

# Grænser for videnskab

Benny Lautrup og Henrik Zinkernagel

## Storebælt

Under planlægningen af Storebæltsbroen blev det fra politisk side forlangt, at den ikke måtte forringe vandudskiftningen i Østersøen. Dette farvand er i forvejen økologisk stærkt belastet, ikke alene på grund af befolkningstætheden i de mange stater langs dens rand, men også på grund af den specielle geografi. Der skyldes meget ferskvand ud gennem de mange floder og vandudskiftning kan kun ske gennem de danske stræder. Brakvand har større tilbøjelighed til at blive udsat for iltsvind og deraf følgende problemer for livet i havet. Det er tilførslen af iltholdigt saltvand fra Kattegat, som danner grundlag for iltningen af vandet i Østersøen. Denne strøm vender periodisk retning afhængigt af tidevand, vejr og vind og bringer det relativt ferskere brakvand ud i Kattegat. Det ville have været så meget lettere, hvis der havde været hul i den anden ende af Østersøen, men det er der altså ikke.

Det blev forlangt, at brobyggerne skulle sikre en nulløsning for Østersøen, altså at vandudskiftningen gennem Storebælt ikke måtte påvirkes af byggeriet. Det var ikke så let, fordi der skulle opstilles en række forhindringer i Storebælt, nemlig de store pyloner til hængebroen i Østrenden og de mange bropiller til lavbroen i Vestrenden, samt ramperne til broen. Disse forhindringer ville, alt andet lige, blokere for noget af vandets skvulpen op og ned gennem Storebælt. For at kompensere for blokeringen i Vestrenden ville man grave ud øst for Sprogø og derved forøge vandgennemstrømningen i Østrenden.

Herved opstod der et specielt problem for Langelandssund, som ligger i fortsættelse af Vestrenden og derfor et stykke fra afgravningen i Østrenden. Dette sund er i forvejen godt på vej til at gå til grunde i iltsvind og forurening. Hvor meget kunne dette vand tåle af yderligere forringelse af bundvandsudskiftningen? Ville nulløsningen for Østersøen give dødsstødet til Langelandssund og afstedkomme et permanent fiske- og badeforbud?

For at beregne den nødvendige afgravnings størrelse i Østrenden og for løbende at kontrollere, at nulløsningen blev overholdt, blev der af Hydraulisk Institut opstillet en videnskabelig model, der på baggrund af de matematiske ligninger for vands opførsel kunne simulere forholdene i en del af bæltet. Ved hjælp af denne model, kunne man nu også beregne, at bundvandsudskiftningen i Langelandssund kun blev forringet med 0.2%.

Alt så nu lykkeligt ud, indtil en fysiker fra Odense Universitet, Peter Touborg, kom med en kritisk vurdering af dette tal. Han benyttede ikke computere til beregningen, men teoretisk analyse af de fysiske forhold i bæltet, der er ganske komplicerede. Herved kom han frem til en langt større virkning på Langelandssund, måske helt op mod 10%, hvilket er 50 gange større end computersimuleringens resultat. Han påpegede desuden svagheder

i computersimuleringen, som gjorde det vanskeligt at tro på resultatet, der lige så godt kunne have været 2%.

Der opstod nu en livlig debat i medierne og privat mellem Hydraulisk Institut, A/S Storebælt, trafikministeren, Peter Touborg og andre videnskabsmænd (heriblandt en af os [1]), samt en gruppe styrmænd fra færgerne. Det kom her frem, at selve svaret på 0,2% ifølge Hydraulisk Institut var usikkert med mindst en faktor 10. Det vil sige, at resultatet lige så godt kunne have været 2 eller 4%. Bygherren havde blot valgt at offentliggøre resultatet uden at citere usikkerheden. I alle tilfælde udtalte et ekspertpanel, at det ville det være alt for dyrt at foretage bedre beregninger. Og så var der den politiske vinkel, at uanset indvendingerne kunne der naturligvis ikke gøres noget ved brobyggeriet. Formanden for Folketingets trafikudvalg udtalte [2]: “Vi kan ikke arbejde ud fra hvis’er. Vi arbejder ud fra de oplysninger, vi får fra vore eksperter, og dem må vi stole på. Nu er vi i gang med byggeriet. Det er, som om kritikerne vil have, at det vi er i gang med at bygge, skal brækkes ned. Og det ved man jo godt, ikke kan lade sig gøre.” Diskussion var overflødig: Langelandsunds skæbne *var* allerede afgjort, men resultatet ville først foreligge 10 år senere. Case closed.

## Eftertanke

Her ser vi et eksempel på, hvordan videnskab, teknologi, politik og miljø hænger sammen. Fra politisk side ønsker man at bygge en bro, og man beder bygherren overholde loven om, at miljøet ikke må ødelægges. Bygherren spørger videnskaben, som implementerer en teknologisk løsning på spørgsmålet. Hydraulisk Institut og ekspertpanelet påpeger teknologiske og økonomiske grænser: computerne er ikke hurtige nok og de er for dyre. Teknologien udstikker altså i dette tilfælde grænser for opnåelsen af den nødvendige miljøvidenskabelige viden.

Det er ikke her vores hensigt at genåbne debatten eller kaste med mudder fra Langelandsunds hængedynd, men eksemplet er en god illustration af nogle af de grænser, videnskaben render ind i samspillet med teknologi, miljø og politik.

Brobyggeriet blev sat i gang politisk med en lov om, at der skulle findes en nulløsning for vandudskiftningen i Østersøen. For at afklare dette beder man om et videnskabeligt svar på, om dette mål er opnåeligt, eller rettere om hvilke midler der skal til for at nå det. Under besvarelsen af dette spørgsmål er der forskellige interesser, som driver parterne mod hinanden og påvirker svaret. Nogle er ret åbenlyse, såsom A/S Storebælt, der har til opgave at bygge broen, trafikministeren som har bestilt den, eller styrmandsgruppen, der ser sit erhverv truet af brobyggeriet, og derfor bruger Peter Touborgs beregninger som vand på deres skruer. Resultatet af interesse modsætningerne er, at der sås tvivl om validiteten af både simuleringen og de teoretiske beregninger. Det videnskabelige resultat er derved blevet afhængigt af, hvem der betragter det.

Hvorfor kan der i det hele taget sås tvivl om de videnskabelige resultater? Computerne kan jo regne alt ud til lige så høj præcision, som man ønsker, så hvorfor er simuleringen ikke bare korrekt?

Når man programmerer så komplicerede ligningssystemer, som dem, der gælder for vands bevægelser i et tre-dimensionalt volumen, her et område af Storebælt omkring

Sprogø, så må man foretage en diskretisering af vandmassen, således, at den opdeles i et endeligt antal kasser. Indenfor hver kasse regnes de fysiske forhold for helt ens. I simuleringen af Storebælt brugte Hydraulisk Institut en vandret diskretisering med gitterstørrelse  $250\text{m} \times 250\text{m}$ . I lodret retning opdelt vandet i blot to lag, topvand og bundvand. At der ikke blev brugt en finere diskretisering, skyldtes hensyn til beregningstiden for simuleringen. Ideelt set ville man gerne gøre kasserne så små, at man ville være sikker på at fange alle de relevante bevægelser i vandet. Men det tillod økonomien ikke. Ekspertpanelet vurderede, at udgiften til en egentlig tre-dimensional model ville være voldsomt stor. I anvendelsen af denne diskretisering ligger der derfor en antagelse om, at den er god nok til formålet, altså at den variation i vandet, som ligger inden for den enkelte kasse er irrelevant. Dette beror på et skøn, som kan drages i tvivl — og blev det.

Noget andet er, om man overhovedet kan regne med, at man får et realistisk svar på problemet omkring ændringerne i vandmiljøet, selv hvis gitterafstanden er lille. Hvordan afgøres det, hvilke fysiske forhold der i det hele taget skal simuleres i computeren? I det konkrete tilfælde antog man, at strømningsforholdene var det afgørende for vandmiljøet, men hvilke andre forhold påvirker for eksempel de gydende vårsild omkring Sprogø?

En del af Touborgs kritik af computermodellen gik direkte på, at modellen var for simpel og ikke tog hensyn til alle relevante forhold. Dette er en normal kritik af en model i opbygningsfasen og fører oftest til en yderligere udbygning af modellen. Denne forfinelse og integration af kritik og model skete ikke i det omtalte tilfælde, for man var jo “i gang med byggeriet”.

Endelig er der spørgsmålet om, hvor meget af det, der kommer ud af en simulering, man selv har puttet ind. Det internationale ekspertpanel gjorde opmærksom på et problem af denne type. Det bemærkedes, at man med fordel kunne forbedre modellen, hvis kalibrering og verifikation blev tydeligere adskilt. I en sådan model indgår der en række parametre, som bestemmes — kalibreres — ved hjælp af målinger. Derefter bruges andre målinger til at teste, om forudsigelserne holder stik. Spørgsmålet var, om de to sæt af målinger var uafhængige af hinanden. Ekspertpanelets kritik angik her en ukorrekt brug af videnskabelig metode, en fejl som kan korrigeres, men vi skal senere se, at der er steder i videnskaben, hvor separationen af kalibrering og test kan blive et reelt problem.

## Statistiske fejl

De spørgsmål, vi ovenfor har rejst om fejl i en computersimulering af et konkret problem, motiverer en mere almen diskussion af fejlkilder i videnskaben.

Når en fysisk størrelse, for eksempel et æbles vægt, bestemmes gennem et eksperiment, er målingen behæftet med fejl. Nogle af disse fejl skyldes små og tilfældige variationer i måleapparatet og dets omgivelser: rystelser, temperatursvingninger og andre ukontrollerede påvirkninger. For samlet at vurdere disse fejl, som kaldes statistiske, gentages eksperimentet så mange gange, som omstændighederne tillader, og derved opnås en række forskellige resultater, der danner en slags støvsky omkring en middelværdi. Støvskyens udstrækning er et udtryk for den statistiske fejl, og i tilgift fås gennem middelværdien en bedre bestemmelse af den fysiske størrelse.

Reproducerbarheden af et eksperiment er ikke blot vigtig for bestemmelsen af den

statistiske usikkerhed, men er afgørende for, at et videnskabeligt resultat kan anses for troværdigt. Reproducerbarhed er en norm i videnskaben, som medfører, at et eksperiment kan gentages og dets resultat genfindes af enhver inden for den statistiske usikkerhed, i det mindste i princippet. Reproducerbarheden skal sikre, at resultaterne har generel gyldighed, uafhængigt af forskerens humør, biorytmer eller politiske overbevisning.

Denne ideelle situation er ikke altid i overensstemmelse med virkeligheden. Ikke alene skal den forsker, der ønsker at gentage eksperimentet, være i stand til at forstå beskrivelsen og forudsætningerne for eksperimentet, men han skal også have råd til at udføre det. Som vi skal se, er det vanskeligt at opfylde disse krav i højenergifysikken.

Alt andet lige, så er statistiske fejl tilgængelige for analyse ved hjælp af sandsynlighedsteori, og de volder i almindelighed ikke de store problemer.

## Systematiske fejl

Ud over statistiske fejl er eksperimenter behæftet med systematiske fejl. Som et simpelt eksempel kan vi pege på nulpunktsindstillingen af æblevægten. Hvis vægten er forkert indstillet, vil alle resultaterne være forskudt væk fra den rigtige værdi med samme fejl. Denne kan nemt korrigeres ved at aflæse vægten uden belastning, altså ved en kalibrering. Nogle systematiske fejl tillader ikke en korrektion gennem kalibrering, men dog en vurdering af størrelsen af fejlen. Denne vurdering er normalt et groft overslag. Hvis man kunne udføre en præcis beregning af fejlen, ville den kunne korrigeres eksplicit.

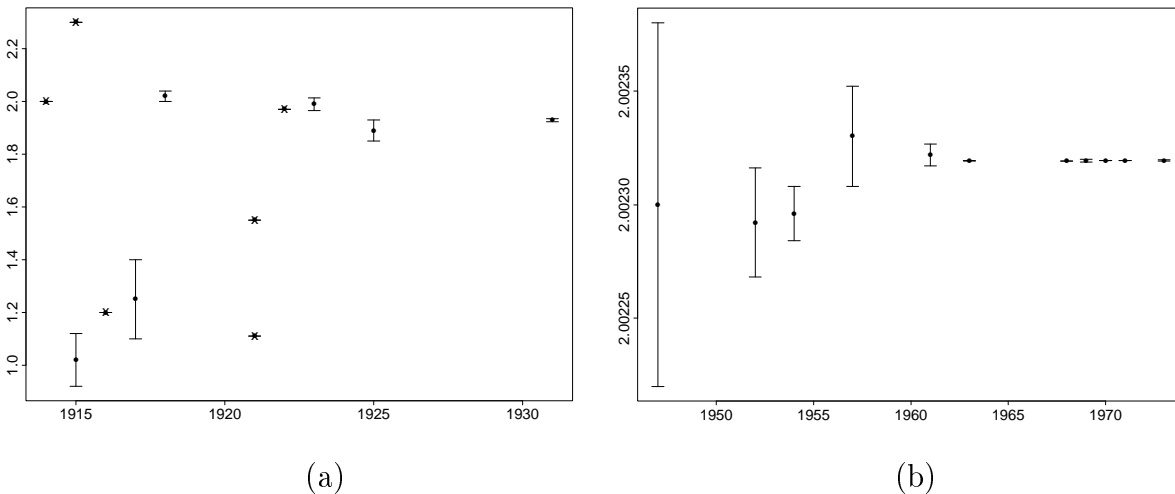
Systematiske fejl er notorisk vanskelige at håndtere, fordi årsagerne kan rangere fra apparatfejl og oversete eller ukendte effekter, over teoretisk forudindtaget til den subtile indflydelse af politisk eller økonomisk pres.

I Storebælt foretog man et virtuelt eksperiment ved at udføre computermodelberegninger over vandgennemstrømningen. Som virkelige eksperimenter er virtuelle eksperimenter behæftet med såvel statistiske som systematiske fejl. De statistiske fejl i et virtuelt eksperiment er lige så tilgængelige for normal sandsynlighedsberegning, som i de virkelige eksperimenter, og de systematiske kan være lige så ondartede.

Systematiske fejl bliver ofte undervurderet, fordi der simpelthen mangler viden om, hvad der kan forstyrre et eksperiment. I det følgende skal vi beskrive udviklingen og diskutere de systematiske fejl i et eksperiment, der i forskellige versioner har foregået i mere end 80 år.

## Elektronens magnetiske moment

Elektronen er en fundamental partikel. Ud over masse og elektrisk ladning har den også magnetiske egenskaber, et magnetisk moment, som har sin oprindelse i dens rotation om sin egen akse. Det magnetiske moment er følsomt overfor de modeller, man i tidens løb har opstillet for elektronens vekselvirkninger, og det har derfor været vigtigt at få bestemt værdien af denne størrelse lige siden 1914. I Fig. 1a har vi plottet det faktiske forløb af målingerne i den første fase, der går fra 1914 til 1934. Begyndelsen til den moderne teori for elektronen blev formuleret af Dirac i 1928, og som det ses er der indtil omkring 1925 stor uenighed om den faktiske værdi.



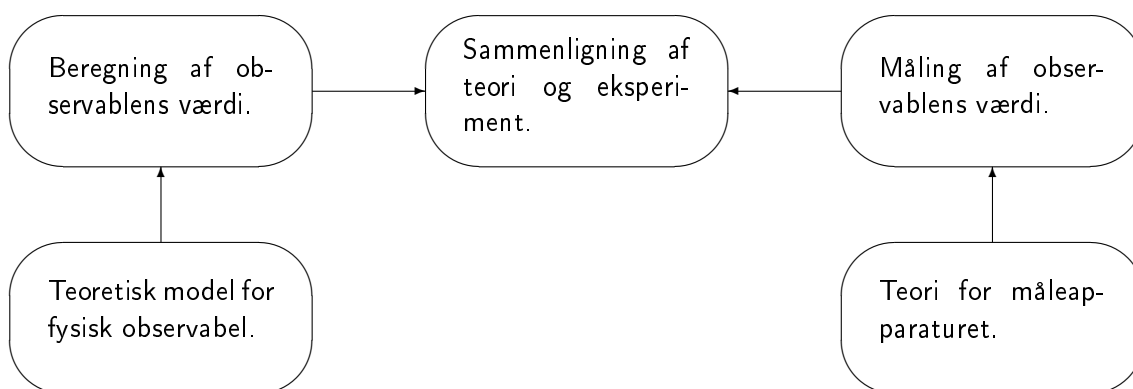
Figur 1: *Historisk udvikling i målinger af elektronens magnetiske moment. Data for de tidlige år (a) er taget fra ref. [3], medens de senere års data (b) er taget fra ref. [4]. I den tidlige fase var det almindeligt ikke at vurdere usikkerhed, hvilket er markeret ved et stjernesymbol. Den horizontale akse angiver årstallet og den vertikale et mål for det magnetiske moment. Bemærk de forskellige skalaer i de to figurer.*

I begyndelsen af århundredet havde man ikke særligt præcise ideer om, hvordan stofers magnetisme fremkom, og hvilken rolle elektronen spillede for den. Visse teorier forudsagde at elektronens magnetiske moment (i passende enheder) skulle have værdien 1 medens andre forudsagde værdien 2, og lidt ondt kan man sige, at de forventninger eksperimentalfysikerne havde til værdien, blev indfriet af de første målinger. Helt så ondartet er det dog ikke. Undervurderingen af den systematiske fejl, der fandt sted før 1925, skyldes dels teoretisk forudindtagethed og dels forkerte ideer om, hvad der faktisk blev målt i eksperimentet, samt de mulige fejlkilder. De historiske detaljer i denne tidlige udvikling er ganske komplicerede og kan findes i Galisons bog [3].

Efter 1932 blev teoretikerne hurtigt enige med sig selv om det billede af elektronen, der stadig er gyldigt den dag i dag, nemlig kvanteelektrodynamikkens. I den senere fase efter Anden Verdenskrig (se Fig. 1b) skete en videreudvikling af teorien, som medførte, at den kunne forudsige elektronens magnetiske moment til meget høj præcision, og eksperimenterne fulgte efter. I dag bestemmes elektronens magnetiske moment eksperimentelt med omkring tolv betydende cifre, og teorien stemmer overens med denne værdi til samme præcision [5].

Ovenstående billede (Fig. 1) er næsten et idealbillede af, hvordan resultater etableres i naturvidenskaben. Når en ny størrelse skal bestemmes, vil der ofte forekomme en tidlig fase (Fig. 1a), hvor de teoretiske ideer om, hvad denne størrelse skulle være, er meget vage. Den eksperimentelle formåen er ligeledes begrænset, blandt andet fordi der måske skal udvikles ny teknologi til at gennemføre målingen. Det er især her, man ser grove undervurderinger af systematiske fejl. I den senere fase, hvor teorien er blevet etableret og målemetoderne bedre forstået, ser man en mere rolig udvikling (Fig. 1b) hen imod større præcision i værdien for den målte størrelse. For elektronens magnetiske moments vedkommende er der undervejs sket flere radikale ændringer i måleteknikken, medens den

grundlæggende teori, kvantelektrodynamikken, i det væsentlige har været uændret siden 1947.



Figur 2: Idealskitse for etableringen af et enkelt fysisk resultat, for eksempel bestemmelsen af elektronens magnetiske moment i den sene fase. I andre eksperimenter kan der være tale om sæt af observable og ikke blot én.

I Fig. 2 ses en skitse af den ovenfor beskrevne proces, hvorved et troværdigt resultat er blevet opnået for elektronens magnetiske moment. Det væsentlige punkt i etableringen er en sammenligning af en teoretisk beregnet værdi med den eksperimentelt bestemte. Som grundlag for den teoretiske beregning ligger der en model, i dette tilfælde kvantelektrodynamikken. Som forudsætning for selve målingen ligger opbygningen af måleapparatet, som er afhængigt af allerede etableret teknologi og teoretisk viden. Det er det, der menes med ‘teori for måleapparatet’ i figuren.

For at tro på resultatet af sammenligningen, er det vigtigt, at de to grene, den teoretiske (venstre) og den eksperimentelle (højre) er så uafhængige af hinanden som muligt. I den sene fase af de omtalte eksperimenter på elektronens magnetiske moment er isolationen mellem de to sider næsten perfekt. Eksperimentalfysikerne behøvede næsten intet at kende til kvantelektrodynamikken for at udføre eksperimentet, og omvendt behøvede teorikerne intet at kende til eksperimenternes tekniske detaljer for at beregne værdien.

Skitsen i Fig. 2 er en idealisation af de faktiske forhold. Både den teoretiske model og teorien for måleapparatet hviler begge på fundamentale teoretiske forudsætninger, nemlig kvantemekanikken, relativitetsteorien og elektrodynamikken. I diagrammet er disse forudsætninger ikke medtaget eksplicit, fordi de er veletablerede og ikke underkastet direkte efterprøvning i disse eksperimenter. Hvis sammenligningen mellem teori og eksperiment ultimativt viser en uoverensstemmelse, der ikke kan bortforklares ved fejl i modellen eller målingen, så kan disse underliggende teorier også komme op til overvejelse. Det har ikke vist sig at være nødvendigt her.

En anden faktor, som er udeladt i Fig. 2 er den potentielle indflydelse fra tidligere eksperimenter. I Fig. 1b ses, at resultaterne af eksperimenterne i den sene fase holder sig

nogenlunde inden for de foregående eksperimenters usikkerhedsgrænser. Det er, hvad man ville forvente, hvis den systematiske fejl var korrekt vurderet. En anden mulig forklaring er, at den gamle værdi kan have så stærk indflydelse på det nye apparaturs udformning, at det driver den nye værdi i en bestemt retning. Kunne den samme systematiske fejl således være ført videre fra eksperiment til eksperiment? Det kan vi af gode grunde ikke vide, men et argument for, at det nok ikke er tilfældet her, er, at der i Fig. 1b er repræsenteret mindst tre radikalt forskellige måleapparaturer baseret på vidt forskellige fysiske principper.

Et eksempel på, at systematiske fejl ikke altid kan overskues, når eksperimenterne udføres, men først langt senere ses i Fig. 1a. Bemærk, at de sidste par målinger tenderer mod en værdi, der er signifikant mindre end 2 (den sidste er  $1.929 \pm 0.006$ ). I retrospekt ved vi, at dette skyldtes en systematisk fejl, der blev ført videre i de tidlige eksperimenter, idet man forsøgte at måle elektronens magnetiske moment i komplekse atomer, hvis indre forhold ikke dengang var tilstrækkeligt afklarede.

Skulle systematiske fejl i bestemmelsen af elektronens magnetiske moment i de senere år være videreført fra eksperiment til eksperiment, kan det være næsten umuligt at få det afsløret. Den nuværende værdi er så etableret, at man kan have sin tvivl om, hvorvidt det overhovedet vil være muligt i dag at få publiceret resultatet af et nyt eksperiment, som strider kraftigt mod den accepterede værdi.

Endnu et forhold, som vi allerede har omtalt i forbindelse med Storebælt, angår kalibreringsproblematikken, hvor målte data bruges til at kalibrere en teoretisk model. De data, der bruges til kalibrering af den teoretiske model kan selvfølgelig ikke senere bruges til sammenligning af teori og eksperiment. Elektronens magnetiske moment er i dag så godt forstået, at man med fordel kan anvende dette eksperiment til at kalibrere kvanteelektrodynamikken. Denne teori afhænger af en atomar naturkonstant, finstrukturkonstanten, der er et mål for elektronens ladning. Det seneste eksperiment giver i dag langt den bedste bestemmelse af finstrukturkonstanten, og derfor kan eksperimentet ikke længere ses som en kritisk test af kvanteelektrodynamikken. Ved kalibreringen indføres der en cirkularitet, idet finstrukturkonstanten bruges i eksperimentets teoretiske underlag. Eksperimentet er imidlertid konstrueret således, at måleresultatet kun er meget svagt afhængigt af finstrukturkonstantens værdi. Cirkulariteten har derfor ingen reel betydning, fordi ubestemtheden i finstrukturkonstanten ikke forplanter sig til den målte værdi.

## Teoriladethed

En mere giftig og ukontrolleret form for cirkularitet optræder i højenergifysikken. Det idealiserede billede fra Fig. 2 får her yderligere problemer, idet teori og eksperiment ikke så let kan adskilles, som det var tilfældet i den sene fase af målingerne af elektronens magnetiske moment.

I højenergifysikken studeres stoffets mindste dele. Den høje energi er nødvendig for at skelne detaljer ved små afstande. Partikler med høj energi skabes i accelerators, der kan betragtes som en slags mikroskoper for atomkernernes indre. Som vi skal se, kan denne analogi med mikroskopi dog ikke føres helskindet igennem. Problemet er i korthed, at for at fortolke, hvad vi ser i "mikroskopet" kræves en stor del af det teoretiske bygningsværk, som mikroskopet skulle bruges til at udforske.

En accelerator er en maskine, hvori ladede partikler accelereres til høj energi og derefter bringes til at støde sammen med andre partikler. I disse sammenstød skabes der nye partikler, som detekteres af måleinstrumenter, og disse bruges til en analyse af sammenstødet og de kræfter, der var på spil. Siden Anden Verdenskrig har acceleratorerne undergået en rivende udvikling mod større og større energi med henblik på at trænge dybere ind i stoffet. De energier, partiklerne tildeles er i dag mere end tusind gange større end i 1960, og acceleratorernes størrelse er vokset i takt hermed. En af verdens største accelerators (LEP — Large Electron Positron collider) er 27 kilometer i omkreds og ligger mere end 100 meter under jorden uden for Genève. Her bringes elektroner og antielektroner (positroner) til kollision ved hastigheder meget tæt på lysets. Inden for de næste 10 år vil denne accelerator blive ombygget til i stedet at benytte protoner og antiprotoner, der kan gives endnu større energi. Da der ikke er planer om at bygge tilsvarende instrumenter andetsteds, vil den ombyggede accelerator (LHC — Large Hadron Collider) blive den eneste, hvor stoffets dybeste struktur kan studeres. Planerne for en noget større amerikansk accelerator blev endeligt skrinlagt i 1994.

Som vi så i diskussion af elektronens magnetiske moment, var den eksperimentelle diversitet — altså at forskelligt apparatur benyttedes til at måle samme størrelse — vigtig for troværdigheden af resultatet. Det er usandsynligt, at den samme systematiske fejl bliver gjort i radikalt forskellige eksperimentelle opstillinger. Men hvis der kun findes én accelerator i hele verden, hvor der foregår frontforskning i højenergifysikken, så kan man med en vis ret frygte, at systematiske fejl kan snige sig ind og reproducibiliteten gå tabt. Der kan opstå fejl, som ikke vil blive korrigeret i en overskuelig fremtid. Vi skal nu prøve på at udpege svaghederne i lidt større detalje.

Det er ikke helt rigtigt, at eksperimenter ikke kan reproducere, fordi der ved LHC bliver to adskilte eksperimentelle områder, hvor kollisioner kan finde sted. Problemet er imidlertid, at det er den samme accelerator, der bruges til begge eksperimenter, og hvad værre er, at der er stort overlap mellem de meget komplicerede computerprogrammer, der bruges til analysen. Ydermere kan en vis “cafeteria”-effekt ikke udelukkes, fordi eksperimentalfysikerne fra de to eksperimenter deler arbejdsplads, specielt det cafeteria, hvor snakken om eksperimenterne går. Alle disse faktorer svækker eksperimenternes uafhængighed.

I højenergifysikken har computeren siden midten af 60'erne været en uundværlig del af ethvert eksperiment. Et eksperiment ved LHC vil indeholde i tusindvis af mikroprocessorer, hvoraf nogle bruges til kontrol og andre til analyse. Et sådant eksperiment vil kunne producere mere end en million milliarder bits information per sekund, hvilket svarer til tyve trykte sider per menneske per sekund. Det er derfor ganske utænkeligt at opbevare denne information til senere analyse, og man må i stedet, under eksperimentets udførelse, foretage en meget hurtig udvælgelse af, hvilke data man gemmer.

Enhver selektion af data, som finder sted, før de nedfældes, for eksempel på et computertape, er i fare for at kaste information bort, som i virkeligheden angår den størrelse, man ønsker at bestemme. Man vil aldrig kunne gå tilbage og checke de rå data, når selektionen først er sket, og samtidig er der ingen vej udenom denne selektion på grund af de store datamængder. Eksperimentalfysikerne er bestemt opmærksomme på dette problem og forsøger at være så lidt forudindtagede i selektionen som muligt, for så vidt angår de



specifikke processer, man ønsker at studere. Men man udelukker uden tvivl sig selv fra at gøre uforudsete opdagelser i de rå data. Derfor er en accelerator ikke blot et stort mikroskop, der kan bruges til at se ind i den subatomare verden, men et instrument, der er designet til at studere forud valgte områder af denne verden, og som kan være blindt over for andre. Et eksperiment på en moderne accelerator kan ikke anvendes til en uspecificeret opdagelsesrejse i stoffets inderste natur, men er tvunget til at følge en forud lagt rute.

Efter at data er blevet selekteret og nedfældet er det opgaven at udvælge de relevante fysiske processer, signalet, blandt en mængde uinteressante baggrundsprocesser, støjen. I ethvert sammenstød mellem de accelererede partikler dannes der hundreder af nye partikler, hvoraf nogle giver anledning til spor, der registreres som et tredimensionalt billede i detektorerne, mens andre er usynlige. I selve kollisionsøjeblikket opstår der nye partikler, som for det meste er så kortlivede, at de gennemgår en kaskade af omdannelser, førend de bliver til de langlivede partikler, der kan ses i detektorbillederne.

Eksperimentet sigter mod at forstå, hvad der sker i selve kollisionsøjeblikket, medens billedet der opsnappes af detektoren repræsenterer situationen på et langt senere tidspunkt. Det kræver altid en massiv computerindsats at regne sig baglæns til de fænomener, man er interesseret i.<sup>1</sup> Men den teoretiske model for sammenstødet er tæt beslægtet med den teori, der bruges til at regne baglæns med. Det er uheldigt, fordi eksperimenterne på denne måde bliver afhængige af den teori, de søger at teste. Man forsøger så vidt muligt at undgå en sådan giftig tilbagekobling eller teoriladethed, som resulterer i en alvorlig systematisk fejl.

De computerprogrammer, som bruges til at beregne de primære fænomener fra de sene observationer, er overordentligt komplicerede [7]. De er et konglomerat af metoder og programlinier, hvis oprindelse fortaber sig i de generationer af phd-studerende, som i tidens løb har arbejdet med forskellige aspekter af programudviklingen. Det er tvivlsomt, om nogen enkeltperson i dag har fuldt overblik over programmerne og de systematiske metodefejl, der kan være bygget ind. Så længe der findes mere end et analysesystem, kan denne diversitet benyttes til at opnå større tiltro til beregningen, men desværre er tendensen, at der bliver færre og færre.

Udviklingen bevæger sig altså i retning af, at der kun bliver én accelerator, på hvilken der kan udføres eksperimenter ved ultrahøje energier, og kun ét program til at beregne de primære fænomener ud fra de observerede partikler. Det vil gøre det vanskeligt at overbevise sig selv — og resten af verden — om, at udviklingen i højenergifysikken hen ad vejen fører til elimination af de systematiske fejl.

## Sandhed eller konstruktion

En populistisk opfattelse af naturvidenskaben er, at objektive videnskabsfolk når frem til den endelige sandhed om naturens indretning gennem iagttagelser og logisk tænkning. I nyere tid er en diametralt modsat opfattelse, hvor videnskaben anses for at være en ren

---

<sup>1</sup>For nogle af de fundamentale partikler, som højenergifysikken i dag rutinemæssigt beskæftiger sig med, kvarker og gluoner, gælder det endda, at de aldrig er blevet observeret, og formodentlig slet ikke kan forekomme, i fri tilstand, men kun ses gennem deres omdannelse til strålebundter af sædvanlige kernepartikler.

social konstruktion, blevet udbredt. Ifølge denne opfattelse (se for eksempel ref. [6] for en generel diskussion) repræsenterer videnskabelige kendsgerninger slet ikke “det derude”, men er blot en vedtægt opstået i samspillet mellem videnskabsfolk og deres metoder under den sædvanlige udøvelse af erhvervet. Dybest set drejer striden sig om, hvorvidt videnskabelige resultater er objektive eller subjektive. I sin mest ekstreme form medfører det socialkonstruktivistiske synspunkt, at naturvidenskabelige erkendelser kan betragtes på lige fod med for eksempel de religiøse. Der er blot tale om forskellige vedtægter.

En af grundene til at en så ekstrem opfattelse kan vinde hævd, er, at man kan pege på teoriladethed i ethvert eksperiment. Intet eksperiment til bestemmelse af elektronens magnetiske moment er uafhængigt af viden om, hvorledes ganske almindeligt udstyr fungerer, for eksempel et voltmeter. Der er altid forudsat en mængde tavs viden, som sjældent bliver gjort eksplicit i praksis. Derfor bliver den reelle begrebsmodel for videnskabelig erkendelse mere kompliceret end den, vi har skitseret i Fig. 2. Der er altid en kobling mellem højre og venstre side, og hele systemet kan derfor se ud til at blive cirkulært og tabe jordforbindelsen. Som vi har omtalt i forbindelse med brugen af finstrukturkonstanten til kalibrering, er det en del af almindelig videnskabelig metode at kontrollere denne cirkularitet gennem kvantitative beregninger af størrelsen af den fejl, der herved begås.

Naturvidenskabens metode medfører en tendens til, at den retter sine fejl hen ad vejen, hvis den vel at mærke får lov til det. I denne artikel har vi gennemgået tre forskellige eksempler, som belyser naturvidenskabelig metode og argumentation med specielt henblik på dette spørgsmål.

I tilfældet Storebælt er det indlysende, at videnskaben kommer til kort overfor de politiske og økonomiske pres, den udsættes for. I sidste ende bliver den selvrensende proces kortet politisk ned, længe før end den har fået mulighed for at løbe til ende. Dertil kommer, at problemstillingen omkring vandmiljøet i Storebælt og tilgrænsende farvande er så kompleks, at det måske ikke er muligt at give et entydigt svar på konsekvenserne af broen, inklusive en god vurdering af de systematiske fejl.

Elektronens magnetiske moment er et skoleeksempel på videnskabens selvjustits overfor systematiske fejl. Gennem mere end 75 år er måleinstrumenterne blevet forfinet og fejl efter fejl blevet rettet. Der skal nok være flere fejl, men det tal, der kom ud af den seneste måling, nemlig 2.002319304376 med en usikkerhed på 9 på det sidste ciffer, ligner langt mere et objektivi udsagn om denne verden end en vedtægt. Ikke desto mindre må vi medgive, at en ung phd-studerende, som måtte komme frem med et signifikant andet resultat, ville geråde i konflikt med det etablerede forskningsmiljø og have meget svært ved at få det publiceret.

For højenergifysikkens vedkommede har vi peget på nogle indbyggede vanskeligheder, som vil blive forstærket fremover. Jo dybere denne videnskab trænger ind i stoffet, desto længere kommer dens resultater fra at være umiddelbart forståelige, og der stilles derfor langt større krav til teori, analyse og fortolkning. Der er tendenser til, at den teori, som er nødvendig for at fortolke et eksperiment, overlapper med teorien for det fænomen, eksperimentet sigter mod at udforske. Hvis de systematiske fejl ikke kan elimineres i højenergifysikken, fordi der ikke bliver bygget nye accelerators, eller fordi kompleksiteten bliver så stor, at teori og eksperiment ikke længere kan adskilles, kan det blive vanskeligt at opretholde den traditionelle, populistiske videnskabsopfattelse (at videnskaben altid

når frem til sandheden) for dette område (se for eksempel [8]).

De grænser for videnskaben, som vi har opridset i denne artikel, bestemmes af interesser udenfor videnskaben, problemets kompleksitet og indbyggede problemstillinger, såsom teoriladethed. Vi har benyttet konkrete eksempler fra fysikken, men vi gætter på, at analoge forhold gælder for andre discipliner. Videnskabens grænser og begrænsninger er en del af erkendelsesprocessen og kan hverken ignoreres internt i videnskaben eller i dens samspil med omgivelserne.

## Litteraturliste

- [1] H. Flyvbjerg og B. Lautrup: *Storebæltsbroen og Langelandsund*, Politiken, maj 1991.
- [2] H. Lilholt: *Fagfolk tvivler på Storebælts beregninger*, Ingeniøren, 22. februar 1991.
- [3] P. Galison: *How Experiments End*, The University of Chicago Press (1987).
- [4] B. Lautrup, A. Peterman, E. de Rafael: *Recent developments in the comparison between theory and experiments in quantum electrodynamics*, Physics Reports **3C**, 193 (1972).
- [5] T. Kinoshita: *Quantum Electrodynamics*, World Scientific Publishing Co., (1990).
- [6] W. Callebaut: *Taking the Naturalistic Turn or How Real Philosophy of Science is Done*, The University of Chicago Press (1993).
- [7] T. Sjöstrand: *Pythia 5.6 and Jetset 7.3*, CERN dokument (CERN-TH. 6488/92).
- [8] H. Zinkernagel: *Sociology of Science — Should Scientists Care?*, Indsendt til offentliggørelse (1996).