

Jan Tapdrup

Instrumenter og eksperimenters rolle i videnskabshistorien

Videnskabelige instrumenter og eksperimenter har spillet en afgørende rolle for naturvidenskabens udvikling, men deres vigtighed har ikke altid været reflekteret i historieskrivningen. I denne oversigtsartikel vil en række centrale spørgsmål vedrørende instrumenter og eksperimenter, såsom hvad et videnskabeligt instrument er, blive diskuteret. En meget generel oversigt over eksperimenters og instrumenters skiftende roller under forskellige historiske traditioner vil blive givet. Desuden vil en gennemgang af det ændrede perspektiv, man kan få på videnskabshistorien gennem instrumenter og eksperimenter, fremdrage karakteristiske instrumenter i forskellige perioder og deres relationer til videnskab og den bredere kulturhistorie. Betragtningerne vil begrænse sig til den del af videnskabshistorien, som omfatter astronomien, naturfilosofien, herunder de fysiske og kemiske videnskaber og matematikken. Blandt andre fag, som livsvidenskaberne, herunder fysiologi og anatomi, har instrumenter og apparater, såvel som kvantitativ og kvalitativ måling, spillet en tilsvarende vigtig rolle i diagnostik, behandling og teoriudvikling. Medicinske instrumenters udvikling har til tider gensidigt påvirket udviklingen af de øvrige videnskabelige discipliner, men har for det meste fulgt en selvstændig udvikling, bestemt af andre motivationsgrunde end den øvrige naturvidenskab, og medicinhistorien har udviklet sig selvstændigt fra den øvrige videnskabshistorie. Som følge heraf betragtes sådanne instrumenter og relationerne til medicinhistorie kun *en passant*.

1. Instrumenters og eksperimenters skiftende roller i videnskabshistorieskrivningen

Videnskabshistorie befinder sig i grænseområdet mellem naturvidenskab og humaniora. Selvom faget har naturvidenskab som genstandsområde, er det i bund og grund en humanistisk disciplin, nemlig historie. På grund af fagets historiske udvikling, har det dog for det meste været videnskabsmænd, der har tegnet disciplinen og har præget dens metodik. Som følge heraf har fokus ofte

været på det videnskabelige indhold frem for den bredere historiske kontekst. En instrumenthistorisk tilgang komplicerer situationen yderligere ved at inddrage genstande – *material culture* (som har meget til fælles med arkæologi), teknologi (teknologihistorie), eksperimentel praksis og dermed forbundne *tacit knowledge* (tavs viden). På trods af intentioner om en saglig tilgang, er videnskabshistorien ikke forskellig fra andre discipliner i og med den påvirkes af den tid, hvorpå den skrives. Det kan derfor ikke undre, at holdningen til eksperimenter og instrumenter i historieskrivningen har ændret sig gennem tiden. Videnskabshistorieskrivningen kan med henblik på instrumenter og eksperimenter groft set deles op i fire perioder.

I den første periode blev videnskabshistorien skrevet af videnskabsmændene selv. Denne type videnskabshistorie kan eksemplificeres gennem Joseph Priestleys *The History and Present State of Electricity with Original Experiments* (1767). Priestleys bog er mere en lærebog om elektricitet end en historiebog, men den beskriver den historiske udvikling som en fremadskridende kumulativ videnserhvervelse, der lige som anden viden, er med til at oplyse og civilisere mennesket. Opdagelserne af de videnskabsfolk, der skrev sådanne bøger, fremstod normalt som den hidtidige kulmination på udviklingen. Priestleys fremstilling lægger stor vægt på eksperimenter, apparater til fremstilling af elektricitet og instrumenter. Tilsvarende omtaler han opfindelsen af teleskopet, mikroskopet og optiske eksperimenter i *The History and Present State of discoveries relating to Vision. Light, and Colours* (1772). Den fremtrædende rolle af instrumenter og eksperimenter er typisk for sidste halvdel af oplysningstiden.

I den anden periode, som faldt i begyndelsen af dette århundrede, finder man, hvad der kan betegnes som positivistisk historieskrivning. I George Sartons *Introduction to the History of Science* (1927-1948) og med grundlæggelsen af det videnskabshistoriske tidsskrift *Isis* i 1913, som selv i dag er et af de førende videnskabshistoriske tidsskrifter, blev videnskaben beskrevet som værende i permanent fremgang og videnskabshistorien blev skrevet som en narrativ fortælling om store videnskabsmænd og deres akkumulering af sandhed. Pseudovidenskab ansås som at være en hindring for fremgang og civilisation, og nævntes kun med spot i sinde. Med tanke på den positivistiske distinktion mellem *begrundelseskonteksten* og *opdagelseskonteksten* (se Andersens artikel i dette nummer) er det ikke overraskende, at videnskabshistorie på dette tidspunkt fokuserede på den teoretiske udvikling, set ud fra nutidens videnskab (en såkaldt Whighistoriografisk tilgang), og ikke lagde megen vægt på eksperimenter og instrumenter.

I den tredje periode, fra 1920'erne til 1950'erne, var videnskabshistorien mere præget af en idéhistorisk tilgang. E.A. Burt og Alexandre Koyré opponerede mod adskillelsen af videnskab og filosofi, specielt gennem studier af videnskabsmænd i det 17. århundrede og den videnskabelige revolution i perioden fra Copernicus til Newton. Med Butterfields (1949) og Halls (1954) lærebøger blev videnskabshistorie etableret som en egentlig disciplin.¹ Man begyndte at forsøge at forstå tidligere tiders videnskab på dens egen præmisser (anti-Whig/diakronisk historiografi).² Eksperimenter spillede heller ikke en afgørende rolle i værker fra denne periode. I Alexandre Koyrés *Études Galiléennes* (1939) blev Galileis eksperimenter eksempelvis reduceret til tankeeksperimenter, idet Koyré antog, at Galileis mekanik måtte være funderet i begrebslige og teoretiske overvejelser.³

Siden 1960'erne, i den fjerde periode, har videnskabshistorien været i kraftig udvikling og er blevet præget af en øget professionalisme med dermed forøget historiografisk bevidsthed, men samtidigt er der sket en metodologisk diversificering. Der er sket et generelt skift i hovedfokus fra studier af de færdige teorier til studier af dannelse af teorier. Denne drejning kom efter udgivelsen af Thomas Kuhns *The Structure of Scientific Revolutions* (1962), hvori forskersamfundets betydning for videnskaben blev understreget. Kuhns bog blev, meget mod hans vilje, startskuddet til en sociologisk retning indenfor videnskabshistorie, som siden er blevet suppleret med videnskabsstudier og konstruktivistisk historieskrivning. Den traditionelle, såkaldte internalistiske, historieskrivningstradition fortsatte, til tider opponerede mod den nye eksternalistiske tilgang. Men den interne/eksterne distinktion vil de fleste steder i dag blive anset for at være forældet, idet begge tilgangsvinkler er nødvendige for at kunne beskrive dynamikken i den historiske udvikling. Videnskabsteoretiske og filosofiske diskussioner efterfølgende Kuhn, har også medført øget interesse for videnskabshistorien. Siden da er en række nye genrer også opstået, såsom den biografiske tilgang, foruden kvantitative evalueringsmetoder, såsom scientometri, og helhedsbetragtede systemer, såsom prosopografi. Inden for de fleste retninger er instrumenter og eksperimenter kommet til at spille en mere fremtrædende rolle. Specielt indenfor de sidste 20 år er eksperimenter kommet i søgelyset, hvilket også gælder for videnskabsfilosofien.⁴

Hvad er grunden til dette ændrede perspektiv på instrumenters og eksperimenteres rolle? De videnskabelige instrumenter, som ikke er blevet fortæret af tidens tand, findes i dag på museer, i private samlinger og på i al ubemærkethed på lofter i gamle bygninger. I modsætning til malerier og andre kunstgenstande

har videnskabelige instrumenter, indtil for nylig, ikke opnået høje priser ved auktioner og deres kulturhistoriske værdi har ikke været anset for at være stor.⁵ Som konsekvens af manglen på overblik over samlinger af videnskabelige instrumenter oprettedes i 1977 the *Scientific Instrument Commission* under the *International Union of the History and Philosophy of Science* med det formål at stimulere historiske studier af videnskabelige instrumenter, herunder produktionen af nationale fortegnelser over videnskabelige instrumenter.⁶ Siden da er kendskabet til instrumenter blevet forøget betydeligt, men de fleste studier har koncentreret sig om specifikke samlinger, instrumentmagere og om markedet for videnskabelige instrumenter (i fortiden). Ligeledes er der produceret flere nationale fortegnelser bl.a en dansk.⁷ Nogle museumsfolk har, ligesom videnskabshistorikere, været påvirket af teorifikseringen i videnskabshistorien og har kun i let grad været generet af instrumenternes tilstedeværelse på museerne. På andre museer har man følt sig mere generet af de besøgende, men der her er blev foretaget instrumenthistorisk forskning af høj kvalitet. Disse studier har tit begrænset sig til snævre instrument baserede studier. Sådanne meget specifikke ukontekstuelle undersøgelser har ikke blot ført til, at man har kunnet identificere instrumentmagere af usignede instrumenter, man har også, i begrænset omfang, kunnet få et indtryk af størrelsen af instrumentproduktionen fra værkstederne.⁸ Man kunne have forventet, at sådanne studier ville have stimuleret interessen for instrumenters betydning i videnskabshistorien, men dette ser ikke ud til at være tilfældet. Undersøgelserne har med få undtagelser hidtil været af for begrænset omfang til at få støvet til at løfte sig på andre steder end på museerne.

Museernes oprindelse har generelt set været under lup i de seneste 20 år.⁹ Den hidtidige opfattelse, at tidlige samlinger blot skulle være forløbere for museer, er nu blevet afkræftet. Betydningen af samlingers prestige, og vigtigheden af ædelstenes antagede mystiske egenskaber i forbindelse med samlinger i renaissance er blevet påvist og forbindelsen mellem udviklingen af taksonomier i naturhistorien (zoologien, botanikken og mineralogien) og dyre-, insekt-, mineralsamlinger og botaniske haver i det 17. og 18. århundrede er blevet påvist, men studier af tidlige instrumentsamlinger i sådanne brede perspektiver, er på nuværende tidspunkt ikke blevet foretaget.¹⁰ Mens man fra fransk side gerne havde set oprettelsen af Musée des arts et métiers i Paris i 1794 som oprindelsen til det moderne videnskabshistoriske museum, har man fra den anden side af kanalen argumenteret for, at det er Verdensudstillingen i London i 1851, der dannede model for sådanne museer.¹¹ Sidstnævnte argument er der en vis rime-

lighed i, da en del af de teknisk videnskabelige instrumenter fra Verdensudstillingen blev givet til South Kensington Museum, og senere blev udskilt som Science Museum i 1885, mens Musée des arts et métiers ikke førte til andre museer af samme type.¹² Sådanne studier har dog kun i begrænset omfang bidraget til instrumenternes generobring af deres retmæssige plads i videnskabshistorien.

Inddragelsen af instrumenterne i større videnskabshistorisk sammenhæng kom imidlertid fra ganske uventet hold, nemlig fra videnskabssociologerne. Hvordan skulle man også have forventet det? Sociologer beskæftiger sig, i deres eget besynderlige sprog, med sociale forhold og ikke med konkrete ting som instrumenter. Dette troede mange videnskabshistorikere i hvert fald før Steven Shapin og Simon Schaffer udgav *Leviathan and the Airpump* i 1985, hvori Robert Boyle og Robert Hookes eksperimentelle arbejde med luftpumpen i Royal Society beskrives fra et sociologisk synspunkt. Siden da er der fremkommet en del sociologisk og konstruktivistisk litteratur, som inddrager instrumenter og eksperimenter.¹³ Den sociologiske og konstruktivistiske litteratur beskæftiger sig, til forskel fra størstedelen af videnskabshistorien, endda med det 20. århundrede. En række værker, der både inddrager sociale og videnskabeligt fagspecifikke synsvinkler er også fremkommet. Allan Franklin har således i forbindelse med partikelfysik diskuteret, hvilken rolle eksperimenter spiller i at vælge mellem konkurrerende teorier, i at bekræfte teorier, og i at få forskere til at søge efter nyere teorier.¹⁴ Peter Galison har tilsvarende analyseret hvordan højenergieksperimenter ender.¹⁵ Sådanne studier er selv blevet hyldet af *hard-core* internalister. Men der er også fremkommet en række antropologiske studier af arbejdet i laboratorier af bl.a Bruno Latour, som har mødt mindre billigelse fra denne side.¹⁶ Harry Collins og Trevor Pinch har tilsvarende, fra en sociologisk synsvinkel, f.eks undersøgt Michelson-Morley eksperimenterne, kold fusion, detekteringen af gravitationelle bølger og eksperimenterne relateret til problemet med antallet af solneutrinoer.¹⁷

Eksperimenter og instrumenter er specifikt blevet behandlet i to nyere værker. I antologien *The Uses of Experiment* analyseres således, hvilke roller instrumenter spiller i eksperimenter, hvordan eksperimenter anvendes i videnskabelige argumenter, hvilken repræsentativ rolle eksperimenter har, nødvendigheden af eksperimenter og hvad der er kendetegnende for eksperimenter.¹⁸ Et helt nummer af *OSIRIS* omhandler tilsvarende instrumenter, herunder hvordan instrumenter anvendes til at give autoritet, hvem instrumenterne henvender sig til, hvordan instrumenter påvirkes af den kultur i hvilken de opstår, samt instru-

menternes rolle i livsvidenskaberne.¹⁹ Instrumenter og eksperimenteres betydning i videnskabshistorien betvivles ikke længere. Det søges istedet bestemt "hvordan instrumenter har medvirket til at bestemme og måske endda at definere videnskabens metoder og indhold". Instrumenter er flytte fra sidelinjen til frontlinien i videnskabshistorien.²⁰

2. Instrumenter og eksperimenter

I den hidtidige diskussion er det ikke blevet præciseret, hvad et videnskabeligt instrument er og hvad et eksperiment består i. I *The Uses of Experiment* findes der ingen generel diskussion af, hvad et eksperiment er. Men et eksperiment kan i første omgang opfattes som et forsøg, hvor man med instrumenter, apparater, eller andet udstyr aktivt (dvs. gennem kontrollerede manipulationer), søger at teste en hypotese eller eftervise resultaterne fra tidligere eksperimenter ved at ændre nogle variable og fastholde andre. Det er til gengæld overraskende vanskeligt at beskrive, hvad et videnskabeligt instrument er. Man kan både klassificere instrumenter efter type og efter anvendelse. Desuden anvendes begrebet videnskabeligt instrument både til at betegne en gruppe af artefakter, der findes på museer, og til at beskrive en bestemt type af apparater, som blev og bliver anvendt i videnskaben, i historisk analyse. Betegnelsen *videnskabeligt instrument* er et udtryk, der først er blevet anvendt relativt sent i videnskabshistorien.²¹ Man kan selvfølgelig argumentere for, at det kan være ligegyldigt, om man anvender en moderne betegnelse, så længe man er bevidst om forskellene fra dengang til nu – man anvender heller ikke sprog fra den tid på hvilken den videnskab man redegør for blev til. På den anden side skal man gøre sig klart at vores terminologi kan skjule den specifikke betydning instrumenter havde i den kultur de blev lavet og blev brugt. At betragte videnskabshistorien udfra vores videnskabsopfattelse regnes tilsvarende for at give et fordrejet billede af fortidens videnskab, der ville forhindre en forståelse af den udviklingsdynamik, som fandt sted.

Det er derfor rimeligt at betragte udviklingen af instrumenternes historiske kategorisering. På engelsk anvendtes i tidlige tider udtrykket *mathematical instruments* for instrumenter, der blev brugt til målinger, observationer og beregninger med praktiske formål i sigte. Disse blev i det tidlige 17. århundrede suppleret med *philosophical instruments/instruments of experimental philosophy*, som sigtede mod en kausal og teoretisk forståelse af naturen, foruden

optical instruments.²² Selv omkring 1800 fandtes ingen fællesbetegnelse for videnskabelige instrumenter. Selvom man fortsat anvendte betegnelserne matematisk instrument og filosofisk instrument i slutningen af det 19. århundrede, blev de brugt mindre og mindre til fordel for udtrykket *scientific instrument*. Oprindelsen af udtrykket *scientific instrument* er ikke klarlagt, men det synes først at have slået igennem efter Verdensudstillingen i London i 1851. På Fransk dukkede udtrykket *instrument des sciences* op tidligere – omkring 1787. Udtrykket blev først anvendt til at betegne geodætiske instrumenter og navigationsinstrumenter, men omkring 1830 blev det anvendt til at betegne forsknings- og avancerede undervisningsinstrumenter. Udtrykket *Wissenschaftliche Instrumente* blev introduceret i 1830 i forbindelse med undervisningsinstrumenter og anvendelsen var veletableret omkring 1850. Den bredere anvendelse af ordet videnskabeligt instrument vandt først indpas i England i anden halvdel af det 19. århundrede. Den opfattelse vi har af videnskabelige instrumenter i dag skal, som Deborah J. Warner argumenterer, derimod søges bl.a i arbejdet lavet af de folk, der organiserede samlinger, såsom museumsfolk, historikere og samlere.²³

Men hvad er et instrument? Ifølge Van Helden dækker ordet instrument over en række betydninger grupperet om begrebet værktøj eller anordning, og et videnskabeligt instrument er en anordning, som bruges af videnskabsmænd for at undersøge naturen kvalitativt eller kvantitativt.²⁴ En sådan definition dækker klart kun over en del af de apparater vi ser brugt gennem historien til “videnskabelige” formål. Det samme gælder James Clerk Maxwell’s funktionelle definition: Et apparat er “enhver ting, der skal bruges til at udføre et eksperiment” og et instrument er “et apparat, som er konstrueret specielt for at udføre eksperimenter”.²⁵ Robert T. Gunther, der var initiativtageren til og den første direktør for Museum of the History of Science i Oxford, der i dag har den bedste samling af videnskabelige instrumenter før 1700, anvendte en udtalt definition af videnskabelige instrumenter i indsamlingarbejdet til museet. Videnskabelige instrumenter inkluderede her værktøjer anvendt af dem, der så sig selv som videnskabsfolk, foruden undervisningsinstrumenter og instrumenter med mere praktiske formål. Denne holdning fik stor betydning for indsamlingspolitik på andre museer og dermed også for den forståelse af videnskaben, man kan få ved at anvende dennes materielle kultur – instrumenterne – på samme måde, som man bruger arkæologiske objekter til at erhverve viden om tidligere kulturer.²⁶

Definitionen af et videnskabeligt instrument som et eksperimentelt apparat er for snæver. Betegnelsen dækker over apparater, som anvendes til en lang række forskellige formål, som inkluderer: (1) apparater der anvendes til at frembringe

fænomener (såsom elektriskmaskiner); (2) modeller af eller analogier til naturen (som planetarier, eller glober); (3) apparater til udvidelse af sanserne (såsom teleskoper og mikroskoper); (4) måleinstrumenter (såsom mikrometre og tællere); samt (5) apparater til fremstilling af ekstreme forhold, såsom luftpumpen.²⁷ For instrumenter i dette århundrede kan det være nødvendigt at udvide begrebet instrument til *instrument-system* for at indicere kompleksiteten af instrumentet.²⁸ Forståelse af, hvad et videnskabeligt instrument er, vil skifte lige så meget som forståelsen af, hvad videnskab er. Derfor vil den være forskellig til forskellige tider og det mest holdbare synspunkt vil derfor være at opfatte apparater/instrumenter som videnskabelige instrumenter, hvis de blev opfattet af udøvere af videnskab på et givet tidspunkt som sådant, eller hvis de inkorporerer videnskabelige teorier.²⁹ En for restriktiv definition må under alle omstændigheder forsøges undgået, da den nemt kan komme til at reflektere vores opfattelse af videnskab.

3. Instrumenter og eksperimenter i videnskabshistorien

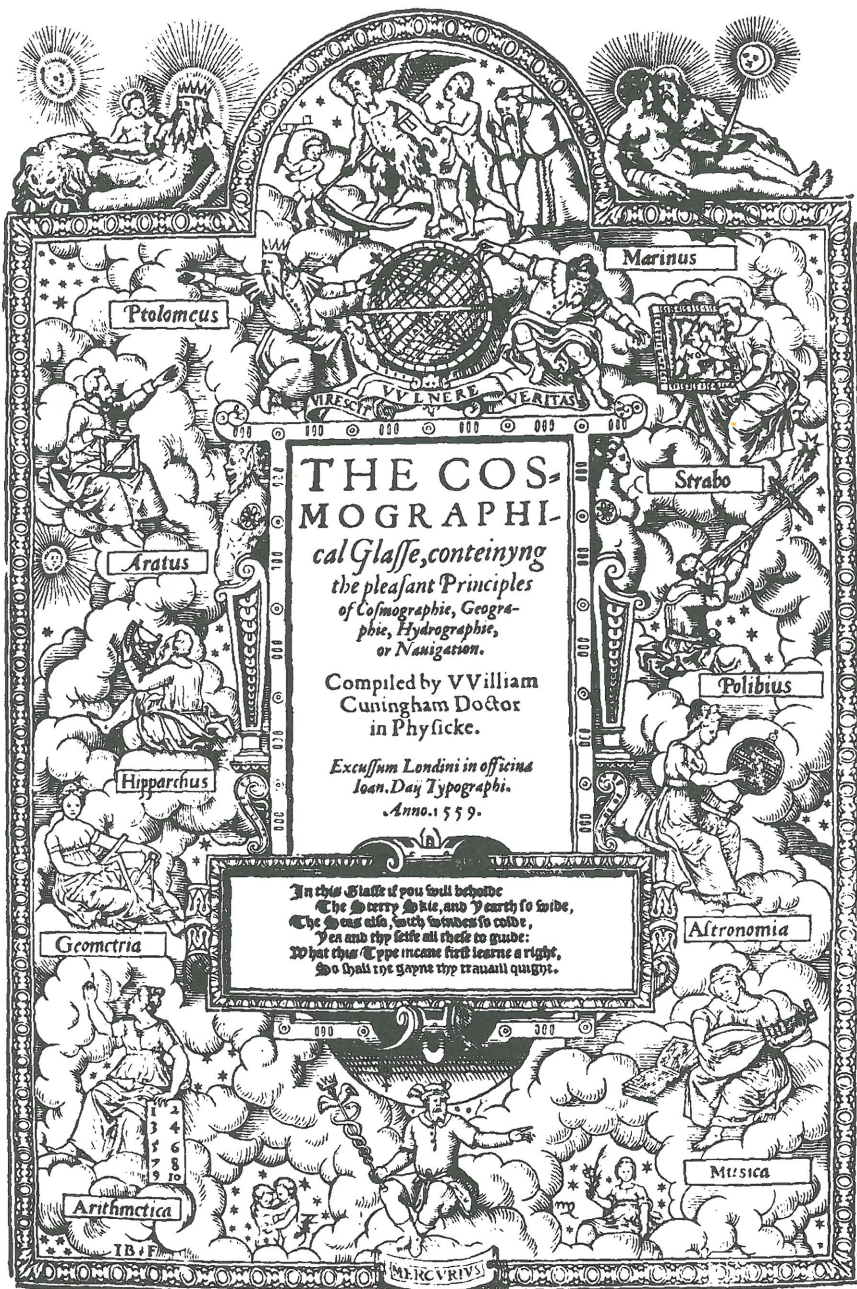
Instrumenter før det 17. århundrede kan med få undtagelser betegnes som matematiske instrumenter.³⁰ Spørgsmålet om matematiske instrumenters formål har været praktisk orienteret beregning eller at gengive virkeligheden kan ikke entydigt besvares, men meget taler for det første, altså at de matematiske instrumenter kun havde praktiske formål, uden at skulle undersøge naturen. De første matematiske instrumenter var astronomiske, og den bedste tidlige beskrivelse af sådanne instrumenter til opmåling af himmellegemernes bevægelser findes i Ptolemaios' *Almagest* (2. årh. e.Kr.), hvor armillarsfæren, den parallaktiske lineal, meridian cirklen, kvadranten og Hipparchs lineal beskrives. Astrolabiet var sammen med soluret, torquetum, og 1-2 yderligere astronomiske instrumenter blandt de første matematiske instrumenter.³¹ I det 16. og tidlige 17. århundrede, hvor markedet for matematiske instrumenter ekspanderede kraftigt, blandt andet på grund af forsøgene på at finde en metode til bestemmelse af længdegraden for skibe og ønsket om bedre landkort, var en række nye matematiske instrumenter kommet til, såsom teodolitten, målebordet, Jakobsstaven og universal astrolabiet.

Specielt de tidlige matematiske instrumenter er smukke messinginstrumenter, der må have været meget dyre at erhverve. Selvom disse teoretisk set kunne bruges til observationer, har de sandsynligvis i højere grad været anvendt til

undervisning, men først og fremmest var deres vigtigste funktion at øge ejernes prestige. En forbindelse mellem matematik, instrumenter og praktisk matematik blev etableret i renaissance. Undersøgelser af matematiske instrumenter fra denne periode viser, at de matematiske kunster og videnskaber udviklede sig som et samlet område omfattende astronomi, navigation, land- og søopmåling, tegning, arkitektur, perspektiv, fortifikation, ballistik osv.³² Disse fag havde et fælles grundlag såsom anvendelse og udvikling af instrumenter, projektioner og plancher; der var et fælles teknisk repertoire i instrumenterne og man anvendte den matematiske videnskab som en fælles retorik, som sikrede og understøttede de matematiske kunster.³³ Denne enhed af emner, man ikke har været klar over i tidligere, er fremkommet gennem instrumenthistoriske studier, og illustrerer styrken i denne tilgang til videnskabshistorien. Ved traditionel historieskrivning havde man f.eks separeret kartografi fra astronomi, navigation og perspektivlære.

Tycho Brahes anvendelse af instrumenter indenfor observationel astronomi i slutningen af det 16. århundrede er i standardværker blevet portrætteret som en revolutionerende nytænkning, der var lige så uventet som den nye stjerne, og som førte til en total forandring indenfor disciplinen. Et bredere perspektiv indenfor astronomisk praksis i perioden giver imidlertid et mere plausibelt billede af ham, som en del af en tradition, byggende på andres arbejde. Under sine studierejser i Central-Europa i 1562-1575 tilbragte Tycho tid i Augsburg, Basel, Wittenberg og Kassel, hvor han stiftede bekendtskab med en observationel tradition anført af Georg Peurbach og dennes elev Johannes Regiomontanus fra Nürnberg. Indenfor det 16. århundredes praktiske astronomi eksisterede således allerede ideerne om en ny observationel basis for astronomien, anlægelse af værksteder til produktion af instrumenter i forbindelse med observatorier, etablering af en trykpresse for at udbrede resultaterne af undersøgelserne, udvikling af nye instrumenter efter Ptolemaios' mønster og anvendelsen af ure i forbindelse med observationelt arbejde. Disse ideer blev tidligere tilskrevet Tycho, men det der adskiller Tycho fra de andre, kan man nu sige, er at han havde ressourcerne og styrken til at implementere det eksisterende program med hidtil uset præcision gennem hans instrument- og teoriudvikling. Hans resultater fremstår således som kulminationen af en observationel tradition før kikkertens fremkomst.³⁴

Det er generelt anerkendt, at et nyt syn på kosmos og en ny naturundersøgende tilgang til naturfilosofien var blandt de vigtigste ændringer i det 16. og 17. århundrede indenfor naturfilosofien. Denne nye tilgang, som bl.a Robert Hooke



Figur 1: En enhed mellem de matematiske discipliner og instrumenter etableredes i renaissance – her illustreret på titelbladet til William Cunningshams *Cosmographical Glasses* fra 1559.

var en fremstående eksponent for, var baseret på en eksperimental praksis og en korpuskulær naturfilosofi; man kombinerede nu en matematisk-mekanisk naturfilosofi med en handlekraftig eksperimental metode. Historikere er imidlertid ikke er enige om grundene til denne forandring af naturfilosofien.³⁵ Nogle forskere har afvist at man kan finde en grund til den nye eksperimentalfilosofis fremkomst. Men blandt de hidtidige glimrende forslag om kilderne til naturfilosofiens ændringer, der dog er fremkommet, såsom antik atomisme, den hermetiske tradition, den paracelsiske kemiske tradition, universiteterne osv. findes endnu bedre modargumenter og mangler.³⁶ Ingen af disse forslag kan således give en tilfredsstillende forklaring på eksperimentalfilosofiens fremkomst.

Jim Bennett har imidlertid foreslået, at der blandt de nye matematiske instrumenter, der fremkom i det 16. århundrede indenfor navigation, kartografi, landmåling og astronomi, var nogle, som trængte ind på naturfilosofiens område, og som med tiden førte til reformen i naturfilosofi, gennem at anvende de praktiske matematikers teknikker.³⁷ Der er to hovedområder, hvor naturfilosofien og den matematiske filosofi mødtes: navigation og astronomi. Keplers anvendelse af matematiske metoder med et naturfilosofisk sigte er forholdsvis velkendt, men dette gælder ikke undersøgelserne af jordmagnetismen, der opstod som konsekvens af problemer indenfor navigation. Sejlads på verdenshavene var en farefuld affære, ikke blot på grund af skibene, vindene og manglende kortlægning, men også på grund af længegradsproblemet. Længegradsproblemet var et væsentligt problem for de vestlige søfarende nationer. Man kunne let bestemme breddegraden, men en effektiv metode til fastlæggelse af skibenes længdegrad havde man ikke. I en navigations manual af Martin Cortés, der blev oversat til engelsk i 1561 som *The arte of navigation*, blev det foreslået, at kompasnålen rettede sig mod et punkt et stykke væk fra den geografiske pol, hvilket betød, at den magnetiske variation ville være relateret til længdegraden. Det førte til banebrydende studier af jordmagnetismen af Robert Norman i *The newe attractive* (1581), hvor et inklinationskompas – et ombygget astrolabium udstyret med en magnetnål, som skulle måle den vertikale komponent af jordmagnetismen – beskrives. Normans mål var at søge “en teori eller hypotese og regler for grundene til de tilsyneladende irregulariteter i variationen”.³⁸ Dette var altså et instrument, der sigtede mod at afklare et naturfilosofisk spørgsmål. En tilsvarende fremgangsmåde ses hos William Gilbert i *De Magnete* (1600), i hvad der anses for at være en af de første systematiske undersøgelser af magnetismens egenskaber, og som blev et vigtigt forbillede for eksperimentalfilosofien i England.

Navigation, længdegradsproblemet og geomagnetisme, som mødested mellem matematik og naturfilosofi, fortsatte med at skabe interesse hos de praktiske matematikere, der var tilknyttet Gresham College i London, som var centret for matematisk naturfilosofi og som senere førte til oprettelse af Royal Society. Allerede i 1633 stod kredsen omkring Gresham College til talsmænd for, at matematik skulle være en model for reform i naturfilosofien. Det var også i Royal Society, at der blev udført eksperimenter med luftpumpen, specielt af Robert Boyle og Robert Hooke, som førte til ophedede debatter med specielt Thomas Hobbes, der på dette tidspunkt ikke var kendt som politisk filosof, men som naturfilosof. Boyle og de andre eksperimentalfilosoffer forsøgte at formulere en epistemologisk basis for eksperimenter, men Hobbes protesterede bl.a. med, at naturfilosofi skal give svar på, hvad der er årsag er til fænomener, hvilket Hobbes pumpe ikke gjorde, den producerede blot kendsgerninger.³⁹

Den traditionelle teorifokuserede historieskrivning, eksemplificeret ved Butterfield, anså kemi for at være tilbagestående i forhold til den øvrige "naturvidenskab". Den revolution man havde set i det 17. århundrede indenfor fysikken kom indenfor kemi, ca. hundrede år forsinket, med Lavoisier i 1789. Opfattelsen af tidlig kemi og alkymi er indenfor de sidste ti år blevet betydelig mere nuanceret og kemiens rolle som del af naturfilosofien, blandt andet gennem Robert Boyles arbejde, er blevet belyst.⁴⁰ Den revolutionære opfattelse, som Lavoisier i stærk grad selv bidrog til, er blevet nedtonet, og tidligere kemikers arbejde med affinitetstabeller og udvikling af det kemiske sprog, som en forudsætning for Lavoisiers arbejde, er blevet anerkendt. Selvom kemi har en relativ obskur plads indenfor instrumenthistorien, blandt andet på grund af at kun få af de tidlige kemiske instrumenter, der ofte bestod af glas, har overlevet og aldrig har været samlet på samme måde, som de fine matematiske instrumenter, har studier af laboratorier og apparater bidraget til opfattelsen af kemi, som en integreret del af naturfilosofien og har vist en langt større kontinuitet indenfor den kemiske praksis før og efter Lavoisier end ellers antaget. Den udvikling af vægten, man så i det 18. århundrede, var således nødvendig for at Lavoisier kunne give dette instrument, sammen med gasometeret og kaliometeret en central plads i hans nye tilgang til kemi, hvor kvantitative målinger spillede en central rolle.⁴¹

Vekselvirkningen mellem instrumenter, opdagelser, filosofi og samfundsforhold er også et vigtigt aspekt af videnskabens udvikling. Astronomien ændredes radikalt få år efter Tycho's død med Galileis anvendelse af teleskoper til observationer af Jupiters måner og bjerge på månen. Teleskopet og kikkerten repræsenterede

terede sammen med mikroskopet en ny type instrumenter, de optiske instrumenter, der hverken var matematiske eller filosofiske.

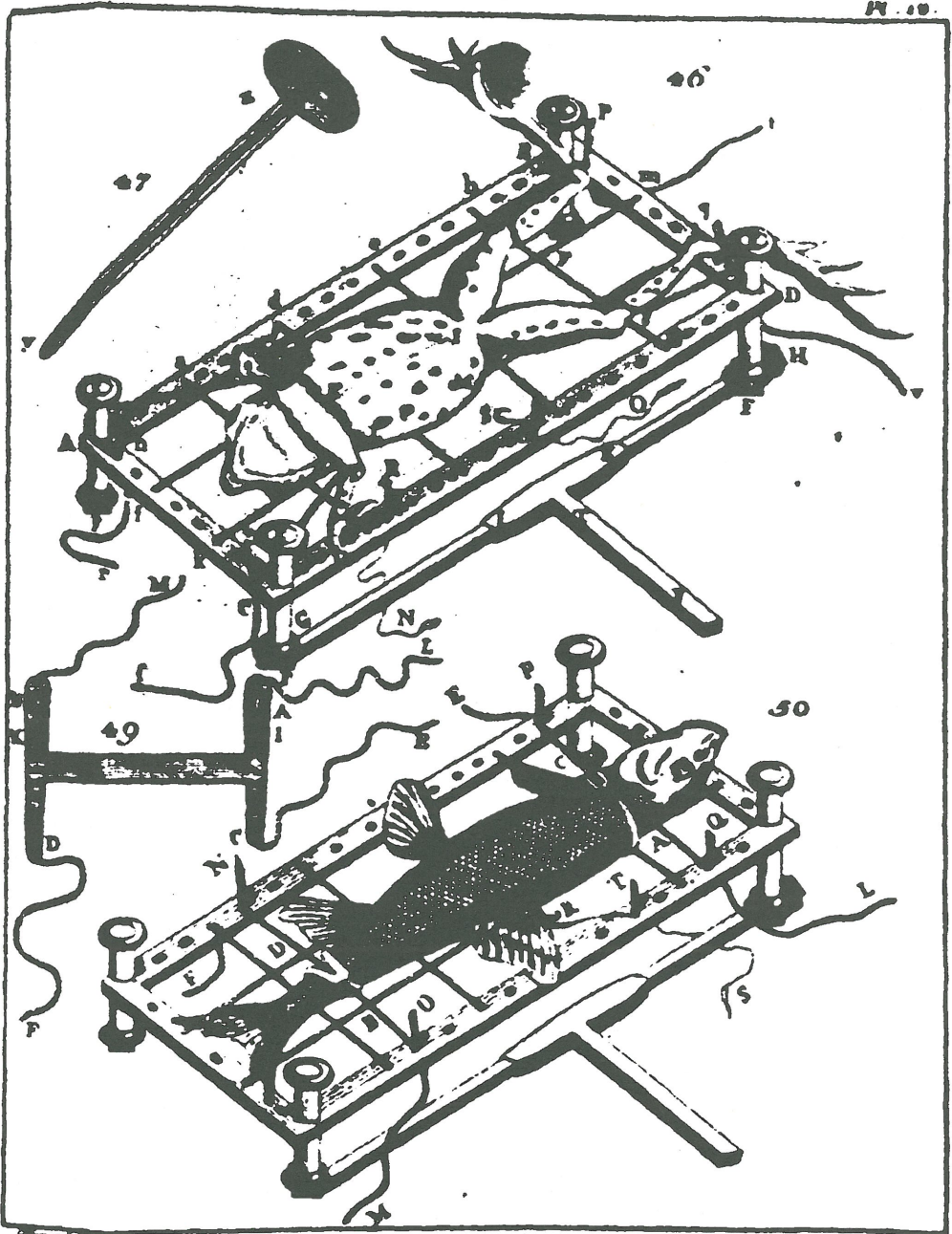
Ophavsretten til kikkerten er blevet diskuteret lige siden dens opfindelse i det 17. århundrede. Konvekse linser fandtes allerede i det 13. århundrede og konkave linser begyndte at komme frem i det 15. århundrede. Grunden til at kikkerten ikke dukkede op før, kan skyldes glassets manglende kvalitet. Men hvad skal man lægge til grund for at kunne hævde, at kikkerten i det hele taget blev opfundet? Van Helden har foreslået, at spørgsmålet om kikkertens oprindelse kan reduceres til spørgsmålet: Hvem fik først ideen og begyndte at tilpasse og forbedre brilleglas for at opnå størst mulig forstørrelse? Det ser ikke ud til, at man kan besvare dette spørgsmål ud fra eksisterende kildematerialer, men det synes at være hollandske brillemagere, der omkring september 1608 fik ideen.⁴² Selvom Galileis teleskop i dag betragtes som det første astronomiske teleskop, blev det oprindeligt fremlagt som et militært hjælpemiddel. Fra starten blev det betvivlet om teleskopet viste reelle fænomener, eller om det man så var en illusion. Disse diskussioner om teleskopets autoritet skal både ses på baggrund af instrumenternes yderst ringe optiske kvaliteter – hvad kunne man i det hele taget se? – og det usædvanlige i at et instrument blev anvendt til at udtale sig om verden. Det var dog forholdsvis enkelt at demonstrere, at de observationer man gjorde på jorden, viste virkelige fænomener. Dette fik blandt andre Galilei til at antage, at det samme gjorde sig gældende for observationen af himmelske fænomener.⁴³

Mikroskopet blev ligesom teleskopet opfundet omkring år 1600, men for det første var billedkvaliteten elendig og for det andet havde man ikke en referenceramme svarende til teleskopets. Linserne var små og både svære at lave og bruge, sfærisk og kromatisk aberration forvrængede billederne og fokuseringsmekanismerne var for primitive til, at man kunne få et klart billede. I endnu højere grad end med teleskopet, havde man mistanke om, at mikroskopet forvrængede virkeligheden – hvordan kunne man også vide, om linserne ikke skabte disse fænomener, når man ikke kunne se dem på anden vis? I midten af det 17. århundrede med fremkomsten af den mekaniske filosofi, hvor mikroskopiske korpuskler blev inddraget til at forklare makroskopiske fænomener, fik man den begrebsmæssig ramme, som muliggjorde tanker om mikroskopiske fænomener. Robert Hooke søgte i *Micrographia* (1665) desuden at argumentere for, at mikroskopet blot forbedrede de Gudgivne sanser. Men selv i 1746 bemærkede instrumentmageren George Adams, at mikroskoper kun havde liden underholdningsværdi og i virkeligheden ikke kunne bruges til noget⁴⁴. Dette

ændredes først med J.J. Listers akromatiske objektiv fra 1830erne, som efter et stykke tid drastisk forbedrede kvaliteten af billederne. En vældig udvikling begyndte, der førte til skabelsen af mere eller mindre lærde selskaber for mikroskopi, specialiserede publikationer og konversationer og *soirés* helt tilegnet diskussioner om mikroskopi. Denne populære interesse fra det ekspanderende højere borgerskab i England, der kunne leve af deres formue, havde stor indvirkning på instrumentets tidlige udviklingshistorie, bl.a gennem skabelsen af et florerende marked for instrumenter og deraf følgende konsekvenser for andre felter gennem skabelsen af specialiserede instrumentværksteder. Mikroskopien fik bl.a indvirkning på forståelse af blodets cirkulation i det 18. århundrede, idet man selv kunne se dette på dertil indrettede frø- og fiskeplader under mikroskopet (se fig. 2), og havde afgørende betydning for udviklingen af bakterie teoriens opståen i det 19. århundrede og dermed følgende forståelsen af offentlig sundhed.⁴⁵ De øvrige optiske instrumenter indenfor navigation og landmåling gennem gik en tilsvarende forbedring.

Blandt de nye eksperimentale naturfilosofiske instrumenterne i det sene 17. århundrede finder man også barometeret, termometeret og elektrisermaskinen. I det 18. århundrede gennemgik elektrisermaskinen og studiet af elektriciteten eksempelvis en rivende udvikling, hvis hastighed kan sammenlignes med computerens i dag. I begyndelsen af århundredet kunne Robert Hooke frembringe elektricitet med en roterende glaskugle, men det er først med plademaskinens forbedring i 1740erne og opdagelsen af Leydnerflasken (en tidlige type kondensator) omkring 1745, at store gnister kunne frembringes. Kun få år herefter eksploderede interessen for elektricitet. Elektricitet blev diskuteret i den højere middelklasse i 1790erne, man teoretiserede, lavede seriøse forsøg, udviklede måleinstrumenter (der dog ikke kunne lave absolutte målinger før ca. 1850) og søgte at anvende elektricitet til medicinske formål. Omkring 1785 kunne man frembringe mere end 300.000 volt med en elektrisermaskine, men da skiftede interessen til atmosfærisk elektricitet og dermed til detekteringen af yderst små mængder elektricitet⁴⁶. Opdagelsen af Voltasøjlen i 1799 (forløberen for det moderne batteri) var kun mulig på grundlag af denne interesse for små mængder elektricitet. Voltasøjlen og Voltaisk elektricitet (den konstante strøm) kan ses som kulminationen på et århundrede med en uhørt udvikling indenfor elektriciteten.⁴⁷

Instrument- og eksperimentudviklingen i det 19. århundrede påvirkede gensidigt den øgede industrielle- og teknologiske udvikling. For eksempel – vigtige gennembrud indenfor elektromagnetisk induktion i 1830erne førte til de



Størrelse stor 46.

Figur 2: Mikroskopi af levende frøer og fisk fik betydning for forståelsen af blodkredsløbet. Fra George Adams *Micrographia illustrata* - 4. udgave 1771.

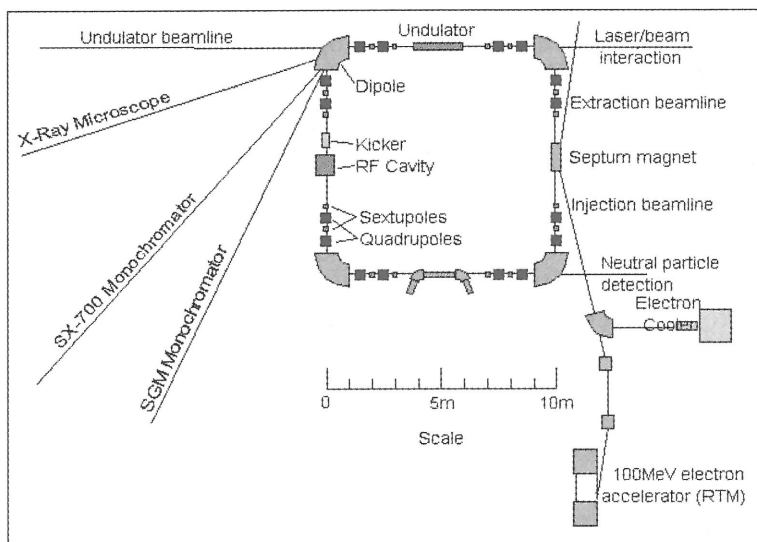
første større teknologiske anvendelser af elektricitet. Elektrostatisk forskning i det 18. århundrede havde ikke ført til vigtige anvendelser, men nye laboratorieinstrumenter for konstant strøm i det 19. århundrede havde potentiale for praktisk anvendelse og nye teknologier blev udviklet i 1830'erne indenfor kabelteknologi, elektriske ure og buelamper, som i 1850'erne efterfulgtes af magneto-elektriske maskiner (dynamoer), som bl.a. anvendtes til galvanostegi og oplysning af huse med buelamper. På dette tidspunkt var laboratorieinstrumenter begyndt at spille en stor rolle, og man begyndte at løse problemer med elektriske enheder, sammenligning mellem forskellige typer af elektriske måleinstrumenter, kalibrering og gentagelse af målinger.⁴⁸ Det var dog først i den sen-victorianske periode, at ingeniører påviste voltmeterets og amperemeterets troværdighed som et fælles industriel energimål i forbindelse med kommerciel energidistribution.⁴⁹

Forholdet til instrumentmagerne ændredes fra 1850 og opefter. Mens instrumentmagerne i det 18. århundrede havde stor autonomi og prestige, deltog videnskabsmænd og ingeniører nu, ligesom videnskabsmændene i tidlig tid, mere aktivt i en del af instrumentproduktionen, og instrumentmagerens rolle formindskedes. En anden del af produktionen prægedes i højere grad af øget industrialisering og globalisering. Med den øgede skole- og universitetsundervisning i fysik og kemi, voksede en ny industriel produktion af undervisnings- og laboratorieinstrumenter frem. Denne har, lige som den øvrige instrumentproduktion og udvikling i anden halvdel af det 19. århundrede, kun i ringe grad været studeret.⁵⁰ Man kan observere en tilsvarende vækst i antallet af instrumenter anvendt i industrielle laboratorier, men dette er mere udtalt i det 20. århundrede.

De videnskabelige forandringer, som tog fat i slutningen af sidste århundrede med opdagelsen af røntgenstråler og radioaktivitet, var i høj grad en konsekvens af brug af eksperimenter og instrumenter. Samtidigt ændrede instrumenters og eksperimenterens karakter. I slutningen af sidste århundrede kunne eksperimenter, såsom røntgeneksperimenter, laves af de fleste videnskabsmænd ved at sammensætte standardinstrumenter, som ethvert rimeligt veludrustet laboratorium var i besiddelse af. Men i dag er nogle eksperimenter så komplicerede, at de involverer flere tusinde delsystemer og vedligeholdes og udvikles af flere hundrede forskere, ingeniører og teknikere, hvilket har medført begrænsninger i mulighederne for at kunne gentage forsøg. Med sådanne systemer er det mere rimeligt at tale om instrumentale systemer end instrumenter.⁵¹

Instrumenters karakter forandredes radikalt i det 20. århundrede. Førhen

kunne man se, hvad et instrument skulle bruges til og forskeren kendte funktionen og principperne bag de enkelte instrumenter i en opstilling. Men i dag er instrumenter ofte en kasse med elektronik, hvis formål og tilknytning til fænomenet, ikke er umiddelbart gennemskueligt. Man anvender udtrykket *sorte bokse* til beskrivelse af sådanne *lukkede instrumenter*, hvis interne struktur og detaljerede interne funktion ofte er ukendt for brugerne. “Denne materielle og psykologiske uigennemtrængelighed af sorte bokse har ført eksperimentale videnskabsfolk væk fra den *hands on* tilgang, som tidligere var normalt”.⁵²



Figur 3: Komplexiteten af instrumentale systemer i det 20. århundrede har nødvendiggjort skematiske repræsentationer af dem. Her ses ASTRID accelerator-komplekset ved ISA, Institut for Fysik og Astronomi ved Aarhus Universitet.

I beskrivelsen af den historiske udvikling af komplicerede systemer anvendes udtrykket *black boxing* (eller lukning af de sorte bokse) desuden til at betegne processen, hvorved et apparat overgår fra selv at være undersøgelsesobjekt til at blive et instrument, idet det accepteres at der er konsistens mellem modellen for, hvordan apparatet virker, og det fænomen der studeres.⁵³ Sociologiske, antropologiske og konstruktivistiske studier af, hvordan en konsensus om forklaringen af hardware etableres, har sat fokus på instrumenters teoriladethed. Latour og Galison har søgt at udtrykke dette gennem begreberne *tekno-*

videnskab og teknologiske antagelser.⁵⁴

Det har endvidere været nødvendigt at udvikle nye metoder til visualisering af fænomener på grund af forandringer i instrumenters karakter og på grund af den usynlige karakter af de observerede fænomener.⁵⁵ Indtil 1920-30 anvendtes optiske instrumenter, hvor man gjorde brug af et viserinstrumenter og det menneskelige øje. Farver, intensiteter, tal osv. blev observeret, afveje og analyseret med øjet. I dag detekteres, behandles og måles signaler og fænomener af enhver type apparater elektronisk og øjet bruges udelukkende til diagnose og mønstergenkendelse af tabeller, grafer eller computer billeder. I modsætning til traditionelle instrumenter, som teleskoper og mikroskoper, der til en hvis grad kan siges at være passive, og ikke vekselvirker med fænomenerne, er situationen desuden langt mere kompliceret indenfor kvantefysik, hvor det er anerkendt at observator har indflydelse på observationen.⁵⁶

Omkostningerne og størrelsen af *Big Science* instrumenter, specielt indenfor højenergifysik og astronomi gør, at bestemte forsøg eller målinger kun kan foretages på et begrænset antal steder.⁵⁷ Adgangen til sådanne steder må forhandles med forskergrupper, da individer ikke længere kan styre sådanne instrumentkomplekser. Da man må købe observationstid er det blevet hævdet, at *Big Science* er en "markedsbevidst, produktorienteret og kapitalt intensiv aktivitet, som i modsætning til *Little Science* har fået samme upersonlige og umenneskelige karakter som et industrielt foretagende"⁵⁸. På grund af de store omkostninger er finansiering af projekterne blevet en væsentlig faktor og inddragelsen af politikere, industrien, banker og velgører er blevet en væsentlig del af forskning. "... store instrumenter er nu statussymboler, der symboliserer magt, rigdom, videnskabelig og politisk indflydelse."⁵⁹ på sammen måde som de matematiske instrumenter i Renaissance gjorde. Ud fra sådanne betragtninger er det ikke overraskende, at studiet af *Big Science* i det 20 århundrede har tiltalt sociologerne.

4. Konklusion

Udeladelsen af instrumenter og eksperimenter fra den generelle videnskabs-historie er lige så fordrejende som tilsidesættelsen af videnskaben i den generelle kulturhistorie. Beskrivelsen af instrumenter og eksperimenteres rolle i videnskabshistorien er under stadig tiltag, men der er utilfredsstillende få studier, der

i tilstrækkelig grad beskriver vekselvirkningen mellem teorier, eksperimenter og instrumenter i bred sammenhæng. Blandt de få studier, der er foretaget, er størstedelen foretaget fra en sociologisk synsvinkel, der ofte har karakter af at være lokale studier, der ikke har den generaliserede karakter, der kan være ønskeligt ud fra et historisk synspunkt.

Museernes potentiale som kilder for videnskabshistorien er endnu ikke blevet opdaget af mange videnskabshistorikere.⁶⁰ Som videnskabshistorien har skiftet fokus fra teori til praksis er "laboratorier, discipliners etablering, autoriteters etablering, politik, bureaukrati, kommunikation, [og] uddannelse" blevet centrale.⁶¹ Som konsekvens heraf bør man studere de ting, man anvender i laboratorier og til uddannelse. Museernes samlinger kan her betragtes som primærkilder og bør bruges som sådanne. At de fleste instrumenter efter ca. 1750, som er indsamlet på museer, ikke er forskningsinstrumenter, men instrumenter, som har været brugt til uddannelse – i laboratorier til øvelser eller til fremvisninger under forelæsninger – i industrien og handel eller som underholdning, kan medvirke til at udvide perspektivet på videnskab. Det er ikke de heroiske individers videnskab, men videnskab som del af samfundslivet, der reflekteres. En del af materialet er allerede serveret på et sølvfad gennem studier af museumsfolk og instrumenthistorikere, hvis arbejde til tider nedladende er blevet karakteriseret som antikvariske studier af instrumenter.

Der har i de seneste ti år været en tendens til at museer er blevet brugt til stimulere interessen for naturvidenskab, hvilket er ganske prisværdigt. Dette bør dog ske på et historisk forsvarligt grundlag, uden at man omdanner museerne til videnskabelige forlystelsesparker. Museer som forskningsinstitutioner bør på den anden side ikke være en undskyldning for dårlig formidling. Det er vigtigt bevare, indsamle og studere museernes righoldige historiske forskningsmateriale, bl.a fordi disse er en vigtig kilde til forståelse af videnskabens historie.

Noter

1. Butterfield, Herbert, *The Origins of Modern Science, 1300-1800* (London: Bell & Hyman, 1949). Hall, A. Rupert, *The Scientific Revolution 1500-1800: the formation of the modern scientific attitude* (London: Longmans, Green & Co., 1954).
2. Se Kragh, Helge *An Introduction to the Historiography of Science*(Cambridge:Cambridge University Press, 1987) – specielt kap. 9.
3. *Instruments, OSIRIS* vol. 9 (1994), Albert van Helden and Thomas L. Hankins (eds.) (Chicago: Chicago University Press), s.1-3.
4. Se for eksempel Hacking, Ian, *Representing and Intervening*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1983).
5. Denne situation er ved at ændre sig. Et Erasmus Habermel astrolabium lavet til Parmas hertug, der ganske vist var af enestående kvalitet blev i 1995 solgt for 550.000 pund ved Christie's i London og ved en Christie's auktion i foråret 1998 blev mange af instrumenterne solgt for mere end tre gange vurderingsprisen.
6. Anderson, R.G.W. & Turner, G.L'E. *An Apparatus of Instruments: The Role of the Scientific Instrument Commission* (London: The Scientific Instruments Commission, 1993).
7. Andersen, Hemming, *Historic Scientific Instruments in Denmark*, Matematiske-fysiske Meddelelser vol. 44:2, Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. (København: Munksgaard, 1995).
8. Se f. eks Turner, G.L'E. *The three Astrolabes of Gerard Mercator* i *Annals of Science*, vol.8. 51 (1994), s. 329-353. Turner har ligeledes forsøgt at vurdere instrumentproduktionen af Nairne and Blunt i *The Numbercode on reflecting telescopes by Nairne and Blunt* in *J.Hist.Astr.* (1979) og af James Short in *The London trade in scientific instrument-making in the eighteenth century* in *Vistas in Astronomy*, vol. 20 (1976), s. 173-82. Størrelsen af luftpumpeproduktionen på Musschenbroek værkstedet i Holland er vurderet af de Clercq, Peter i *At the Sign of the Oriental Lamp. The Musschenbroek workshop in Leiden, 1660-1750*. (Rotterdam: Erasmus Publishing, 1997), s. 175-178.
9. Se for eksempel Impey, Oliver & MacGregor, Arthur, *The Origins of Museums* (Oxford: Clarendon Press, 1986).
10. Jardine, Lisa, *Worldly Goods* (London: Macmillan, 1996). Turner, G.L'E. *The Cabinet of Experimental Philosophy* s. 214-222 i Impey & MacGregor *op. cit.*
11. Bennett, J.A., *Science at the Exhibition* (Cambridge: The Whipple Museum, 1983), Bennett, J.A. *The New Age: A Guide to the Exhibition* (Cambridge: The Whipple Museum, 1994), Butler, S., *Science and Technology Museums*, (Leicester & New York: Leicester University Press, 1992).
12. Verdensudstillingen giver iøvrigt en glimrende indsigt i det teknologiske/instrumentale niveau i 1851, både fra et tekniske synspunkt og ud fra, hvilke lande, der var førende mht. denne udvikling. Se også Margit Mogensen, *Eventyrets tid. Danmarks deltagelse i Verdensudstillingerne 1851-1900* (Odense: Landbohistorisk Selskab, 1993).
13. Golinski, Jan, *Making Natural Knowledge* (Cambridge: Cambridge University Press, 1998).
14. Franklin, Allan, *The Neglect of Experiment*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1986).
15. Galison, Peter, *How Experiments End* (Chicago & London: University of Chicago Press, 1987).
16. Latour, Bruno, *Science in Action: How to Follow Scientists and Engineers through Society* (Cambridge MA: Harvard University Press, 1987). Latour, B. & Woolgar, S. *Laboratory Life. The Construction of Scientific Facts* 2nd ed. (Princeton: Princeton University Press, 1976/1986).
17. Collins, Harry & Pinch, Trevor *The Golem. What Everyone should know about Science* (Cambridge: Cambridge University Press, 1993).
18. *The Uses of Experiment. Studies on the Natural Sciences.*, David Gooding, Trevor Pinch, Simon Schaffer (red.) (Cambridge: Cambridge University Press, 1989).
19. *Instruments, OSIRIS* nr. 9 *op. cit.*

20. *Ibid.* s.6.
21. Warner, Deborah Jean, *What is a scientific instrument, when did it become one, and why?* Essay Review, *British. J. Hist. Science* (1990), vol. 23, s. 83-93.
22. Betegnelse "Models and Philosophical apparatus" blev først anvendt af Samuel Hartlib i et brev til Robert Boyle i 1649. Citeret i Wild, Charles *A History of the Royal Society* (London, 1848, vol. i, s.53) refereret af Warner *op.cit.* s.83. Warner bemærker også at Nehemiah Grew, som havde katalogiseret Royal Societys samlinger i 1681, beskrev en del af disse som "Instruments relating to Natural Philosophy" (*ibid.*)
23. Warner *op.cit.* s. 83.
24. Van Helden, Albert, *The Birth of the Modern Scientific Instrument* i *The Uses of Sciences in the Age of Newton*, John Burke (ed.), (Berkeley & London: University of California Press, 1983), s. 49-84.
25. Maxwell, J.C., *General Considerations Concerning Scientific Apparatus* i *Handbook to the Special Loan Collection of Scientific Apparatus*, (London: South Kensington Museum, 1876), s. 1-21. Citeret i Warner *op. cit.* s. 88.
26. Warner *op. cit.* s. 91-92.
27. Denne liste er delvist fremstillet på grundlag af Van Helden & Hankins *op. cit.* s.4 og Brenni, Paolo, *Physics in the Twentieth Century*, s. 742 i Krige, John & Pestre, Dominique *Science in the Twentieth Century* (Amsterdam: Harwood Academic, 1997).
28. Brenni *op.cit.*
29. Se også Field, J.V., *What is scientific about a scientific instrument?*, *Nuncius*, vol. 3 (1988), s. 3-26.
30. Se Bennett, Jim, *The Divided Circle* (Oxford: Phaidon, 1987) og A.J. Turner, *Early Scientific Instruments*, (London: Sotheby's Publications, 1987) vedr. matematiske instrumenter.
31. Turner, A. J., *The Time Museum, Catalogue, Astrolabes* (Rockford, Ill.: The Time Museum, 1987). National Maritime Museum Booklet, *The Planispheric Astrolabe* (National Maritime Museum, 1979)
32. Bennett, Jim *The Mechanics Philosophy and the Mechanical Philosophy, History of Science*, xxvi (1986), s. 1-28.
33. Se også J. Bennett, *The Measurers: a Catalogue of the Exhibition* (Oxford: Museum of the History of Science, 1995) og J. Bennett og S. Johnston, *The Geometry of War 1500-1750* (Oxford: Museum of the History of Science, 1996).
34. Thoren, V.E., *The Lord of Uraniburg*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1990) er et af standardværk om Tycho. Se specielt kap. 5. Jim Bennett & D. Bertoloni Meli diskuterer bøger og instrumenter i perioden i *Sphaera mundi – astronomy books in the Whipple Museum 1478-1600* (Cambridge: Whipple Museum of the History of Science, 1994).
35. Bennett (1986) *op.cit.*.
36. Se Bennett *op.cit.* for en indgående diskussion af disse argumenter.
37. *Ibid.* Se også Bennett, Jim, *The Challenge of Practical Mathematics* i Pumphrey, S. *et.al.* (red.) *Science, Culture & Popular Belief in Renaissance Europe* (Manchester: Manchester University Press, 1991).
38. Norman *op.cit.* A iii.
39. Shapin, Steven & Schaffer, Simon, *Leviathan and the Air-pump* (Princeton: Princeton University Press, 1985). Shapin og Schaffer er i de senere år blevet kritiseret for at have overset jesuiternes rolle i formuleringen og udbredelsen af eksperimentalfilosofien på kontinentet, hvilket kan forklare, at denne ikke blot var et lokalt engelsk fænomen; se Peter Dear, *Discipline and Experience – The Mathematical Way in the Scientific Revolution* (Chicago: The University of Chicago Press 1995).
40. Brock, William H. *The Sceptical Chymist* kap. 2 i *The Fontana History of Chemistry* (London: HarperCollins Publishers 1992).

41. Levere, Trevor H., *Balance and Gasometer in Lavoisier's chemical revolution i Chemists and Chemistry in Natura and Society, 1770-1878*. (Aldershot: Variorum, 1994). Hankins, Thomas L., *Science and the Enlightenment* (Cambridge: Cambridge University Press, 1985). Golinski, Jan, Kap. 5 i *Science as Public Culture. Chemistry and Enlightenment in Britain, 1760-1820* (Cambridge & New York: Cambridge University Press, 1992).
42. van Helden, A., *The invention of the telescope, Transactions of the American Philosophical Society*, vol. 67, pt. 4 (1977), 5-62. Se specielt s. 25.
43. King, H.C. giver en rimeligt, men grundig, teknisk beskrivelse af teleskopets udviklingshistorie *The History of the Telescope*, (London: Charles Griffin, 1955).
44. Indledningen til Adams, George, *Micrographia illustrata* (London: 1746).
45. En bredere mere kontekstuel gennemgang findes i *The Social History of the microscope* Stella Butler, R.H. Nuttall og Olivia Brown (Cambridge: The Whipple Museum: 1986). J. Bennett, *The Social History of the Microscope, Journal of Microscopy*, vol. 155. (1989), 267-80.
46. John Heilbron, *Electricity in the Seventeenth and Eighteenth Centuries* (Berkeley: University of California Press, 1979). Hackmann, W.D. *Electricity from Glass, Science in History* no. 4, (Alphen aan der Rijn: Sijthoff & Nordhoff, 1978).
47. Hackmann, W.D., *Eighteenth Century Electrostatic Measuring Devices, Annali dell'istituto e museo di storia della scienza di Firenze*, Anno III, fasc. II (1978), s. 79-118.
48. Stock, John T. & Vaugham, Denys, *The Development of Instruments to Measure Electric Current* (London: Science Museum 1983). King, James W. *The Development of Electrical Technology in the 19th Century*, vol. 2, *The Telegraph and the Telephone*, United States National Museum Bulletin 228 (Washington: Smithsonian Institution, 1962).
49. Gooday, Graeme J.N., *The Morals of Energy Metering* in Wide, M. Norton (red.) *The Values of Precision* (Princeton: 1994).
50. Man kan dog finde beskrivelse af instrumenter fra det 19. årh. i Turner, G.L'E. *Nineteenth-Century Scientific Instruments* (Berkeley: University of California Press, 1983).
51. Brenni, Paolo, *Physics in the Twentieth Century*, s. 741 i *Science in the Twentieth Century op.cit.*,
52. *Ibid.*
53. Golinski *op.cit.* s. 140 og Pickering, Andy *Living in the Material World: On Realism and Experimental Practice* i Gooding *et.al. The Uses of Experiment* (1989) *op.cit.*
54. Latour (1987) *op.cit.* s. 121-132, Galison (1987) *op.cit.* s. 257, Latour, B. & Woolgar, S. (1976/1986) *op.cit.* s. 259-60, og Pinch, T. *Opening Black Boxes: Science, Technology and Society i Social Studies of Science*, vol. 22 (1992), s. 487-510.
55. Kemp, Martin, *Seeing and Picturing*, in *Science in the Twentieth Century, op. cit.* s. 361-390.
56. *Ibid.* s. 754-755.
57. Man kan dog finde historiske paralleller til denne situation i forbindelse med luftpumpen og de nye dyre instrumenter i den kemiske revolution. Begge er diskuteret tidligere i artiklen.
58. Capshew, J.H., Rader, K.A., *Big Science: Price to the Present* in Thackray, A. (red.), *Science After '40, OSIRIS*, II series (1992), vol. 7, s. 3-25.
59. Brenni *op.cit.*
60. Bennett, Jim, *Science Museums as Ressources for Historians* i A. Guagnini (red.) *I Laboratori dell' Università* (Bologna: 1996), s. 75-84.
61. *op. cit.* s. 82.