning, og slet ikke for virkelige data. Folk gør derfor forsimplende antagelser om kildernes art og placering – nogle få dipoler, fx, og altid placeret *inde* i hovedet, uanset hvor ens beregninger vil placere dem. Der var derfor nogle metodiske problemer med informationsindholdet i folks resultater: Hvor meget var faktisk *målt* og hvor meget var konsekvenser af indbyggede antagelser?

Man kan i princippet besvare dette spørgsmål objektivt ved at beregne *informations-entropien* i data. I praksis vil man dermed have præciseret datas elendighed med et kvantitativt mål som meget få i feltet forstår.

Så er det sjovere at vende problemet om, og spørge om man i data overhovedet kan skelne noget som helst? Kan man fx se i data hvad en person tænker på, hvis der kun er få mulige svar? Kan man læse tanker med EEG?

¹CAT (*Computed Axial Tomography*) producerer et tre-dimensionalt røntgenbillede på minutter. PET (*Positron Emission Tomography*) viser blodtilstrømning og glukoseomsætning, begge tegn på aktivitet, i tre dimensioner og på 30 sekunder når det går hurtigt, men kræver indsprøjtning med en kortlivet radioaktiv isotop. SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) minder om PET, har dårligere rumlig opløsning, ca. 1 cm, og er langsommere. Men det giver mulighed for at måle over længere tid end levetiden af PETs isotoper. MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) bruger et kraftigt magnetfelt og radiobølger til at danne et to- eller tre-dimensionalt billede. Varianten fMRI (*functional MRI*) bruger at de magnetiske egenskaber ved hæmoglobin, den jern-ilde forbindelse som gør blod rødt, er lidt forskellig i iltet og ikke-iltet blod. Det benyttes til at se hvor i en hjerne der er aktivitet: Kort tid efter aktivitet starter, vil iltet blod strømme til sådan et sted. Den rumlige opløsning er et par millimeter, og tidsopløsningen er begrænset af at det er blodtilstrømningen man ser.

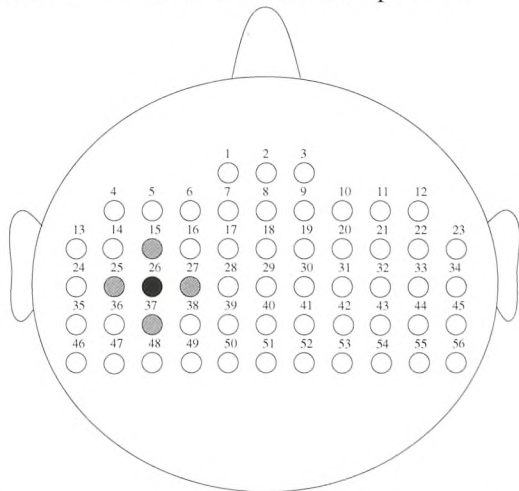
²Jordens magnetfelt er et mindre problem. Magnetfelterne fra elektriske installationer i bygninger dominerer, og selv stålet i en forbikørende bil vil påvirke MEG uden afskærmning.

³Forschungszentrum Jülich er Tysklands største pendant til RISØ, med seks gange flere ansatte.

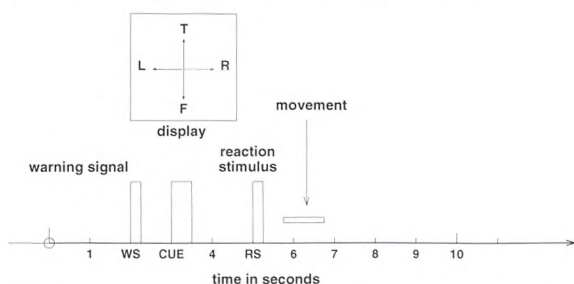
Lucky Luke og en gratis lodseddel

Andre var allerede i gang med tankelæsning: Dels en amerikansk gruppe, støttet af USAs luftvåben, bl.a., fordi man – som Lucky Luke – kan affyre sit våben hurtigere end sin egen skygge, når elektroder på skalpen kan tolke og udføre ens intention hurtigere end kroppen kan omsætte tanke til handling. Dels en europæisk gruppe, Prof. Pfurtschellers i Graz, Østrig, som arbejdede på et Brain-Computer Interface, som fx totalt lammede personer skulle kunne få glæde af.

Lægerne og teknikerne, vi skulle arbejde med, var også ret uerfarne med EEG og MEG. Vi var en dårlig kombination. Så mens de indkørte deres nye instrumenter, benyttede vi ventetiden til at varme op med andre, erfarne samarbejdspartnere. Vi friede til Pfurtscheller og fik hans bedste data. De var allerede gennem-analyserede og resultaterne publicerede, så samarbejdet var en gratis lodseddel for ham, mens vi fik data, der var rensede for fejl af eksperter, og analyseret af samme eksperter med resultater, som vi kunne bruge som benchmarks. Banen var kridtet op for os.



Figur 1. Placeringen af de 56 elektroder på forsøgspersonens skalp. Kanal 26 svarer cirka til position C3 i det internationale 10-20 system [2].



Figur 2. Eksperimentel protokol: Forsøgspersonen sidder afslappet i en stol foran en computerskærm, med en kontakt under venstre og højre pegefing og under højre fod. To sekunder efter måling er påbegyndt, lyder et kort beep. Ét sekund efter dette opmærksomhedssignal (WS, warning stimulus) angiver en pil på skærmen (CUE) hvilken kontakt der skal trykkes på senere. To sekunder senere angiver nok et beep (RS, reaction stimulus) at bevægelsen skal udføres om ét sekund, hvorefter forsøgspersonen hurtigt trykker på den angivne kontakt efter et sekund. Protokollen blev gentaget 100-200 gange for hver forsøgsperson med tilfældigt valgt bevægelse i hver gentagelse.

Registrering af tanker

Data bestod af EEG-signaler fra 56 elektroder på en sund og rask forsøgsperson (figur 1), som følger protokollen i figur 2. I sekunderne fra CUE til bevægelsen faktisk udføres, må forsøgspersonen formodes at tænke på bevægelsen. Især efter RS. Kan man af EEG-signalerne fra denne ventetid korrekt forudsige hvilken knap, der vil blive trykket på? Med hvilken succesrate?

Pfurtscheller og hans medarbejdere havde fundet at de med ét sekunds EEG-signal og en såkaldt *Distinction Sensitive Learning Vector Quantifier* kunne forudsige den forestående bevægelse med 50–70 % succes, afhængigt af forsøgspersonen. Kunne vi, uden erfaring med EEG, gøre det bedre med vores supercomputere end ingeniører med nogle PC'ere og 25 års erfaring? Massiv regnekraft kontra erfaring. *Bessermachen* var the name of the game.

Rådata vist som tegnefilm

Man skal altid se grundigt på sine data i så uforarbejdet form som muligt, inden man ser på dem grundigt igen og igen i stadigt mere forarbejdet form. Man må ikke nøjes med at beregne det resultat, man søger, og kun se på dét. Ikke når man arbejder med data fra virkeligheden. Vi havde tidsserier af ca. 10 s varighed optaget ved 128 Hz, fra hver af 56 elektroder fra hvert af 520 eksperimenter fordelt på tre forsøgspersoner. Det er 37 millioner tal.

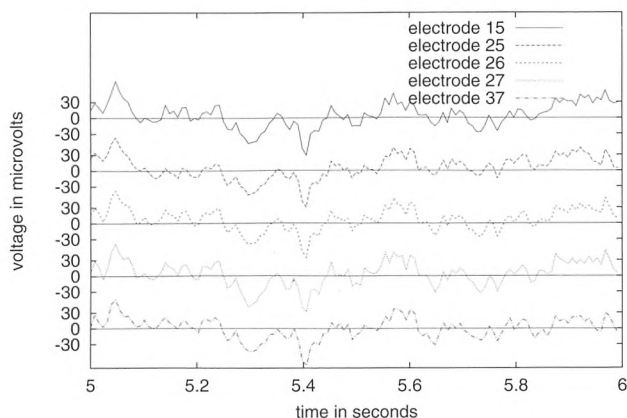
Skalpen er to-dimensional, så vi plottede det elektriske potentiale i hver elektrode i den tredje dimension i et 3d-plot, og viste dette 3d-plot som funktion af tiden i en kort tegnefilm, der altså viste måleresultaterne for ét gennemløb af den eksperimentelle protokol. For en given session med en forsøgsperson viste vi alle tegnefilmene som én længere film. Det menneskelige øje er rigtigt godt til mønstergenkendelse, så selv om disse film bare viste 56 hurtigt flimrende amplituder, var det tydeligt at se at én elektrodes potentiale opførte sig helt anderledes i én session.

Det er lidt tricket at klistre elektroder på en skalp, og vi havde fundet en overset løs forbindelse i de ellers gennemanalyserede data, bekræftede Graz-gruppen. Massiv computerkraft havde scoret det første lille point. Potentialer fra denne løse elektrode udelukkede vi fra den efterfølgende analyse af den pågældende session.

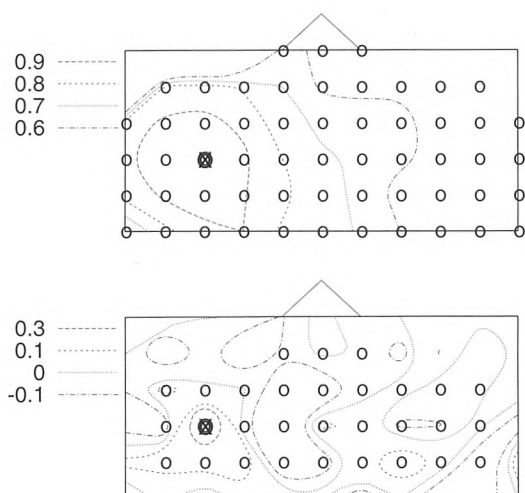
Filtrering

Med hele 56 elektroder på en skalp, sidder elektroderne så tæt at det elektriske potentiale registreret af den enkelte elektrode er næsten det samme som nabo-elektroderne; se figur 3. Det skyldes at der er et stykke ind til kilderne inde i kraniet. Men fra billedanalyse kendes en simpel måde at fremhæve forskelle: Man *Laplace-filtrerer*, dvs erstatter potentialer x med dets diskrete Laplace-affledte x' , fx (se figur 1):

$$x_{26} \rightarrow x'_{26} = x_{26} - \frac{x_{15} + x_{25} + x_{27} + x_{37}}{4} \quad (1)$$



Figur 3. Typisk eksempel på rå data fra kanalerne 15, 25, 26, 27 og 37 ved bevægelse af venstre pegefinger. De fem målte spændinger er tydeligt korrelerede.



Figur 4. Øverst: Rumlig korrelation af EEG-signal, her for kanal 26 i figur 1 med alle andre kanaler, beregnet for én forsøgsperson. Nederst: Den meget svagere korrelation i samme data efter Laplace-filtrering. Prisen for dette store fremskridt er færre kanaler, 30 i alt, da man kun kan Laplace-filtrere kanaler med nabo-kanaler på alle fire sider.

For et elektrisk potentiale, som her, vil den Laplace-afledte af potentialet på skalpen fremhæve kildernes placering under skalpen, kan man vise. Figur 4 illustrerer dette.

Traditionelt filtrerer man EEG-signaler til frekvensbånd som har vist sig særligt interessante i praksis, de såkaldte δ -, θ -, α -, β - og γ -bånd. Det gjorde vi derfor også. Men vi sammenlignede også alle resultater fundet med frekvens-filtre, med hvad vi kunne opnå når vi slog de samme filtre *fra* og regnede direkte på de ufiltrerede data. Det sidste gav altid lidt bedre resultater!

En komité af kunstige intelligenser

Disse resultater fremkom ved at træne 30 kunstige neurale netværk, ét for hver af de Laplace-filtrerede kanaler fra en forsøgsperson. Netværkene blev alle

trænet til at forudsige hvad forsøgspersonen ville gøre ud fra ét sekund af kanalens output, typisk sekundet lige inden forsøgspersonen foretager bevægelsen. Herefter *rangordnede* vi de træned netværk efter hvor gode de var til korrekt at forudsige forsøgspersonens handling. Der var nemlig stor forskel, afhængigt af hvorfra på skalpen et netværk fik sit input.

Endelig dannede vi en komité bestående af netværk med højest succes-rate. Den egentlige forudsigelse blev besluttet ved afstemning i komitéen. Brugen af ekspert-komitéer er kendt fra anden sammenhæng. Det er formentlig også klart at det er vigtigt ikke at få dårligt kvalificerede eksperter med. De øger den tilfældige komponent i komitéens beslutninger.

Det enkelte netværks "mening" i en klassifikations-opgave er tre reelle, positive tal, nemlig output'et fra tre output-neuroner der "udtaler sig" om henholdsvis "venstre pegefinger", "højre pegefinger" og "højre fod". Størrelsen af det enkelte tal indikerer styrken af netværkets overbevisning om at forsøgspersonens kommende bevægelse vil være den som output-neuronen udtaler sig om. Man kunne således lade den neuron der producerer det numerisk største output, vinde i *netværkets* overvejelser med sig selv, og derefter lade komitéen stemme *demokratisk* med én stemme til hvert netværk. Men man får faktisk et bedre resultat ud af komitéen når man *adderer* de enkelte netværks output, og først *derefter* lader det numerisk største resultat vinde i *komitéens* overvejelser med sig selv. Det er til at forstå: Netværk uden overbevisning bidrager så heller ikke ret meget til meningsdannelsen, heller ikke med støj, hvilket de ville ved demokratisk afstemning.

Grunden til at vi overhovedet benyttede kunstige neurale netværk, havde intet at gøre med at vi studerede hjerner. Kunstige neurale netværk er simpelthen gode til at klassificere data i almindelighed uden at man behøver at vide en masse om data. I stedet lærer netværkene at genkende input som producerer et givet output i en træningsproces på data for hvilke sammenhængen er kendt.

Optimering af arkitektur

Et kunstigt neuralt netværks arkitektur er karakteriseret ved et antal parametre. Alle netværk har et lag af input-variable og et lag af output-neuroner. Imellem disse to lag kan man have ét eller flere såkaldt "skjulte lag" af neuroner som bearbejder input til output. Er der skjulte lag, er antallet af neuroner i hvert lag en vigtig parameter. Det er antallet af input-variable også: Vi repræsenterede en elektrodes potentiale målt i et sekund ved de p koefficienter i en såkaldt p 'te ordens autoregressiv model af signalet. Vi valgte netværk med et enkelt skjult lag, men også med direkte forbindelser mellem input og output. Vi optimerede parametervalget ved at sammenligne succesraten for forskellige træned netværk, med 2 til 50 input variable, omkring 5 neuroner i det skjulte lag, og forskellige komité-størrelser.

Det er mange netværk at træne, men det er en ligefrem og indiskutabel måde at optimere netværks-arkitekturen på. Der er således elegante logiske fordele ved massiv anvendelse af brutal regnekraft – i vores tilfælde en Cray supercomputer som undersøgte 31 varianter af vores klassifikator samtidigt på dens 31 nodes. Vi landede på 20 input-variable med 5 neuroner i det skjulte lag og 8 til 12 komité-medlemmer. I første omgang [1].

Dekonstruktion

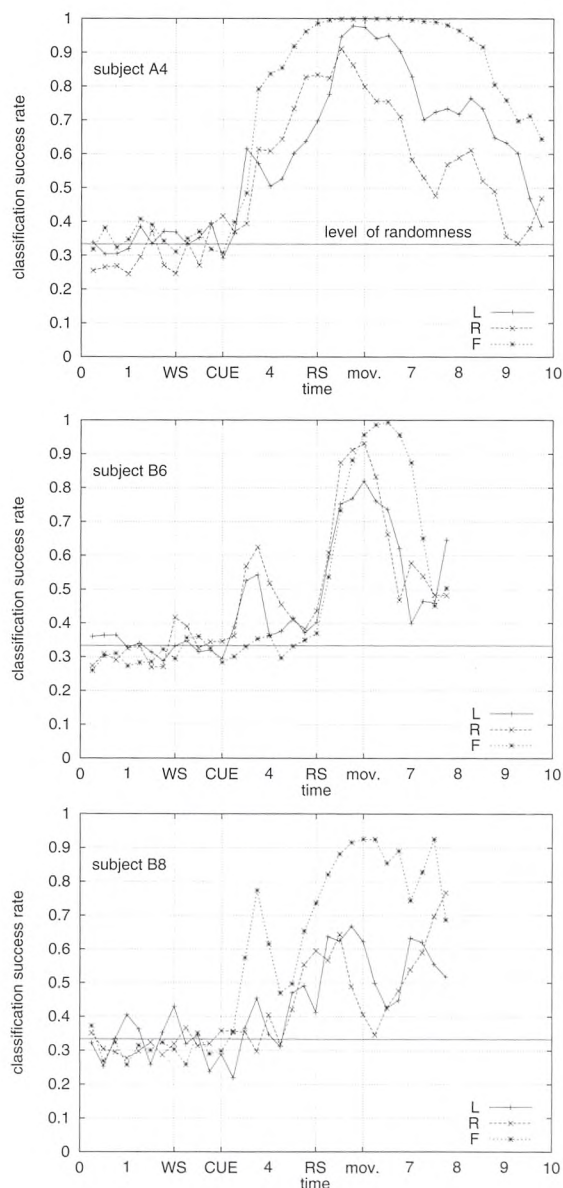
Da vi nu havde en optimal netværksarkitektur, undersøgte vi hvor meget af netværket der faktisk blev brugt. Kunstige neuroner som kun bidrog med lille vægt i alle forbindelser, elimineredes, hvorefter netværket blev optrænet igen. Efter nogen gentagen af elimination og genoptræning, kaldet *pruning* (engelsk for *beskæring*, som på frugttræer), var det skjulte lag af neuroner næsten væk uden at succesraten var faldet. Vi eliminerede det forsøgsvis helt, og havde dermed en såkaldt *perceptron*, et tidligt, primitivt eksempel på et kunstigt neuralt netværk med særligt simple matematiske egenskaber. Efter genoptræning af perceptronen var succesraten stadig uændret.

Da perceptroner er næsten lineære i deres data-behandling, var det nu nærliggende også at afprøve nogle helt lineære klassiske statistiske diskriminatorer. *Common Spatial Pattern*-metoden er en sådan, som kan minde noget om en perceptron. Den fungerede, og med samme succesrate [3], men har den ekstra fordel at den ikke skal trænes som et kunstigt neuralt netværk skal pga dets ikke-linearitet. Da den er lineær, beregner man bare i ét hug de indre parametres værdier ud fra "trænings-data." Det er simpelt og går så hurtigt – ved lineær projektion – at det ikke kan gøres hurtigere.

Verdensmestre i tankelæsning!

Figur 5 viser nogle af vores resultater for tre forsøgspersoner. Man ser individuelle forskelle, men EEG for tanke og handling ligner hinanden: Klassifikatoren er trænet på EEG for tanken om umiddelbart forestående bevægelse, men genkender også selve bevægelsens EEG. I sekundet lige efter CUE genkender klassifikatoren også EEG for forsøgspersonens registrering af hvilken bevægelse han skal foretage senere. De elektroder på skallen der bidrager mest til klassificering, er for de flestes vedkommende placeret over de steder i motor cortex hvor man véd, at bevægelse af venstre og højre hånd er repræsenteret.

Pfurtscheller og medarbejdere havde som nævnt med en anden metode opnået 50–70 % klassifikations-succes afhængigt af forsøgspersonen [5]. Til sammenligning havde vi 75–98 % succes [2]. Det var ikke set før. Når vi trænede vores respektive klassifikatorer til kun at skelne mellem forestående bevægelse af venstre eller højre pegefinger, havde Pfurtscheller og medarbejdere 79, 89 og 85 % succes for A4, B6 og B8 [4], mens vi havde en ny rekord med respektivt 94, 95 og 91 % succes [2].



Figur 5. Klassifikations-succes for den enkelte type bevægelse, venstre finger (L), højre finger (R) og højre fod (F) for tre forsøgspersoner, A4, B6 og B8 og sammenligning af EEG-mønstre for tanke og bevægelse. Klassifikator blev trænet på ét sekund af EEG-signalet optaget i et antal gentagne forsøg. Det ene sekund mellem *reaction stimulus* (RS) og bevægelsens udførelse (mov.) benyttedes til denne træning. Derefter blev klassifikations-succesraten målt for input fra ét sekund af EEG-signalet fra andre gentagne forsøg, med forskellig placering i tid af dette ene sekund. Plottepunkterne i de tre plots viser *midten* af dette sekund-interval. Før CUE er succesraten 1/3, som den skal være ved tilfældigt gæt på ét af tre mulige udfald. Derefter stiger raten efterhånden som mere af input-intervallet ligger efter CUE, men med et resultat som afhænger meget af forsøgspersonen [2].

Med så høj succesrate, behøver vi så et helt sekund til tankelæsning? Vi prøvede med 0,5 s. Succesraten gik kun lidt ned [2]. Vi skiftede komitéen af kunstige neurale netværk ud med den simplere *Common Spatial Pattern*-metode og prøvede 0,5 s, 0,25 s og 0,125 s [3]. Succesraten faldt ikke! (Det gjorde den ved kortere intervaller.) Faktisk gik dens maksimumsvær-

di op når det gjaldt genkendelse af forsøgspersonens registrering af kommende bevægelse lige efter CUE. Forsøgspersonen bruger nemlig ikke et helt sekund på at notere sig bevægelsen, kunne vi se med den bedre tidsopløsning. Alle forsøgspersoner var iøvrigt 0,25 s længere om at opfatte at de skulle bevæge venstre pegefinger sammenlignet med højre pegefinger. De var også alle højrehåndede.

Stort ståhej for ingenting?

Mens vi øvede os på Pfurtschellers data, blev den gruppe, vi ventede på data fra, nedlagt af ledelsen. Vi var en lappeløsning, et hæfteplaster. Nu brugte man kirurgi. Så vores nyrehvervede ekspertise var overflødiggjort lokalt, af de som havde efterspurgt den. Men der er fordele ved alting. Planer som gennemføres, fører jo kun til evolution. Tilfældigheder kan rykke én længere. Vi rundede projektet af, hvorefter postdoc'en, Johannes Müller-Gerking, fik en stilling i udviklingsafdelingen hos Mercedes-Benz. Bilmotorer indeholder efterhånden meget elektronik og kan overvåges automatisk, hvis man kan klassificere motorlyd og andet input. Den problemstilling adskiller sig ikke fra vores tankelæsnings-problem.

Den nybagte ph.d., Björn Peters, søgte management konsulentjobs hos Anderson Consulting og McKinsey & Company, lod dem overbyde hinanden, og startede med en løn på det dobbelte af undertegnede slutløn. En ph.d. regnes ækvivalent med en MBA, og han imponerede med demonstreret ekspertise i både medicinsk signalbehandling, kunstig intelligens og supercomputer-beregninger. En af hans første opgaver blev reorganiseringen af det tidligere DDRs sundhedsvæsen.

Selv forlod jeg Jülich til fordel for mit nuværende job, hvor første opgave gjorde mig til Danmarks eneste kvantefeltteoretiker, formoder jeg, med en ekspertise også i minefelter. Men det er en helt anden historie om felter og signalbehandling.

Litteratur

- [1] B. O. Peters, G. Pfurtscheller, and H. Flyvbjerg, *Theor. Biosci.* **116**, 290–301 (1997); *Neural Networks* **11**, 1429–1433 (1998).
- [2] B. O. Peters, G. Pfurtscheller, and H. Flyvbjerg, *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **48**, 111–116 (2001); *Automatic Recognition of Multichannel EEG Signals Using a Committee of Artificial Neural Networks*, side 157–178 i Vol.III, *Signal, Image, and Speech Processing*, i Cornelius T. Leondes (Ed.) *Intelligent Systems: Technology and Applications*, Vols. I–VI, CRC Press LLC (2002).
- [3] J. Müller-Gerking, G. Pfurtscheller, and H. Flyvbjerg, *Clin. Neurophysiol.* **110**, 787–798 (1999); *Clin. Neurophysiol.* **111**, 1353–1365 (2000).
- [4] M. Pregenzer, G. Pfurtscheller, and D. Flotzinger, *Bio-med. Tech.* **39**, 264–269 (1994).
- [5] J. Kalcher et al., *Med. Biol. Eng.* **34**, 382–388 (1996).



Henrik Flyvbjerg er teoretisk fysiker, dr.scient., seniorforsker i Biosystemer og Dansk Polymer Center på RISØ. Efter ti år i kvantefeltteori skiftede han emne til statistisk fysik og senere biofysik; se hans to artikler i det foregående nummer af KVANT.

Einsteins Videnskab

– i 1905 og i dansk forskning i dag

Hold 1109. 5 tirsdage 19.15–21 (8/11–6/12)
Forelæsningsrække på Folkeuniversitetet, København.
www.fukbh.dk, tlf. 33 98 60 60 (tilmelding indtil max-deltagerantal er nået)

Ved lektor, ph.d. Poul Henrik Damgaard, seniorforsker, dr.scient. Henrik Flyvbjerg, lektor, lic.scient. Per Hedegård, lektor, mag.scient. Benny Laurrup og programleder, adjungeret professor, lic.techn. Paul Michael Pedersen. Tilrettelæggelse: Henrik Flyvbjerg.

Hundred-året for Einsteins “mirakuløse år” er udnævnt til “Verdens Fysik År” og markeres af Folkeuniversitetet med forelæsningsserien *Einsteins Videnskab – I 1905 og i dansk forskning i dag*:

1. Tilfældighed, nødvendighed og Einsteins teori for Brownske bevægelser – i 1905 og i dag (HF).
2. Big Bang, sorte huller, Einsteins relativitetsteorier og kvantiseringen af tyngdekraften (PHD).
3. Einstein og stoffers egenskaber: Hvad man forstod, hvad vi forstår (PH).
4. Einsteins teorier bag udviklingen af laseren (PMP).
5. Einstein, kvantemekanikken og virkeligheden (BL).

ANBEFALET LITTERATUR:

De to særnumre af KVANT (nr.1, marts 2005 og nr. 2, maj 2005) med i alt 11 korte artikler om Einsteins videnskabelige resultater og hvordan de anvendes i Danmark i dag. Bestilles per e-mail til kvant@kvant.dk; pris 65 kr. ved samlet bestilling af begge numre, og ellers 40 kr. pr. styk, inkl. porto, så længe lager haves. Derudover: Abraham Pais, “‘Subtle is the Lord ...’ The Science and the Life of Albert Einstein”. Oxford 1982 og AIP: “A. Einstein - Image and Impact”, www.aip.org/history/einstein, med mange links til andre web-sider om Einstein.