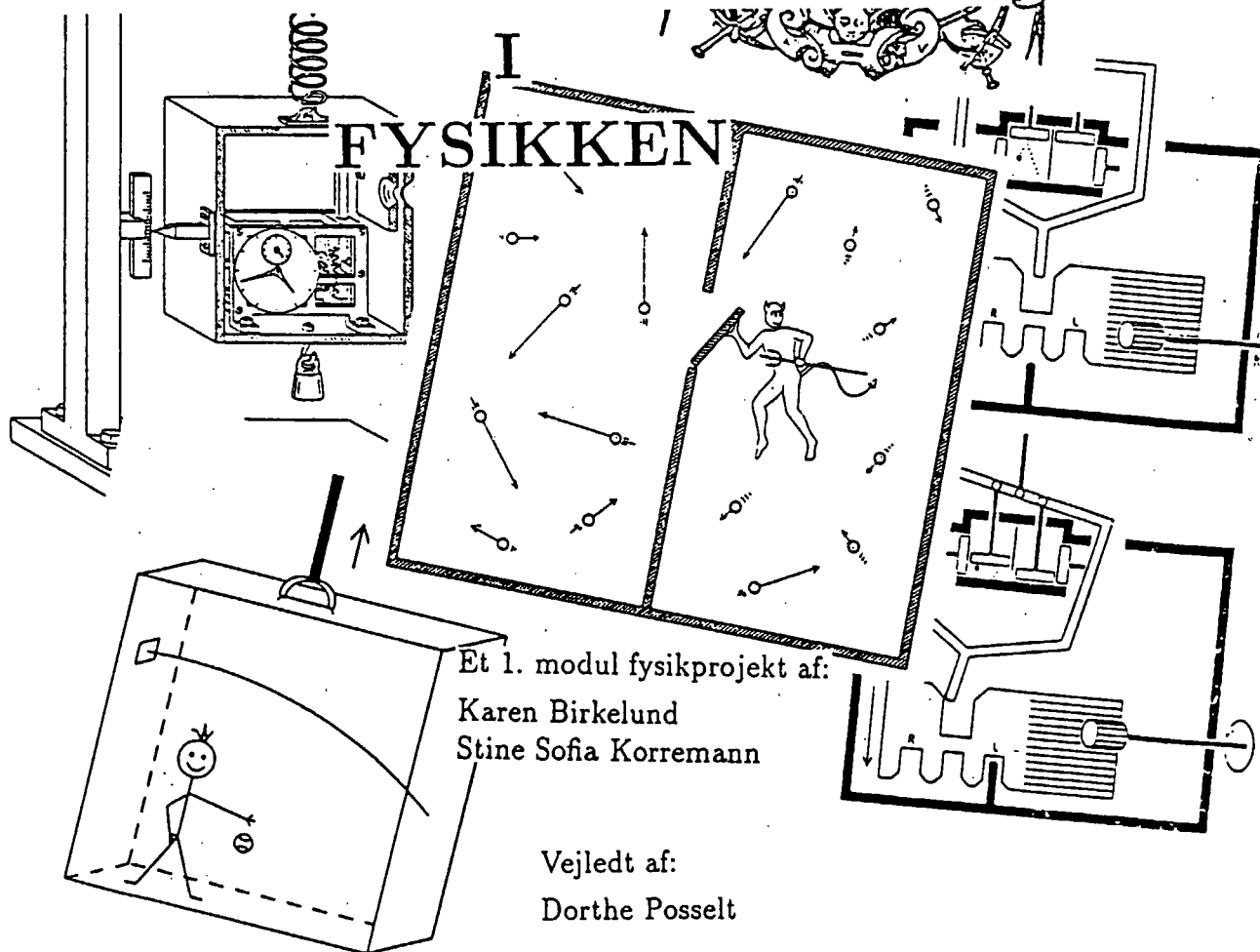


TANKEEKSPERIMENTER



FYSIKKEN

Et 1. modul fysikprojekt af:
Karen Birkelund
Stine Sofia Korremann

Vejledt af:
Dorthe Posselt

TEKSTER fra

IMFUFA

ROSKILDE UNIVERSITETSCENTER
INSTITUT FOR STUDIET AF MATEMATIK OG FYSIK SAMT DERES
FUNKTIONER I, UNDERVISNING, FORSKNING OG ANVENDELSER

IMFUFA, Roskilde Universitetscenter, Postboks 260, 4000 Roskilde

TANKEEKSPERIMENTER I FYSIKKEN

Et 1. modul fysikprojekt

af: Karen Birkelund og Stine Sofia Korremann

Vejleder: Dorthe Posselt

IMFUFA tekst nr. 243/93

63 sider

ISSN 0106-6242

ABSTRACT

Vi udvikler først et analyseapparat bestående af en karakterisering af de vigtigste aspekter af fysiske tankeeksperimenter samt en bred kategorisering af tankeeksperimenter.

Derefter benytter vi analyseapparatet på otte tankeeksperimenter fra forskellige grene af fysikken og forskellige tider. Disse går vi ikke i dybden med, det gør vi derimod med to efterfølgende eksempler. De er begge fra ca. 1930. Det første er Leo Szilard's formulering af Maxwell's dæmon, det andet er fotonkassen diskuteret af Einstein og Bohr.

Vi drager konklusioner vedrørende hvilke roller, tankeeksperimenter kan spille i fysikkens udvikling. Endvidere diskuterer vi anvendeligheden af vores analyseapparat.

TANKEEKSPERIMENTER

I

FYSIKKEN

Et 1. modul fysikprojekt af:

Karen Birkelund

Stine Sofia Korremann

Vejledt af:

Dorthe Posselt

Roskilde Universitetscenter, IMFUFA, efterår 1992

Indhold

1	Indledning	1
1.1	Valg af emne.	1
1.2	Inddeling af rapporten.	2
2	Hvad er et tankeeksperiment ?	5
2.1	Andres definitioner og krav.	6
2.2	Vores definitioner og krav.	8
2.3	Hvorfor tankeeksperimenter ?	10
2.4	Kategorisering af tankeeksperimenter.	12
3	Eksempler på tankeeksperimenter	17
3.1	Stevin's skråplan.	17
3.2	Galilei's fri fald.	19
3.3	Newton's planetbevægelser og centripetalkraft.	20
3.4	Newton's spand og absolut rum.	21
3.5	Lysets hastighed.	24
3.6	Einstein's elevator.	25
3.7	Heisenberg's ubestemthedsrelation.	27
3.8	Schrödinger's kat.	28
3.9	Opsamling.	30

4	Maxwell's dæmon	33
4.1	Termodynamikkens 2. hovedsætning.	33
4.2	Formuleringer af dæmonen.	35
4.3	Szilard's behandling af dæmonen.	37
4.4	Den videre udvikling af Maxwell's dæmon.	42
4.5	Kategorisering.	43
5	Foton i en kasse	45
5.1	Einstein's formulering af tankeeksperimentet.	45
5.2	Bohr's modargumenter.	47
5.3	Tankeeksperimentets videre historie.	51
5.4	Kategorisering.	52
6	Diskussion	55
6.1	Konklusioner.	55
6.2	Kritik af begrebsrammen.	59
	Litteratur	61

Kapitel 1

Indledning

1.1 Valg af emne.

Interessen for emnet i denne rapport udsprang oprindeligt af sommerferiens læsning af Tor Nørretranders' bog "Mærk Verden". I første del af bogen behandler han flere afskygninger af tankeeksperimentet "Maxwell's dæmon". Vores valg af emne blev dog hurtigt udvidet til behandling af tankeeksperimenter indenfor fysikken generelt. Det skyldtes blandt andet, at vi i vores litteratur stødte på mange forskellige, sjove og smukt udførte tankeeksperimenter.

Vi gik ind i projektarbejdet med den overbevisning, at tankeeksperimenter har en væsentlig betydning for opfattelsen og udviklingen af fysikken. De opstår ikke kun for sjovs skyld, selv om flere er af den art, der udveksles en sen natte-time på det lokale værtshus og ikke huskes af eftertiden. Vi mener, at mange tankeeksperimentatorer har/har haft seriøse formål med udviklingen af deres tankeeksperimenter, og at disse formål kan opfyldes.

For overhovedet at gå i gang med emnet var det vigtigt at få præciseret, hvad der menes med begrebet tankeeksperiment. Dette inkluderede en undersøgelse af, hvordan forskellige videnskabsteoretikere definerer begrebet tankeeksperiment. Vi måtte konstatere, at der findes uhyre lidt litteratur, der behandler dette emne direkte. Siden 1990 er der, såvidt vi ved, udgivet tre bøger, hvori der udelukkende diskuteres tankeeksperimenter. Det drejer sig om J.R. Brown: "The Laboratory of The Mind", R. Sorensen: "Thought Experiments" (disse to findes i litteraturlisten side 61) og "Thought Experiments in Science and Philosophy" editeret af T. Horowitz og G. J. Massay. Endvidere er bogen "Thought

Experiments" editeret af N. Rescher under udarbejdelse. Kun Brown's bog fandtes i Danmark, og Sorensen's bog lykkedes det først at få fat i i projektarbejdets sidste fase. Denne har derfor ikke været underlagt en større fordybelse. Vanskeligheden med at opdrive grundlæggende litteratur har imidlertid foranlediget os til selv at gå i dybden med at formulere, hvad vi forstår ved begrebet tankeeksperiment.

Emnet breder sig over hele fysikken, og det forudsætter en bred basisviden om de forskellige grene af fysikken. Netop dette gør emnet spændende. Men at behandle et stort antal tankeeksperimenter fra alle grene af fysikken og gennem alle tider grundigt, ville dog være for omfattende. Derfor har vi valgt at behandle to tankeeksperimenter grundigt. Det havde været mere ideelt at behandle tre eller flere tankeeksperimenter grundigt, men tiden tillod os ikke dette.

Når man laver en undersøgelse eller analyse, gælder det generelt, at man kun kan have én fri parameter ad gangen for at være sikker på, at forskelligheder kun kan tilskrives denne parameter. Dette gælder også i vores analyse af tankeeksperimenter. Vi kan vælge at lade tiden være den fri parameter og behandle tankeeksperimenter af samme art historisk, eller at lade arten af tankeeksperiment være den fri parameter og behandle tankeeksperimenter formuleret omkring samme tid, men af forskellig art.

Vi har valgt at lade arten være den fri parameter ved at behandle to formuleringer af tankeeksperimenter af forskellig art fra tiden omkring 1930. Valget hænger sammen med, at vi på denne måde kan komme til at behandle den fysik, vi finder mest interessant, bl.a. kvantemekanik og termodynamik.

Vores to hovedformål med projektet er altså at udvikle et analyseapparat til behandling af tankeeksperimenter generelt og at undersøge tankeeksperimenters rolle i og for fysikken omkring 1930 både i sig selv og i forhold til de formål, tankeeksperimenterne fremsættes med. Vores hypotese er, at tankeeksperimenter har en betydning for fysikkens udvikling.

1.2 Inddeling af rapporten.

Rapporten består af seks kapitler. I 2. kapitel behandles andres (vores kildeforfatteres) holdninger til begrebet tankeeksperiment. Hovedkilderne hertil har været Brown, Mach og Kuhn og i begrænset omfang Sorensen og, gennem en artikel af Fernandez, Peirce (se litteraturlisten

side 61). Herefter udvikler vi vores eget analyseapparat. Indtil slutningen af kapitel 3 forholder vi os ukritisk til vores krav og definitioner, og i kapitel 6 tages de yderligere op til diskussion.

Vores analyseapparat afprøves på udvalgte tankeeksperimenter i kapitel 3, der afrundes med en opsamling og en diskussion af vores tidligere fremsatte krav til tankeeksperimenter og analyseapparat. I dette kapitel går vi dog ikke i dybden med det enkelte tankeeksperiment.

Vores valg af tankeeksperimenter tager udgangspunkt i Brown's bog, da der heri er mange interessante tankeeksperimenter samlet ét sted. Desuden har vi konsulteret diverse undervisningsbøger (se litteraturlisten). At finde originalteksterne til tankeeksperimenterne ville have været en tidsmæssig belastning, som vi har valgt ikke at gå ind i. Vi har derimod adskillige kilder til de fleste tankeeksperimenter, og har udfra disse gengivet dem. I de mere nutidige tekster får vi desuden information om andres fortolkninger af tankeeksperimenterne, hvilket har givet os inspiration til behandlingen af tankeeksperimenterne.

I kapitel 4 og 5 behandles to udvalgte tankeeksperimenter grundigt. Tankeeksperimenterne er fremstillet i den form, de antog omkring 1930. I Kapitel 4 diskuteres Leo Szilard's formulering af "Maxwell's dæmon" fra 1929. Hovedkilden hertil er den engelske oversættelse af Szilard's originaltekst "Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen".

Hovedkilden til kapitel 5, hvori vi behandler Einstein's og Bohr's tankeeksperiment om en foton i en kasse, er Bohr's bog "Atomfysik og menneskelig erkendelse 1". Konsultationer af andre kilder har mest givet os citater af Bohr's fremstilling.

I det sidste kapitel diskuterer vi de behandlede tankeeksperimenter i forhold til projektets formål. Desuden giver vi en kritik af den begrebsramme, vi opstiller i kapitel 2.

Kapitel 2

Hvad er et tankeeksperiment ?

Overalt i vores hverdag støder vi på tankeeksperiment; når vi sidder og filosoferer over livet og verden, eller når vi som børn erfarer gennem leg og spørgen: "Hvad nu hvis...?".

I bogstaveligste forstand er tankeeksperiment eksperimenter foretaget i tanken. Det vil sige, at man uden brug af fysiske genstande tænker sig til en given situation eller tilstand med nogle givne forudsætninger, og ad tankens vej udfører et eksperiment (som hvis det var et rigtigt eksperiment med fysiske genstande). Men at bruge en sådan definition vil spænde alt for vidt. Tankeeksperiment har forskellige karakteristika inden for forskellige områder. Som begrænsning har vi valgt kun at beskæftige os med tankeeksperiment, der har direkte relation til faget fysik. Når vi i det følgende bruger ordet tankeeksperiment, mener vi altså implicit et fysisk tankeeksperiment.

Vi mener ikke, at man kan give en skarpt afgrænset definition af begrebet tankeeksperiment, da grænserne for, hvorvidt der er tale om et tankeeksperiment eller ej, er flydende og afhængige af den specifikke situation. Det, vi derimod kan gøre, er at opstille nogle krav, som vi mener, en tankevirksomhed i hvert tilfælde skal opfylde, for at vi vil kalde den et tankeeksperiment. I dette kapitel vil vi forsøge at indkredse begrebet et fysisk tankeeksperiment.

2.1 Andres definitioner og krav.

Slår man ordet tankeeksperiment (Gedankenexperiment) op i "Enzyklopädie Philosophie und Wissenschaftstheorie" fra 1980, står der følgende (direkte oversat fra tysk til dansk af os selv):

Tankeeksperiment, i de empiriske videnskaber et eksperiment, hvis forløb udvikles metodisk, men som af tekniske (omkostninger ved tekniske hjælpemidler etc.) eller principielle (dimensionerne af de tænkte forsøgsredskaber, moralske grænser i omgangen med forsøgspersoner etc.) grunde ikke kan udføres. K. R. Popper peger på, at allerede G. Galilei med sin kritik af den Aristoteliske kinematik har udført et klassisk tankeeksperiment. Forudsætter man (som i Galileis tankeeksperiment), at et tungt legeme har en større naturlig faldhastighed end et let, må, hvis man binder et let og et tungt legeme sammen, det nye legeme bevæge sig langsommere end det tunge, da det lette jo sinker bevægelsen. Men det nye legeme er jo tungere end de oprindelige legemer, da vægtene lægges sammen, og må ifølge antagelsen bevæge sig hurtigere end dem begge. Den forudsatte begyndelsestese er altså forkert (Discorsi I, Le Opere di Galileo Galilei, Ed. Naz. VIII, 106ff).

... Den videnskabssteoretiske kritik af tankeeksperimentet begynder med E. Mach, som ser en streng analogi mellem rigtige eksperimenter og tankeeksperimentet....

Holdningen i denne opslagsbog er altså, at et tankeeksperiment ikke kan udføres som et rigtigt eksperiment. Dette er vi ikke enige i, men det vender vi tilbage til. Galilei's tankeeksperiment (som jo faktisk godt kan udføres rigtigt) vil vi behandle i kapitel 3 sammen med andre eksempler.

For at indkredse, hvad et tankeeksperiment er, vil vi samle de vigtigste punkter fra den litteratur, vi har læst om tankeeksperimentet. Forfatterne til denne litteratur er i kronologisk orden C.S.Peirce, E.Mach, T.S.Kuhn, J.Brown og R.Sorensen ¹. Den eneste der fremsætter en egentlig definition er R.Sorensen [Sorensen, s. 205]:

A thought experiment is an experiment that purports to achieve its aim without the benefit of execution.

¹Referencer findes i litteraturlisten side 61 i denne rapport

Et andet sted (s. 186) skriver han

Thought experiments evolved from ordinary experiments by a process of attenuation. This evolutionary story paves the way for the conclusion that thought experiments are limiting cases of experiment ...

Med denne definition tillægger han ikke tankeeksperimenter stor betydning, idet han mener, at de foregiver/påstår at nå deres mål, dvs. virker forførende på deres publikum. For ham er tankeeksperimenter et grænsetilfælde af rigtige eksperimenter. Det skal dog siges, at Sorensen ikke skelner imellem de forskellige fagområder, så for ham er begreberne eksperiment og tankeeksperiment bredere, end når vi bruger dem. De andre forfattere kommer ikke med en klar definition, men stiller istedet krav og angiver typiske karakteristika ved tankeeksperimenter. Vi har sorteret det fra, som handler om tankeeksperimenter indenfor andre områder end fysikken.

Forfatterne kommer ind på følgende aspekter ved tankeeksperimenter:

1. Det fænomen, man forestiller sig i et tankeeksperiment, skal være visualiserbart eller billedgørligt (dette er ifølge Brown).
2. I tankeeksperimenter manipuleres med nogle af de elementer, der indgår. Dvs. eksperimentatoren er ikke bare passiv, men griber aktivt ind i sine egne forestillinger (dette er også ifølge Brown).
3. Der varieres på en eller flere parametre under tankeeksperimentet, helst på en kontinuert måde. (Dette er ifølge Mach. Det hænger nært sammen med forrige punkt).
4. Et tankeeksperiment er en idealisering i forhold til et rigtigt eksperiment. Man idealiserer f.eks. ofte omverdenen og størrelser som farver, lugte etc. væk (ifølge Mach).
5. Man har en forventning, som fører til forestillingen i tankeeksperimentet. Udførelsen fører så til en konsekvens (Mach).
6. Man skal kunne bruge sit begrebsapparat normalt, dvs. som man plejer, på fænomenet i tankeeksperimentet (f.eks. kan man ikke bare lade ting forsvinde. Dette er ifølge Kuhn).
7. Den konflikt, der fremstilles, skal kunne fremstilles af naturen selv. (Dette og det foregående punkt er krav, som Kuhn kalder "sandsynlighedskrav" (af engelsk "conditions of verisimilitude")).

Peirce's synspunkter er ikke medtaget i ovenstående, da han ikke skelner skarpt mellem de forskellige fagområder. Peirce skriver meget bredt, at tankeeksperimentet er empirisk øvelse i teorematisk ræsonnering. Teorematisk ræsonnering er aktive eksperimenter udført ved hjælp af diagrammer i modsætning til det, han kalder korollarial ræsonnering, som er baseret på ligefrem anvendelse af deduktive regler. Diagrammer skal forstås meget bredt, idet det omfatter tegninger, billeder, skrift, ligninger etc. Han tænker dog her specielt på matematiske tankeeksperimentet. Disse er ikke helt uinteressante i forbindelse med fysik, da der er grænseområder, hvor det kan være svært at afgøre, om et emne er matematik eller fysik (f.eks. kvantefeltteorier).

Når Brown skriver, at fænomenet skal være visualiserbart (punkt et) er det altså ikke det samme, som når Peirce skriver diagrammatisk. Brown's krav er strengere, da det ikke omfatter rent abstrakte (f.eks. geometriske) objekter. Peirce har altså en bredere fremstilling af punkt et end Brown.

På det fjerde punkt, som omhandler idealisering, hersker der enighed mellem Peirce og Mach.

Ovenstående kan naturligvis ikke samles til én fælles karakterisering af tankeeksperimentet, uden at der opstår modsigelser. Punkterne er fremsat af mennesker med vidt forskellige holdninger og på forskellige tidspunkter i historien. Men vi kan bruge punkterne som en hjælp til selv at finde ud af, hvordan vi vil karakterisere tankeeksperimentet. De kan desuden give os en idé om, hvilken status tankeeksperimentet har haft gennem tiderne. Blandt andet mener Mach i en artikel fra 1897 at være den første, der videnskabssteoretisk behandlede tankeeksperimentet kritisk [Enzyklopädie, s. 712]. Dette er et ganske interessant emne, men ikke et vi vil komme nærmere ind på i denne rapport.

I næste afsnit vil vi udvælge de krav, vi mener, er betegnende for tankeeksperimentet, og danne den indkredsning af begrebet tankeeksperiment, som vi vil bruge i resten af rapporten.

2.2 Vores definitioner og krav.

Vi er ikke lige enige i alle de ovenstående punkter. Der er enkelte af dem, som vi synes er essentielle, men også nogle, som vi ikke vil bruge. Desuden synes vi, at der er vigtige aspekter, som vi slet ikke er stødt på i vores materiale.

Vi er ikke enige i Sorensen's definition af tankeeksperiment. Vi mener, at han undervurderer betydningen af tankeeksperimentet. Desuden synes vi, at Kuhn's sandsynlighedskrav skærer en vigtig mængde af tankeeksperimentet væk; de kontrafaktuelle, dvs. de tankeeksperimentet, der modstrider det velkendte.

Et oplagt krav til et tankeeksperiment er, at det skal være en selvstændig afsluttet enhed. Det vil sige, at det består af: et sæt forudsætninger, tankehandlingerne og en konklusion.

Et andet krav, vi vil stille, er, at et tankeeksperiment skal være selvkonsistent. Det vil sige, at det skal opfylde de forudsætninger, det opstilles på baggrund af. Vi kan altså godt tillade, at der indføres elementer, som ikke er kendte, eller hvis eksistens vi betvivler, men de kan kun optræde, så længe de ikke er i modstrid med forudsætningerne for tankeeksperimentet. Forudsætningerne for tankeeksperimentet kan på forhånd være enten velkendte og accepterede, eller de kan være kontrafaktuelle, dvs. i modstrid med det velkendte. Det essentielle er, at forudsætningerne altid foreskriver, hvad der kan indgå i tankeeksperimentets tankehandling. Hvis forudsætningerne er kontrafaktuelle, kan tankehandlingerne også være kontrafaktuelle. Hvis f.eks. Maxwell's ligninger indgår i forudsætningerne, kan tankeeksperimentet ikke undervejs bruge magnetiske monopoler, da eksistensen af disse er i modstrid med forudsætningerne. (Maxwell's ligning $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ vil ikke være opfyldt). Omvendt kan $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ ikke indgå, hvis eksistensen af magnetiske monopoler indgår som forudsætning. Der er derimod intet i vejen for at konklusionen er i modstrid med forudsætningerne. Man kan da bruge tankeeksperimentet som et modstridsargument.

Endvidere mener vi som Brown, at tankeeksperimentet skal være visualiserbare. Med det mener vi, at der i tankeeksperimentet skal indgå fysiske konkrete elementer, der dog gerne må være idealiserede. Derved har vi elimineret de former for tankevirksomhed, hvor kun rent abstrakte elementer indgår som hørende til gruppen af tankeeksperimentet. Det vil sige, at en tankevirksomhed, der kun kan repræsenteres gennem symboler, det kunne for eksempel være en udledning af en formel, ikke er et tankeeksperiment. Her er vi altså ikke enige med Peirce, men han skelner heller ikke fysiske fra matematiske tankeeksperimentet.

Som et sidste krav stiller vi, at teknologiske muligheder ikke må lægge begrænsninger på tankeeksperimentets spillerum, men ofte vil tankeeksperimentet munde ud i fysiske eksperimenter.

Et vigtigt aspekt ved tankeeksperimenter er, at de omhandler kvalitet fremfor kvantitet. Det er kvalitetene ved de objekter, der indgår fremfor de konkrete størrelser, kvantiteterne, der er vigtige. Faktisk er det slet ikke relevant at angive de konkrete størrelser - f.eks. vægtene af legemerne i Galilei's fri fald (det vigtige er, at det ene er tungere end det andet).

Variation vil som oftest finde sted i et tankeeksperiment, men det er nok mere rigtigt at bruge det bredere ord manipulation, som Brown gør. De manipulationer, der gøres, vil ofte være variationer af en eller flere parametre, men det kan også bare være enkeltstående handlinger. Tankeeksperimenter vil også ofte være idealiseringer af den fysiske verden, men det er ikke et krav.

2.3 Hvorfor tankeeksperimenter ?

Nu, hvor vi har specificeret, hvordan et tankeeksperiment er karakteriseret, må det være på tide at spørge, hvorfor man overhovedet finder på at bruge tankeeksperimenter fremfor rigtige eksperimenter. I rigtige eksperimenter står man jo i en (næsten) direkte dialog med naturen og kan få de ultimative svar. På Aristoteles' tid var den væsentlige grund nok, at den videnskabelige tradition ikke lagde op til fysiske eksperimenter. Al fysisk arbejde var slavernes opgave, mens den videnskabelige tænkning var forbeholdt samfundets bedst stillede borgere [Højgaard, s. 32]. Så tankeeksperimenter var vejen til ny erkendelse og forståelse af, hvordan naturen hang sammen.

Siden da er det blevet mere almindeligt at udføre fysiske eksperimenter, men tankeeksperimenterne bliver stadig brugt. Det kan skyldes

- At tankeeksperimenter kan være en hjælp i forbindelse med fænomener, der ligger udenfor menneskets direkte erfaringsområde.
- At der er fænomener, som ikke kan afprøves eksperimentelt med den forhåndenværende teknologi.
- At man i tankerne har mulighed for at foretage idealiseringer i en grad, der ikke er mulig eksperimentelt, og derigennem opnå en forståelse for det essentielle, der optræder i et fysisk fænomen.
- At der altid har hængt en rest af de gamle grækernes tradition ved: Tænkearbejde er "finere" end eksperimentelt arbejde.

- At tankeeksperimenter kan give en forståelse af de fysiske lovmæssigheder, der beskriver naturen. Eksperimenter giver ofte kun en eftervisning eller overbevisning.
- At tankeeksperimenter kan være mere hårdtslående i sine argumenter end rigtige eksperimenter, da de er mere generelle.
- At det kan tage lang tid at stille et rigtigt eksperiment op. I mellemtiden kan man nøjes med et tankeeksperiment.
- At det tilsvarende eksperiment ikke er egnet til udførelse af økonomiske, moralske eller grunde.
- At tankeeksperimenter kan være en hjælp til at planlægge et rigtigt eksperiment. De kan også bruges til at forudsige resultater.

Tankeeksperimenter opstår ofte i forbindelse med begreber, der er svære at forstå, som f.eks. acceleration, tid, rum og entropi. Man ser som regel også en opblomstring i hyppigheden af tankeeksperimenter i forbindelse med paradigmeskift [Kuhn, s. 263f]. Det hænger sandsynligvis sammen med, at der her dukker en masse nye begreber op, som skal forstås og sættes i relation til ens begrebsdannelse. Blandt andet ser man mange tankeeksperimenter omhandlende kvantemekanikken, der jo netop kræver en revidering af ens opfattelse af den fysiske virkelighed. Naturligvis hænger mangfoldigheden af tankeeksperimenter indenfor kvantemekanikken også sammen med, at det er en vanskelig disciplin at udføre rigtige eksperimenter i.

Den klasse af tankevirksomhed, vi har karakteriseret som værende tankeeksperimenter, er meget stor. Men ser man nærmere på klassen af tankeeksperimenter, viser det sig, at der er forskel på de enkelte tankeeksperimenter. De har bl.a. forskellige formål alt efter hvornår og hvordan, de er blevet udført. I det følgende vil vi udvide vores analyseapparat til at omfatte forskellige kategorier, som vi mener, kan dække alt, hvad vi karakteriserer som værende tankeeksperimenter. Herved bliver det muligt for os at skelne mellem de forskellige tankeeksperimenteres rolle og formål.

2.4 Kategorisering af tankeeksperimenter.

De eneste, vi er stødt på i vores litteratur, som gør et forsøg på at kategorisere tankeeksperimenter, er Sorensen og Brown.

Sorensen kategoriserer tankeeksperimenter efter grunde for ikke at udføre tankeeksperimenterne som rigtige eksperimenter. Han opstiller tre forskellige grunde, som kan være årsag til ikke at udføre det rigtige eksperiment [Sorensen, s. 197]:

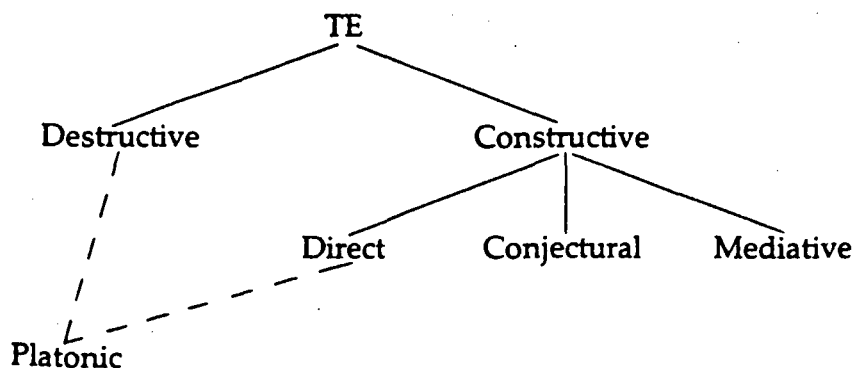
Der er tankeeksperimenter, hvis resultat ikke forbedres, ved at tankeeksperimentet udføres som rigtig eksperiment. Dem kalder han for "unimprovables". Hermed mener han, at der er for megen ulejlighed forbundet med at opstille og udføre eksperimentet. Enten vil man få det samme svar, som man umiddelbart kan tænke sig til, eller man vil gennem eksperimentet slet ikke få svar på det spørgsmål, der er opstillet i tankeeksperimentet.

Tankeeksperimenter, der ikke bliver udført i praksis, fordi omkostningerne er for store, placerer han i kategorien "unaffordables". At omkostningerne er for store kan betyde, at det simpelthen er for dyrt at udføre eksperimentet i forhold til det svar, man kan forvente at opnå, eller der kan være tale om æstetiske og moralske omkostninger, idet udførelsen f.eks. vil kræve menneskeliv.

Hans sidste kategori er de umulige ("impossibles"). Hertil hører de tankeeksperimenter, der simpelt hen teknisk set er umulige at udføre som et rigtig eksperiment. Tankeeksperimenter, der tilhører denne kategori idag, kan senere falde udenfor, hvis den teknologiske udvikling en dag gør det muligt at udføre dem som rigtige eksperimenter.

Sorensen's kategorisering kan være relevant, hvis ønsket er at undersøge tankeeksperimenter versus rigtige eksperimenter. For eksempel kunne det være interessant at undersøge forskellen i kvaliteten af og samspillet mellem de to discipliner. Men i forhold til vores mål, som jo delvis er at undersøge tankeeksperimenters konsekvenser i forhold til forventningerne, er denne kategorisering ikke hensigtsmæssig.

En mere brugbar kategorisering finder vi hos Brown, som kategoriserer efter tankeeksperimenternes formål, som første skridt i et forsøg på at finde et mønster for tankeeksperimenter [Brown, s. 33ff]. I forhold til vores analyse giver en sådan kategorisering os et godt redskab, da forventningerne til tankeeksperimenterne må stå i en direkte relation til deres formål.



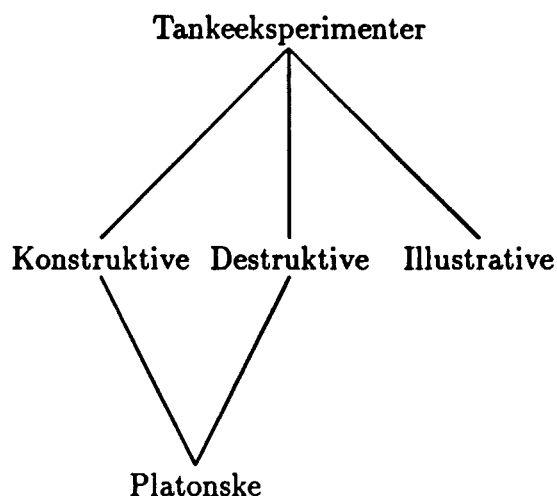
Figur 2.1: Brown's kategorisering. [Brown, s. 33].

I Brown's kategorisering er der to overordnede kategorier; de destruktive og de konstruktive (se figur 2.1). De destruktive tankeeksperimenter er de, der har til formål at omstøde en fysisk lov eller realitet. Galilei's fri fald er et sådant eksempel, da det skal omstøde Aristoteles faldlove. De konstruktive er de, der har til formål at understøtte en teori eller lov. De er igen opdelt i tre kategorier.

- De formidlende (mediative) forsøger at illustrere/sandsynliggøre en del af en på forhånd klarlagt teori. De er altså en slags illustrationer.
- De gættende (conjectural) opstiller et uforklaret fænomen og fører til et bud på en forklaring; f.eks. en lov/teori.
- De direkte (direct) går ud fra et uproblematisk fænomen, "problematiserer" det og ender dermed med en ny (hvis der ikke tidligere har været en forklaring overhovedet) eller en alternativ forklaring.

Nogle tankeeksperimenter kan både være destruktive og direkte konstruktive på én gang. De kaldes platoniske. Det er tankeeksperimenter, der omstøder en gammel teori, og erstatter den med en ny inden for samme emne.

Vi er ikke helt enige med Brown i den måde, han opstiller kategorierne. Vi vil ligesom Brown skelne imellem destruktive og konstruktive tankeeksperimenter, men vi vil lave endnu en kategori, som står på



Figur 2.2: Vores kategorisering.

samme niveau som disse to. Denne kategori kalder vi de "illustrative" tankeeksperimenter. De udgør egentlig den kategori, som Brown kalder de konstruktivt formidlende. Vi mener bare ikke, at disse bør kaldes konstruktive, da de kun kan tjene til at bekræfte noget allerede eksisterende. De kan ikke fremføre noget nyt. Vi ser så ikke nogen grund til at lave en yderligere opdeling af de konstruktive, men ligesom Brown synes vi, at der er en vigtig gruppe af tankeeksperimenter, der både er konstruktive og destruktive, og som fortjener deres eget navn. Vi vil overtage betegnelsen "de platonske". Det er dog vigtigt at påpege, at de er destruktive og konstruktive med hensyn til den **samme** fysiske lov/teori.

Alt i alt bliver det til den kategorisering, man ser på figur 2.2.

Vi mener, at de rent illustrative tankeeksperimenter er de mindst interessante. De mest frugtbare tankeeksperimenter er de, der kan afvise en teori, fremstille en ny eller gøre begge dele. Disse må betyde mest for fysikkens udvikling. Men de illustrative er interessante i den forstand, at de kan give en fælles brug eller forståelse af ens begrebsramme. Dvs. de kan hjælpe til at opnå enighed om, hvordan forskellige termer skal benyttes. Der vil dog ofte være en flydende grænse til de konstruktive alt efter, hvor alment accepterede termerne er.

Et tankeeksperiment kan godt tilhøre flere kategorier på én gang, idet det for eksempel kan illustrere et emne og samtidig konstruere et andet;

eller destruere et og konstruere et andet (uden af den grund at være platonisk, da der er tale om to forskellige emner).

Et tankeeksperiment kan skifte kategori med tiden, alt efter hvordan og af hvem det fremsættes. Eksempelvis kan et tankeeksperiment være konstruktivt første gang, det fremsættes og sidenhen blive destruktivt, fordi den første teori viser sig at være uholdbar.

Kategoriseringen kan desuden være subjektiv. Eksempelvis kan der i en undervisningssituation indgå et tankeeksperiment, der for læreren er illustrativt, mens det for eleven kan være konstruktivt, idet det fremfører for eleven hidtil ukendte fysiske teorier/love.

Vi har nu afgrænset og indkredset begrebet tankeeksperiment, men for rigtigt at klargøre, hvad der ligger i det, vi har skrevet i dette kapitel, vil vi i det næste gennemgå otte eksempler på tankeeksperimenter fra forskellige perioder.

Kapitel 3

Eksempler på tankeeksperimenter

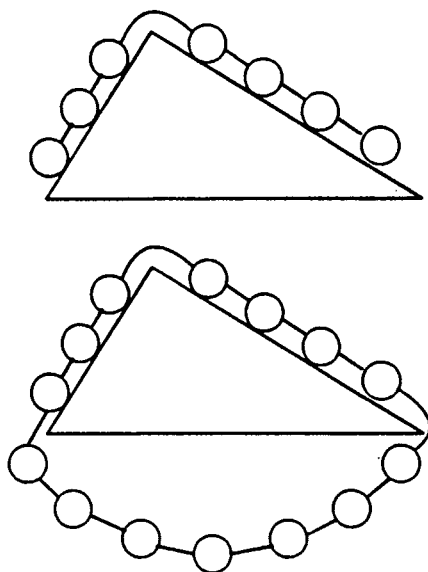
I dette kapitel vil vi ved hjælp af 8 eksempler belyse vores tanker fra kapitel 2. Eksemplerne er fra forskellige tidspunkter i historien strækkende sig fra middelalderen til vor tid, og er skrevet i kronologisk rækkefølge. For ikke at komme i konflikt med den subjektive kategorisering vil vi i alle eksemplerne forsøge at sætte os i tankeeksperimentets ophavsmands sted, således at vi kategoriserer efter dennes formål og ikke efter senere fremsættelser af tankeeksperimentet. Nogle af tankeeksperimenterne giver konklusioner, der er fejlagtige eller mangelfulde, og som siden er blevet reviderede. Dette vil vi enkelte gange komme ind på.

Til sidst i kapitlet vil vi vælge de to tankeeksperimenter, som vi i de følgende kapitler vil gå i dybden med.

3.1 Stevin's skråplan.

Simon Stevin (1548-1620) var flamsk matematiker og mekaniker. Han betegnes ofte den moderne statiks fader og grundlæggeren af læren om skråplaner (ifølge Salmonsens konversationsleksikon). Et af hans flotteste tankeeksperimenter omhandler skråplaner.

Tankeeksperimentet går ud på, at man forestiller sig to forskellige friktionsløse skråplaner af samme højde. Over de to planer lægges en kæde af vægte med lige stor indbyrdes afstand således, at forholdet mellem vægtene på de to skråplaner er det samme som forholdet mellem planernes længder (se figur 3.1 øverst).



Figur 3.1: Stevins skråplaner med en kæde af vægte.

Spørgsmålet er nu, om kæden af vægte vil bevæge sig til højre (fordi der er mest masse på højre side), eller om den vil bevæge sig til venstre (på grund af den større hældning), eller om systemet vil forblive i statisk ligevægt.

For at afgøre dette spørgsmål, forestiller Stevin sig, at man slutter kæden under skråplanerne som vist nederst på figur 3.1. Hvis nu kæden bevæger sig enten venstre om eller højre om, vil en evighedsmaskine være skabt. Også på dette tidspunkt er det alment accepteret, at konstruktionen af en evighedsmaskine er en umulighed. Så kræfterne, der virker på højresiden må udbalanceres af kræfterne, der virker på venstresiden, og konklusionen bliver altså, at systemet vil forblive i statisk ligevægt.

Tankeeksperimentets forudsætninger er den gængse mekaniks love. Disse benyttes normalt, og tankeeksperimentet modstrider dem ikke. En anden forudsætning for tankeeksperimentet er formodningen om, at der ikke eksisterer evighedsmaskiner. Konklusionen afhænger i høj grad af denne erkendelse. Konflikten i tankeeksperimentet er netop, at der opnås en modstrid i forhold til forudsætningerne.

I tankeeksperimentet antages det, at planerne er friktionsløse, hvilket er et eksempel på en idealisering.

Tankeeksperimentet er et eksempel på et konstruktivt tankeeksperiment. Forudsætningerne for tankeeksperimentet er ikke en velformuleret fysisk teori, men det munder ud i den teori, der siger, at på skråplaner af samme højde vil ens vægte være påvirket af kræfter, der er omvendt proportionale med længderne af planerne.

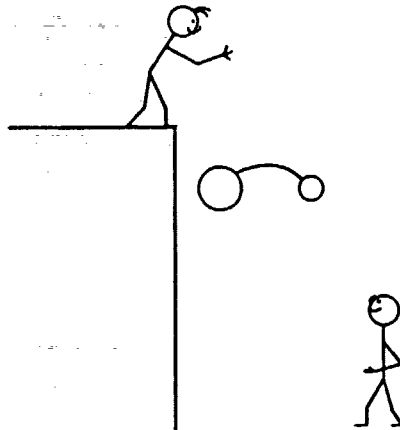
3.2 Galilei's fri fald.

I 1638 udkom en bog skrevet af Galileo Galilei (1564-1642) om bl.a. kinematik [Højgaard, s. 24]. Hele bogen er udformet som en fiktiv dialog mellem på den ene side en person, der repræsenterer Galilei (Salvati), og på den anden side to personer (Simplicio og Sagredo), som han prøver at overbevise om kinematiske love. Der er mange tankeeksperimente i bogen, og et af dem er netop det, som er beskrevet på side 6 i kapitel 2 i denne rapport. Emnet er legemers frie fald. Tidligere mente man i overensstemmelse med Aristoteles' tankegang, at tunge legemer falder hurtigere end lette. De skulle have en større naturlig tendens til at søge mod jorden. Galilei viser med et tankeeksperiment, at dette ikke kan være tilfældet.

Man forestiller sig, at man binder et tungt og et let legeme (af samme stof påpeger Galilei) sammen med en tynd tråd og spørger da, hvor hurtigt dette nye legeme vil falde. På den ene side vil det lette falde langsommere end det tunge, og vil derfor sinke det tunge, således at hastigheden bliver mindre end for det tunge legeme alene. På den anden side har det nye legeme en samlet vægt, som er større end det tunge legemes vægt alene, og det bør derfor falde hurtigere. Han opnår altså en modstrid og konkluderer derfor, at de to legemer må falde lige hurtigt. Galilei nævner flere gange, at de to legemer skal være af samme stof, dvs. have samme vægtfylde [Højgaard, s. 23ff]. Dette er pudsigt, da det jo ikke er nødvendigt for argumentet, som også vil gælde for legemer af forskellig vægtfylde.

Dette tankeeksperiment kunne sagtens udføres som et rigtigt eksperiment, og det har sikkert også været gjort. Hvis man vil nå samme resultat ved hjælp af et rigtigt eksperiment, vil man dog nok få mere ud af bare at lade et tungt og et let legeme falde ved siden af hinanden og se, om de rammer jorden samtidig. I det tilfælde vil man naturligvis skulle tage hensyn til luftmodstanden, som i tankeeksperimentet er idealiseret væk.

Tankeeksperimentet er et eksempel på et modstridsargument, idet det



Figur 3.2: To legemer af forskellig vægt bindes sammen og slippes til et frit fald.

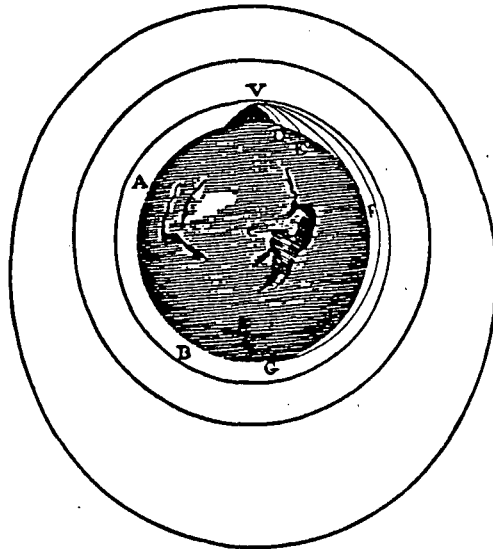
vises, at forudsætningerne, Aristoteles' kinematik, er internt inkonsistente. Det er altså destruktivt overfor Aristoteles' kinematik, men samtidig konstruktivt overfor Galilei's eget forslag, at tunge og lette legemer falder lige hurtigt. Dvs. der er tale om et platonisk tankeeksperiment.

3.3 Newton's planetbevægelser og centripetalkraft.

I dette tankeeksperiment vil Isaac Newton (1642-1727) forklare planeternes baner med gravitationskraften [Brown, s. 6].

I tankeeksperimentet spørger Newton, hvad der vil ske, hvis man står på jordens højeste punkt og kaster et legeme (f.eks. en sten) horisontalt. Denne vil da som følge af gravitationen følge en kurvet bane, indtil den rammer jorden. Kastes stenen med en større begyndeshastighed, vil banen, den følger, blive længere. Bliver hastigheden, hvormed stenen kastes, tilstrækkelig stor, vil stenen fortsætte sin bane og vende tilbage til udgangspunktet uden at ramme jorden, hvis luftmodstanden negligeres. Dette er man umiddelbart villig til at acceptere.

Tankeeksperimentet fortsætter da ved at udvide det accepterede til, at legemer affyres flere jordradier fra jordens centrum. Legemerne vil da



Figur 3.3: Legemers bevægelse om jorden [Brown, s. 6].

bevæge sig i elliptiske baner, eventuelt med forskellig excentricitet, om jorden.

Tankeeksperimentet giver altså et billede af legemers bevægelse om jorden. Legemerne kunne være æbler og sten såvel som planeter.

Tankeeksperimentet opfylder vores krav til et tankeeksperiment. Desuden indgår der idealiseringer, idet der ikke skelnes mellem æbler og planeter. Der varieres på nogle af de parametre, der indgår; den hastighed, hvormed legemet affyres og den højde, det affyres fra.

Det er et eksempel på et konstruktivt tankeeksperiment, idet Newton ville fremføre en ny teori for planeternes bevægelse. Han tog udgangspunkt i det kendte skrå kast, men gik et skridt videre og konkluderede på den måde noget nyt.

3.4 Newton's spand og absolut rum.

Et andet tankeeksperiment formuleret af Newton handler om absolut rum. Newton mente, at man kunne tale om to begreber; absolut rum og relativt rum, hvor absolut rum er et rum, der eksisterer i sig selv uden noget stof i, og relativt rum er rum med stof eller legemer i [Harrison, s. 176, 281f]. Newton's definition af absolut og relativt rum er at finde i "Principia" [Brown, s. 8].

Absolute space, in its own nature, without relation to anything external, remains always similar and immovable. Relative space is some movable dimension or measure of the absolute spaces; which our senses determine by its position to bodies...

Der eksisterer så også to former for bevægelse; relativ og absolut bevægelse. Relativ bevægelse er bevægelse i forhold til det relative rum og kan ikke ses i et absolut rum, da der ikke er noget at se den i forhold til, det kunne f.eks. være translationer. Absolut bevægelse er bevægelse, der kan ses i det absolutte rum (og i det relative).

Heri var mange uenige, blandt andet den samtidige tyske matematiker og filosof Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), der mente, at rum var defineret ved relationen mellem legemer. Han hævder, at hvis der ikke er nogen materielle ting, er der ikke noget rum [Harrison, s. 176].

Den almene forståelse var, at ikke-accelererede bevægelser er relative, og derfor faldt det naturligt, at accelererede bevægelser også måtte være relative.

Newton mente derimod, at accelereret bevægelse er absolut og kan ses i et absolut rum.

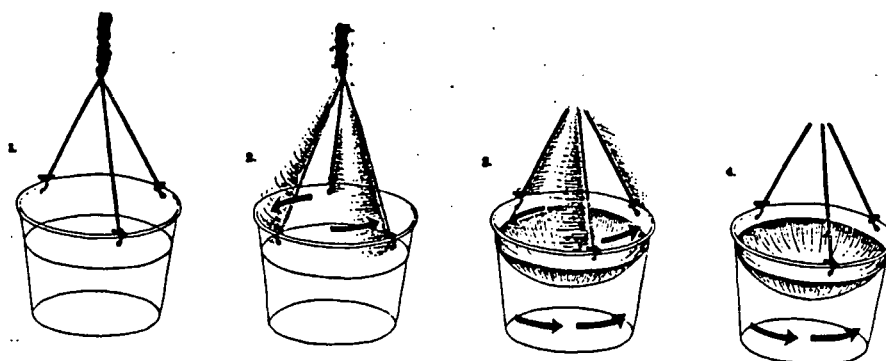
Newton forsøgte at overbevise sine modstandere om, at centrifugalkraft er et resultat af absolut bevægelse og ikke et resultat af legemers relative bevægelse i forhold til hinanden; og da centrifugalkræfter er velkendte, må absolut rum eksistere. For at overbevise modstanderne brugte han tankeeksperimenter; heriblandt følgende om en roterende spand med vand i.

I eksperimentet skal vi forestille os en spand fyldt med vand i et isoleret system. Spanden er hængt op i et snoet reb - og slippes.

I det øjeblik spanden slippes, vil den begynde at rotere, da rebet snoes ud. Vandoverfladen vil være horisontal. Efter nogen tid vil der være en relativ bevægelse mellem spand og vand, og vandoverfladen vil stadig være horisontal. Efter yderligere nogen tid vil vandet rotere med spanden (vand og spand er i hvile i forhold til hinanden), og vandoverfladen vil stille sig konkavt i spanden. Stoppes spanden, vil vandoverfladen stadig være konkav, og vandet er i relativ bevægelse i forhold til spanden (se figur 3.4).

Den konkave vandoverflade skyldes, at der skabes en centrifugalkraft, som virker på vandet.

I starten, hvor spand og vand er i absolut hvile, er vandoverfladen horisontal; når spand og vand er i absolut bevægelse er vandoverfladen konkav. I de to tilfælde, hvor der er en relativ bevægelse, ses først en



Figur 3.4: Vandspand i absolut rum [Sorensen, s. 145].

horisontal og så en konkav vandoverflade. Centrifugalkraften må altså være et resultat af forskellen mellem absolut hvile og absolut bevægelse. Det er den accelererede bevægelse af vandet, der skaber centrifugalkraften og ikke bevægelsen af spanden, for i starten, hvor spanden accelereres, optræder åbenbart ingen kraft. Det har ingen betydning om vandet bevæger sig relativt i forhold til spanden eller ej, for når dette er tilfældet, er der to forskellige situationer.

Eksistensen af centrifugalkraften kan altså ikke forklares ved, at der er en relativ bevægelse, men ved at vandet bevæger sig i absolut forstand. Da dette er den bedste forklaring af fænomenet, må man erkende eksistensen af absolut bevægelse og dermed af absolut rum.

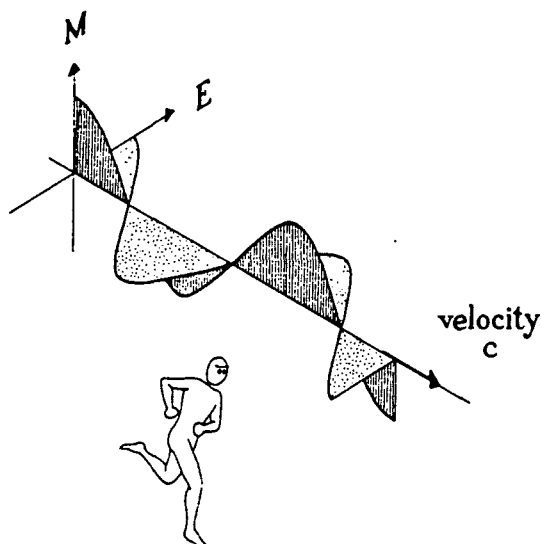
Der indgår i tankeeksperimentet et fænomen, naturen selv kunne skabe. Tankeeksperimentet er idealiseret i den forstand, at der ikke tages hensyn til, hvordan spanden er hængt op.

Forudsætningen for tankeeksperimentet er, at rotation (som er accelereret bevægelse) skaber en centrifugalkraft. Tankeeksperimentet tager ikke udgangspunkt i en velformuleret teori, men vores begrebsramme bliver gennem tankeeksperimentet udvidet med begrebet absolut rum, da dette umiddelbart giver en naturlig forklaring på fænomenet.

Dette er endnu et eksempel på et konstruktivt tankeeksperiment, idet Newton prøver at indføre et nyt begreb - absolut rum - som ikke var et alment accepteret begreb. Det er altså meningen, at tankeeksperimentet skal føre til en ny erkendelse hos andre.

3.5 Lysets hastighed.

Dette tankeeksperiment blev udført af Albert Einstein (1879-1955), da han var 16 år gammel, dvs. i 1895. På dette tidspunkt havde Ole Rømer forlængst fastlagt lysets hastighed i vakuum, Maxwell var kommet frem til, at lys er elektromagnetisk stråling (oscillerende E- og B-felter) og Maxwell's ligninger var kendte. Einstein stillede sig selv det i og for sig simple spørgsmål: "Hvordan vil det være at bevæge sig med lysets hastighed og se på en lysbølge?"



Figur 3.5: Einstein bevæger sig med lysets hastighed ved siden af en foton [Brown, s. 16].

Svaret på dette simple spørgsmål er egentlig også simpelt, men har forbløffende konsekvenser.

Først og fremmest konkluderer Einstein, at naturlovene må være de samme, uanset om han er i hvile eller er i bevægelse med jævn hastighed.

Når han nu bevæger sig med lysets hastighed ved siden af en foton, skulle man umiddelbart tro, at han ville se E- og B-felter i hvile i forhold til sig selv. Men på den anden side kan det jo ikke lade sig gøre ifølge Maxwell's ligninger, da der ikke er nogen frembringer af disse statiske felter. Fotonen må altså alligevel bevæge sig i forhold til ham, og den eneste naturlige, og ifølge Maxwell's ligninger mulige, hastighed er lysets, c .

Disse to konklusioner medfører tilsammen faktisk hele den specielle relativitetsteori! Forudsætningerne er Maxwell's ligninger, lysets natur

og sund fornuft. Der bliver dog gjort en del idealiseringer i dette tankeeksperiment. Einstein forestiller sig, at han og fotonen er de eneste i verden, samt at han selv er elektrisk og magnetisk neutral.

Der er visualiserbarhed i form af fotonen (som i hvert fald kan visualiseres som bølger) og Einstein selv. Tankeeksperimentet er dog af den slags, der ikke kan udføres i virkeligheden på grund af teknologiens begrænsninger. Dét forhindrer os dog ikke i at udføre det som tankeeksperiment.

Dette er uden tvivl et konstruktivt tankeeksperiment, idet formålet med det var at komme frem til en helt ny teori; den specielle relativitetsteori. Det er ikke destruktivt i forhold til Newton's mekanik, da der er korrespondens i grænsen ved lave hastigheder i forhold til lysets.

3.6 Einstein's elevator.

Einsteins specielle relativitetsteori tager ikke højde for gravitationskræfter, da den kun beskæftiger sig med inertiel bevægelse, dvs. relative bevægelser med konstant hastighed.

Den generelle relativitetsteori derimod tager også højde for accelereret bevægelse og skaber en bro til gravitation. Koblingen mellem gravitation og acceleration sker gennem ækvivalensprincippet, som siger at inertiel masse er lig gravitationel masse.

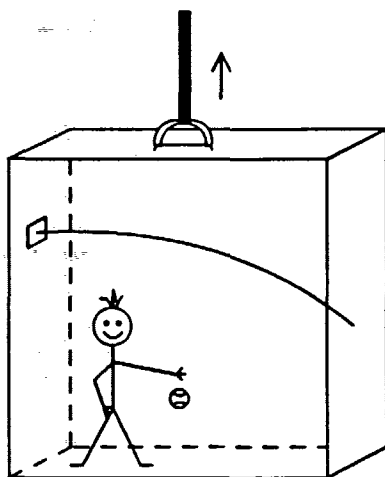
Ækvivalensprincippet belyses i Einstein's tankeeksperiment fra 1938 [Brown, s. 18]:

En elevator bevæger sig med konstant acceleration i rummet langt fra stjerner og planeter til at påvirke den (free space).

En observatør uden for elevatoren vil se, at elevatoren er i acceleration i forhold til ham. En person inde i elevatoren vil ikke opfatte, at han er i accelereret bevægelse, men hvis han f.eks. slipper en bold, vil den falde til gulvet, som hvis han befandt sig i et gravitationsfelt. For observatøren ser det ud, som om gulvet bevæger sig mod bolden. Men resultatet er det samme, og dette formuleres i Einstein's ækvivalensprincip, som siger, at de fysiske love har de samme formuleringer i accelererede og inertielle systemer.

Hvis der sendes lys ind ad et vindue i elevatoren, vil observatøren i hvile se lyset bevæge sig horisontalt gennem rummet, men da elevatoren er i acceleration, vil lyset ramme den modstående væg lidt længere nede, end hvor det kommer ind.

For personen i elevatoren vil lyset også ramme den modstående væg



Figur 3.6: Einsteins elevator.

lidt længere nede, men han vil konkludere at det skyldes gravitationsfeltet, han tror, han befinder sig i.

Man opnår altså den samme konklusion, nemlig at lyset afbøjes, hvad enten elevatoren er i accelereret bevægelse, eller befinder sig i et gravitationsfelt.

Ved erkendelsen af at der må være ækvivalens, er det nu muligt at indføre den generelle relativitetsteori.

Forudsætningerne for tankeeksperimentet er, at mekanikkens love gælder i elevatoren, som bevæger sig med konstant acceleration i et inertialsystem. Konflikten består i personen i elevatorens og observatørens forskellige anskuelser af situationen.

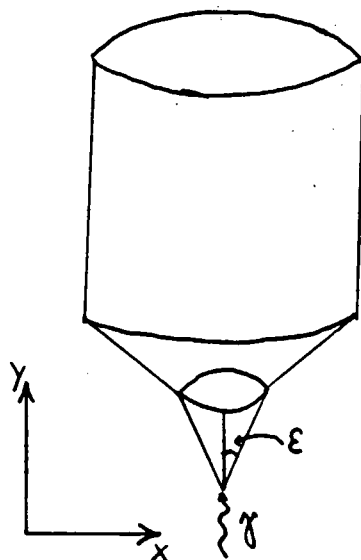
Det er et fænomen, der er velkendt fra naturen, og det er visualiserbart, idet der kun indgår konkrete elementer, hvorpå vores begreber benyttes normalt.

Tankeeksperimentet går ind under kategorien af illustrative tankeeksperimenter, idet det illustrerer, hvordan generel relativitetsteori kobler gravitation og acceleration. Udgangspunktet og konklusionen hviler på i forvejen velkendte teorier, og der sker hverken noget konstruktivt eller destruktivt i forhold til disse. Derfor kan tankeeksperimentet ikke tilhøre andre af vores opstillede kategorier end den illustrative.

3.7 Heisenberg's ubestemthedsrelation.

Dette tankeeksperiment blev til i vinteren 1926-27, da Niels Bohr (1885-1962) og Werner Heisenberg (1901-1976) arbejdede med at formulere kvantemekanikken og med at løse nogle af dens problemer i forbindelse med bølgemekanik-beskrivelsen. Heisenberg foreslår på et tidligt tidspunkt, at det kun er muligt at lave eksperimenter, der kan beskrives indenfor den kvantemekaniske formalisme. Det vil f.eks. betyde, at det på grund af den matematiske formalisme ikke kan lade sig gøre eksperimentelt at måle en partikels sted og impuls på én gang [Nørretranders, s. 92]. Altså at det er den matematiske formalisme, der begrænser eksperimentets muligheder. Dette gælder ikke kun for sted- og impuls-målinger, men generelt for alle konjugerede par af variable, hvis tilhørende operatorer ikke kommuterer. Han belyste det med følgende tankeeksperiment.

Vi forestiller os, at vi ved hjælp af et gamma-stråle-mikroskop gerne vil måle på en elektron (det må være en af de mest fundamentale måder, vi kan måle på en elektron). Vi ved, at opløsningen i et sådant mikroskop vil være givet ved $\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \epsilon}$ (se figur 3.7).



Figur 3.7: Skitse af et gamma-stråle-mikroskop.

Desuden ved vi, at en elektron, der bliver ramt af en foton, får et Compton-rekyl på $p = \frac{h}{\lambda}$. Usikkerheden på Compton-rekylet må da være $\Delta p_x \approx 2 \frac{h}{\lambda} \sin \epsilon$. Produktet af de to usikkerheder giver

$$\Delta x \Delta p_x \approx h$$

Denne relation kaldes Heisenberg's ubestemthedsrelation. I dette tankeeksperiment kan det siges sådan, at jo større bølgelængde, det gammakvant, vi måler med, har (dvs. jo mindre energi), jo mindre bliver usikkerheden på Compton-rekylet. Men samtidig bliver opløsningen til gengæld større. Omvendt, hvis vi vil have en bedre opløsning, må vi bruge gammakvanter med større energi, og det giver større usikkerhed på Compton-rekylet.

Heisenberg laver to konklusioner ud fra tankeeksperimentet. Den ene er den konkrete ubestemthedsrelation, og den anden er, at den matematiske formalisme ikke tillader naturen et eksperiment, der samtidig kan bestemme elektronens sted og hastighed. Senere går Niels Bohr videre end dette og siger, at ubestemtheden er en egenskab ved naturen i sig selv. Den har ikke kun at gøre med vore målinger. Det er altså en revidering af Heisenberg's synspunkt, og det er det, vi tror på nu.

De fysiske forudsætninger for tankeeksperimentet er optik (i forbindelse med mikroskopet) og teorien for Compton-spredning. Disse forudsætninger kommer ikke på noget tidspunkt "i fare" i tankeeksperimentet, og det må derfor siges at være selvkonsistent. Derudover er der en høj grad af visualiserbarhed i form af nogle konkrete fysiske objekter (elektron, foton og mikroskop); der er ikke "bare" tale om en abstrakt logisk ræsonnering.

Tankeeksperimentet tager udgangspunkt i en velkendt teori, og indfører noget nyt i form af ubestemthedsrelationen. Samtidig bekræfter det Heisenberg's filosofiske forestilling om eksperimentets begrænsninger (selvom vi nu har en anden forestilling). Begge dele var konkrete formål med tankeeksperimentet. Det må derfor falde ind under to forskellige kategorier; det er konstruktivt i forhold til ubestemthedsrelationen og illustrativt i forhold til eksperimentets begrænsninger.

3.8 Schrödinger's kat.

De fleste tankeeksperimenter i starten af dette århundrede er forsøg på at underminere den Københavnske fortolkning af kvanteformalismen. Erwin Schrödinger (1897-1961) opstillede således et tankeeksperiment i 1935 [Brown, s. 24], som havde til formål at vise det absurde i at opfatte bølgefunktioner som en egenskab ved naturen. En del af den Københavnske fortolkning gik netop ud på, at en tilstand, der består af superpositioner af egentilstande ikke bare afspejler vores uvidenhed

om naturen, men at det er selve naturen, der befinder sig i denne superposition. Så længe man kun beskæftiger sig med et mikroskopisk system kan dette accepteres. Schrödinger overførte problematikken til det makroskopiske plan ved følgende tankeeksperiment:

En kat er lukket inde i en boks med følgende djævelske indretning: I boksen er der lidt radioaktivt stof og en Geiger-tæller. I løbet af et tidsinterval vil der måske ske et henfald. Sker dette vil tælleren udløses og gennem et relæ slippes en hammer, der vil slå en lille flaske indeholdende hydrocyanid syre itu.



Figur 3.8: Schrödinger's kat [Brown, s. 24].

Lades systemet alene en time, er der en vis sandsynlighed for, at der er sket et radioaktivt henfald. Bølgefunktionen for det radioaktive stof er en superposition af de to tilstande, der svarer til, at der hhv. er sket et henfald og ikke er sket et henfald. Hvis der er sket et radioaktivt henfald, vil katten være død. Bølgefunktionen Ψ for hele systemet vil udtrykke dette ved at indeholde både den døde og den levende katts tilstand. Hvis dette skal fortolkes ifølge Københavnerskolen, vil det altså sige, at katten er både død og levende på samme tid. Og dette er jo intuitivt en absurd tanke, der strider imod den klassiske fysik, hvilken katten som et klassisk system bør følge.

Ikke desto mindre fastholder Københavnerskolen denne fortolkning af bølgefunktionen. Der er forskellige bud på, hvordan man kan gøre dette. Det mest almindelige, og det som vi hælder til, handler om målinger. I kvantemekanikken vil en måling altid give en egenværdi. Schrödinger's udlægning af tankeeksperimentet bygger på, at der først

sker en måling, idet vi åbner kassen og ser efter, om katten er død eller levende. Men måske sker målingen i virkeligheden allerede i kraft af, at katten er til stede i kassen. Der er da ingen problemer i tankeeksperimentet, da katten netop til enhver tid skal give udtryk for en egenverdi. Ifølge Hilary Putnam [Jammer, s. 217] bruger mange fysikere netop egenverdi-kriteriet til at finde ud af, hvornår der sker en måling i et system. Man kan da sige, at i det øjeblik naturen tvinges til at antage en egenverdi, er der sket en måling, selvom der ikke lige har stået et menneske og set det.

Det er interessant ved dette tankeeksperiment, at den situation, der opstilles, godt kan forekomme i virkeligheden. Man kunne altså godt lave et rigtigt eksperiment med samme opstilling. Men man ville ikke kunne bruge et sådant eksperiment til hverken at afkræfte eller bekræfte nogen fortolkning af bølgefunktionen.

Et andet interessant aspekt ved dette tankeeksperiment er, at en af dets forudsætningerne må siges at være almindelig sund fornuft i form af en forestilling om, at en kat ikke både kan være død og levende. Det er en forestilling, som ligger dybt i os, og som vi ikke vil give afkald på. Konklusionen bygger i høj grad på denne forestilling.

Iøvrigt opfylder det alle vores betingelser for at være et tankeeksperiment, og det falder ind under kategorien af destruktive tankeeksperimenter, da dets formål er at gøre op med den Københavnske fortolkning af kvanteformalismen, selvom det ikke lykkedes.

3.9 Opsamling.

Vi har ikke på noget tidspunkt i gennemgangen haft alvorlige problemer med at bruge vores begrebsramme fra kapitel 2, men vi har haft problemer med at sætte os selv i tankeeksperimentets ophavsmands sted. Dette skyldes bl.a. at vi ikke har haft originaltekster til tankeeksperimenterne, og at det i det hele taget er svært at vurdere, med hvilket formål et bestemt menneske har fremsat et tankeeksperiment. Især har det givet problemer med kategoriseringen, når vi har skullet afgøre, om et tankeeksperiment tilhører den illustrative kategori eller en af de to andre. De fleste konstruktive og destruktive tankeeksperimenter vil på et eller andet tidspunkt blive illustrative, fordi de har opfyldt deres formål eller er blevet forkastede. Det svære har været at afgøre for en given formulering af et tankeeksperiment, om dette tidspunkt allerede var indtruffet, da formuleringen blev fremsat.

Af de tankeeksperimenter, vi har nævnt, har der ikke været nogen, som blev fremsat med det mål at planlægge et rigtigt eksperiment. Det skyldes vel, at sådanne hurtigt mister deres værdi og bliver glemt i forhold til det rigtige eksperiment. Den grund til at fremføre tankeeksperimenterne, vi ser flest gange, er, at det er teknologisk umuligt at udføre dem rigtigt. Dette er f.eks. tilfældet i forbindelse med Heisenberg's ubestemthedsrelation, da der ikke findes gamma-stråle-mikroskoper. Ellers er der et par, der ligger udenfor vores direkte erfaringsområde; f.eks. Schrödinger's kat, fordi det handler om fortolkningen af naturen, netop når vi ikke ser på den. I Galilei's fri fald ser vi et eksempel på, at tankeeksperimentet kommer med bedre argumenter, end et tilsvarende rigtigt eksperiment ville gøre.

Flere af de tankeeksperimenter, vi har nævnt, handler om forståelsen af svære begreber, eksempelvis Newton's spand, der behandler rumbegrebet og Schrödinger's kat, der behandler fortolkningen af bølgefunktionen. Vi ser også flere tankeeksperimenter ved pagadigmeskift, bl.a. er der mange tankeeksperimenter om kvantemekanik. Grunden hertil kan være, at der ved paradigmeskift er et større behov for tankeeksperimenter i forbindelse med revurdering af tidligere begreber. Men det kan også skyldes, at tankeeksperimenter, der opstår i forbindelse med paradigmeskift, er de mest interessante og derfor ofte bliver fremhævet, når emnet tankeeksperimenter behandles. Det er en mulig forklaring på, hvorfor så mange tankeeksperimenter handler om svære begreber.

Alt i alt tyder det på, at vores krav til og kategorisering af tankeeksperimenter er fyldestgørende til generelt at udtale sig om tankeeksperimenter gennem tiderne.

Vi skal nu vælge de to tankeeksperimenter, som vi vil gå i dybden med i de næste kapitler. Som nævnt i indledningen vil vi vælge begge to fra perioden omkring 1930. I denne periode var der mange tankeeksperimenter omkring rigtigheden af kvantemekanikken, og det vil være oplagt at vælge et af disse. Specielt er der et af dem, der kombinerer flere grene af fysikken, der ellers ikke har noget specielt med hinanden at gøre. Dette tankeeksperiment behandler vi i kapitel 5, og vi kalder det "foton i en kasse". I kapitel 4 vælger vi at behandle en formulering af Maxwell's dæmon, fordi den handler om termodynamik, som ellers ikke er genstandsområde for mange tankeeksperimenter, og fordi der til stadighed kommer bidrag til forståelsen af Maxwell's dæmon, hvilket gør det til et spændende emne.

Kapitel 4

Maxwell's dæmon

Vi skal her gå i dybden med tankeeksperimentet "Maxwell's dæmon". Maxwell's dæmon er et lille væsen, der blev introduceret af den skotske fysiker James Clerk Maxwell (1831-1879) i 1871 som "a being" med specielle evner. Så specielle evner at den umiddelbart er i stand til at skabe en temperaturforskel uden at udføre et arbejde. Dette er i modstrid med termodynamikkens 2. hovedsætning, og den har derfor været genstand for mange fysikers interesse siden. "A being" blev senere døbt "Maxwell's dæmon" af fysikeren William Thomson også kendt som Lord Kelvin (1824-1907).

Vi vil først forklare, hvad termodynamikkens 2. hovedsætning går ud på, for derefter at se på nogle forskellige anskuelser af Maxwell's dæmon. Endelig vil vi behandle Leo Szilard's formulering fra 1929 mere grundigt.

4.1 Termodynamikkens 2. hovedsætning.

Termodynamikkens 2. hovedsætning er blevet formuleret på flere forskellige måder. Alle måderne er i sidste ende ækvivalente.

Betragter vi en cyklus for en varmekraftmaskine, består denne i, at der fra et varmt reservoir overføres varme til et koldere reservoir under udførelse af arbejde på omgivelserne. Det er aldrig set, at en maskine er i stand til at omdanne varme til arbejde, uden at der også overføres varme til et koldere reservoir. Dette er formuleret i Planck's udsagn [Zemansky, s. 147]:

It is impossible to construct an engine which, working in a complete cycle, will produce no effect other than the raising of a weight and the cooling of a heat reservoir.

Lord Kelvin udtaler sig om det samme i 1851 i udsagnet [Zemansky, s. 147]:

It is impossible by means of inanimate material agency to derive mechanical effect from any portion of matter by cooling it below the temperature of the coldest of the surrounding objects.

De to udsagn er faktisk ækvivalente, og den 2. hovedsætning kan formuleres i et fælles udsagn, kendt som Kelvin-Planck's udsagn for den 2. lov [Zemansky, s. 147]:

No process is possible whose sole result is the absorption of heat from a reservoir and the conversion of this heat into work.

Der findes også maskiner, der virker omvendt, altså hvor der tilføres arbejde til et system således, at der overføres varme fra et koldt reservoir til et varmere reservoir. Et eksempel på sådan en maskine er et køleskab. På baggrund af dette kom Rudolf Clausius i 1850 med følgende formulering af den 2. lov [Maxwell, s. 153]:

It is impossible for a self-acting machine, unaided by any external agency, to convey heat from one body to another at a higher temperature.

Dette udsagn udtaler, at varme spontant altid vil strømme fra et varmere reservoir til et koldere, og at strømning den anden vej kræver tilført arbejde som i køleskabet. Umiddelbart virker de to udsagn - Kelvin-Planck's og Clausius' - forskellige, men det kan vises, at de er ækvivalente.

En anden måde at formulere den 2. hovedsætning på, blev foreslået af Clausius i 1865, ved brug af et nyt begreb, **entropi**. Clausius definerede entropiændringen af et system ved en reversibel proces som

$$\Delta S = S_2 - S_1 =_R \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

hvor dQ er den varmemængde, der overføres fra eller til systemet. ΔS er negativ eller positiv, alt efter om varme er fjernet fra eller absorberet af systemet. Clausius formulerede 2. hovedsætning i udsagnet, at entropien i universet går mod et maximum.

Boltzmann definerede siden (1878) entropien af et system til at være

$$S = k \log W \quad (4.1)$$

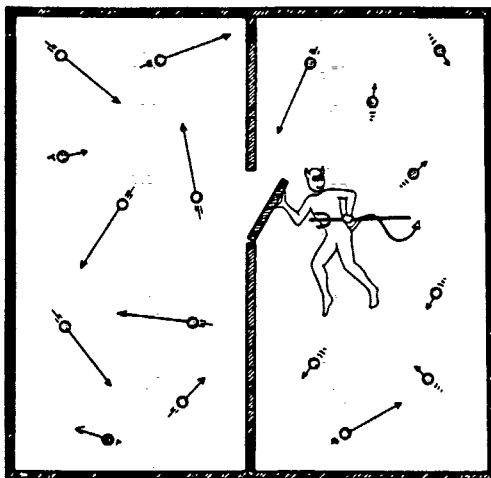
hvor k er Boltzmann's konstant og W er den såkaldte tilstandssum. Tilstandssummen af et makroskopisk system er groft sagt et tal for, hvor mange mikrotilstande makrotilstanden indeholder. W kan altså mindst være 1, således at entropien altid er positiv. Og jo færre mikrotilstande, der er, jo mindre er entropien. Derfor kaldes entropien ofte et mål for et systems uorden (idet man siger, at ordenen er større, jo færre mikrotilstande, der er). 2. hovedsætning kan nu udtrykkes ved, at entropien af et isoleret system altid vil stige.

En maskine, der udnytter varmen fra et reservoir til arbejde alene (hvor der sker et samlet entropifald), kaldes en evighedsmaskine af 2. art, fordi den vil modstride termodynamikkens 2. hovedsætning.

4.2 Formuleringer af dæmonen.

I 1871 udgav James Clerk Maxwell bogen "Theory of Heat". Heri samler han den viden, man på den tid var i besiddelse af om varme og udformer en teoribygning for den fysiske gren termodynamik. Det er i denne bog, vi første gang støder på tankeeksperimentet "dæmonen". I bogens sidste kapitel skriver Maxwell, efter at have udnævnt termodynamikkens 2. hovedsætning til det mest grundlæggende faktum i termodynamikken [Maxwell, s. 308]:

But if we conceive a being whose faculties are so sharpened that he can follow every molecule in its course, such a being, whose attributes are still as essentially finite as our own, would be able to do what is at present impossible to us. For we have seen that the molecules in a vessel full of air at uniform temperature are moving with velocities by no means uniform, though the mean velocities of any great number of them, arbitrarily selected, is almost exactly uniform. Now let us suppose that such a vessel is divided into two portions, A and B, by a division in which there is a small hole, and that a being, who can see the individual molecules, opens and closes this hole, so as to allow only the swifter molecules to pass from A to B, and only the slower ones to pass from B to A. He will thus, without expenditure of work, raise the temperature of B and lower that of A, in contradiction to the second law of thermodynamics.



Figur 4.1: Maxwell's dæmon [Brown, s. 38].

Det er herved muligt at konstruere en evighedsmaskine af 2. art, ved blot at placere systemet i et varmereservoir og udnytte den skabte temperaturforskel til at drive en turbine.

Maxwell betvivler ikke den 2. hovedsætning, så længe man har at gøre med legemer i forsamlinger og ikke er i stand til at forestille sig eller behandle de enkelte molekyler for sig. Er man derimod i stand til det (som dæmonen er), er han dog ikke sikker på gyldigheden af 2. hovedsætning. Han ser det altså som en mulighed, at et væsen som dæmonen vil være i stand til at lave en evighedsmaskine af 2. art.

En alternativ måde at skabe en evighedsmaskine på, er at forestille sig, at dæmonen istedet for at sortere molekylerne blot åbner lemmen, når der kommer molekyler fra det ene rum, men ikke når de kommer fra det andet rum [Voetmann]. Herved vil molekylerne samles i det ene rum, og en trykforskel vil være skabt. Forbindes beholderen med en trykluftsmotor, vil denne som konsekvens af trykforskellen kunne udføre et arbejde ved for eksempel at hejse et lod. Dæmonen skal altså være i stand til at se de enkelte molekyler og være hurtig nok, så der ikke transporteres molekyler den anden vej. Det er ikke nødvendigt, at han kender til de enkelte molekylers hastigheder, hvilket han skal i Maxwell's egen udlægning.

Siden Maxwell fremførte sin "dæmon" har mange helt op til i dag beskæftiget sig med dæmonen. Den forefindes i mange forskellige afskyninger; som en lille djævel med horn i panden, nogle gange udstyret med lygte, eller som en ren mekanisk installation (for eksempel en svingdør), osv. Det er umiddelbart svært at fremskaffe et levende væsen, der kan

besidde dæmonens evner. Det ville derfor være mere hensigtsmæssigt med en ren mekanisk anordning, og en sådan foreslår den polske fysiker M. Smoluchowski i 1913 [Ehrenberg, s. 106]. Han betragter dæmonen som en svingdør, der kun kan åbnes den ene vej. Når der så kommer et molekyle fra det ene rum og rammer døren, åbnes den, og molekylet kan passere. Det kan ikke ske, hvis et molekyle kommer fra det andet rum. Princippet er grundlæggende det samme som for en elektrisk diode. En sådan ensretter kan ikke virke som en dæmon, da den altid i ligevægt vil være udsat for statistiske fluktuationer (f.eks. brownske bevægelser i tilfældet med lemmen, da den må være af atomar størrelse), der netop udligner det, der ellers kunne vindes.

Smoluchowski udelukker derfor dæmonen som en rent mekanisk/fysisk anordning, men konkluderer, at hvis den skal fungere, må den være et intelligent væsen, der kan forsøge at undvige disse fluktuationer. Om et væsen, der kan udfylde dæmonens funktion, kan findes, er han dog i tvivl om [Ehrenberg, s. 107]. Lord Kelvin's formulering af 2. hovedsætning (side 34) tyder på, at også han har haft en idé om, at en dæmon ikke kan fungere rent mekanisk.

4.3 Szilard's behandling af dæmonen.

Leo Szilard (1898-1964) publicerede i 1929 artiklen "Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen", der behandler Maxwell's dæmon. I artiklen præsenterer han som den første et bud på, hvorfor dæmonen ikke kan fungere. Det essentielle i dette bud, er, at Szilard giver en simpel forskrift for, hvad dæmonen skal kunne, og for hvad en måling er. Desuden påpeger han, at man skal huske at medregne dæmonen til systemet, når man beregner entropiændringerne. Szilard kobler målinger til begrebet hukommelse og argumenterer for, at dæmonen ikke behøver at være et intelligent væsen.

I sin artikel bruger han to konkrete bud på evighedsmaskiner af 2. art for at forklare, hvorfor Maxwell's dæmon ikke virker.

En måling i Szilard's terminologi.

Szilard karakteriserer en måling som en kobling mellem to parametre; én, der skal måles og én, der fungerer som en slags hukommelse.

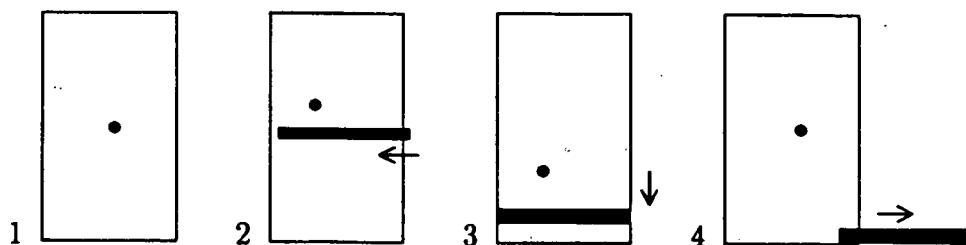
En partikel har f.eks. en parameter kaldet x -koordinaten. Denne ønsker vi til et givet tidspunkt at måle. Til dette bruger vi en anden parameter y . Denne y -parameter tildeles forskellig værdi alt efter værdien af x ; lad os f.eks. sige, at hvis $x > 0$, får y værdien 1, og hvis $x < 0$, får y værdien -1. Når målingen er sket, vil x muligvis skifte værdi, men y vil beholde sin værdi, og fungerer derfor som en slags hukommelse for, hvilken værdi x havde ved måletidspunktet. Szilard argumenterer for, at en måling altid vil medføre en entropistigning i måleredskabet netop på grund af denne y -parameter. Kvalitativt kan det siges sådan, at y inden en måling er veldefineret neutral (altså ikke har nogen entropi), men efter målingen kan antage flere mulige værdier (i dette eksempel 2) og derfor har en entropi. I dette eksempel vil entropistigningen ved en måling være $k \log 2$ ifølge ligning (4.1). I ikke så simple eksempler vil entropistigningen afhænge af, hvilken værdi y får ved målingen [Szilard].

Funktionen af Maxwell's dæmon er egentlig bare at udføre målinger på denne måde. Altså at koble to parametre til hinanden; den ene skal aflæses, og den anden skal tildeles en værdi i henhold til aflæsningen. I sin artikel starter Szilard med at fremføre et meget simpelt eksempel, hvor det bare er én partikels position, der skal bestemmes, hvorefter en knap flyttes enten til højre eller til venstre. Dette er en så simpel procedure, at et menneske vil kunne udføre den. Szilard viser så, at der i dette simple eksempel ikke kan skabes en evighedsmaskine af 2. art netop på grund af entropistigningen ved målinger.

Szilard's første eksempel.

I en stående hul cylinder, der er lukket i begge ender, er der en gas bestående af et enkelt molekyle. Det er muligt at dele cylinderen i to volumener V_1 og V_2 , ved at indsætte en skillevæg fra siden et vilkårligt sted. Denne skillevæg kan derefter fungere som et stempel, der kan bevæges op eller ned i cylinderen (se figur 4.2). Cylinderen er omgivet af et varmereservoir med temperaturen T . Dette sikrer, at gassen i cylinderen kan gennemgå en isothermisk udvidelse, når skillevæggen flyttes i beholderen. Før skillevæggen indsættes, vil molekylet kunne bevæge sig overalt i beholderen.

Forestiller man sig nu, at en mand indsætter skillevæggen, vil molekylet bagefter være enten i V_1 eller i V_2 . Dette noteres af manden, og hvis molekylet er i den øverste del af cylinderen, bevæges stemplet langsomt ned mod bunden (det kan gøres mekanisk, hvis blot manden angiver



Figur 4.2: Szilard's første forslag.

med en knap, hvilken vej, skillevæggen skal bevæges). Molekylet vil hele tiden være over stemplet, men det vil støde ind i det mange gange og derved udføre et arbejde på stemplet, til dette er i bund. Dette arbejde svarer til en isotermisk ekspansion af en et-molekyl idealgas fra volumenet V_1 til volumenet $V_1 + V_2$. Molekylet bevæger sig atter i hele cylinderen, og stemplet kan trækkes ud af cylinderen for på ny at indsættes fra siden. Er molekylet under skillevæggen istedet for over, bevæges den blot opad istedet for nedad (se figur 4.2).

Efter en hel cyklus vil cylinderen være i samme tilstand som oprindeligt, og der vil derfor ikke være sket nogen entropiændring i cylinderen. Fra det omgivende varmereservoir bliver der i løbet af cyklussen fjernet varme, hvilket medfører et entropifald i reservoiret, og et tilsvarende arbejde bliver udført på skillevæggen.

I dette tilfælde er entropistigningen i måleredskabet ved en måling af partiklens position uafhængig af den værdi, y får ved målingen, og givet ved

$$\bar{S} = \bar{S}_1 = \bar{S}_2 = k \log 2$$

hvor index 1 og 2 svarer til, at partiklen befinder sig i hhv. V_1 og V_2 . Den isotermiske ekspansion af et-molekylgassen giver et entropifald i varmereservoiret på

$$\bar{s}_1 = k \log \frac{V_1}{V_1 + V_2}$$

$$\bar{s}_2 = k \log \frac{V_2}{V_1 + V_2}$$

Hvis frekvenserne for at finde partiklen i hhv. V_1 og V_2 kaldes ω_1 og ω_2 , vil den samlede gennemsnitlige entropistigning i varmereservoiret være

$$\bar{s} = \omega_1 \bar{s}_1 + \omega_2 \bar{s}_2$$

Frekvenserne er givet ved volumenforholdene. Den samlede entropistigning i hele systemet $\bar{S} + \bar{s}$ bliver da større end eller lig 0, da

$$\frac{V_1}{V_1 + V_2} k \log \frac{V_1}{V_1 + V_2} + \frac{V_2}{V_1 + V_2} k \log \frac{V_2}{V_1 + V_2} + k \log 2 \geq 0$$

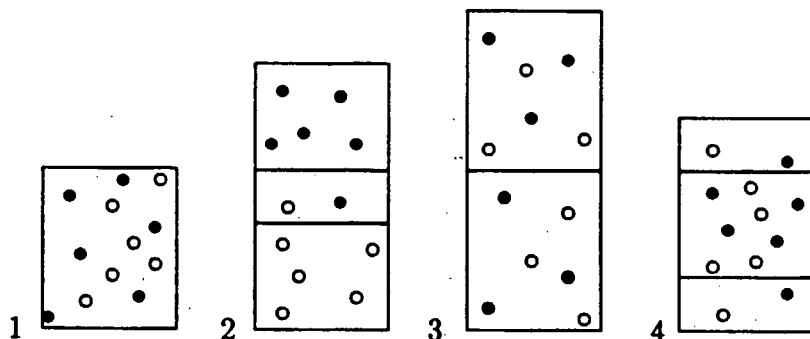
Når dæmonen regnes med som en del af systemet, og det antages, at målingen medfører en entropistigning på $k \log 2$, vil denne stigning altså kompensere for den reduktion, der ellers kunne opnås ved den isoterme ekspansion. Dæmonen kan altså ikke muliggøre en evighedsmaskine af 2. art.

Szilard har nu vist, at i dette simple eksempel kan en dæmon ikke fungere. Han går i artiklen videre med at generalisere til et mere kompliceret eksempel med flere partikler. Her er det dog ikke så simpelt at finde entropistigningen ved en måling, så han nøjes med at beskrive, hvad der skal til for at vise, at den 2. hovedsætning ikke brydes.

Szilard's andet eksempel.

I en lukket beholder er en blanding af to molekylarformer af en substans (f.eks. orto-hydrogen og para-hydrogen), som kan omformes til hinanden, og som i ligevægt optræder i forholdet $\omega_1 : \omega_2$. Vi benytter en parameter x , der afgør, hvorvidt to molekyler på denne måde er kemisk forskellige. Desuden har vi som før en anden parameter y , som bruges til at måle og huske x -parameteren. Hvis to molekyler har forskellig y -værdi, er de også kemisk forskellige (Szilard specificerer ikke nærmere, hvad y kunne være). I beholderen er der fire stempler; to (A og A'), der ikke kan bevæges, og to (B og B'), der kan bevæges (se figur 4.3). Stempel A og B er uigennemtrængelige for alle molekyler i beholderen. A' er gennemtrængelig for nogle af molekylerne (f.eks. parahydrogen), og B' er gennemtrængelig for de resterende (ortohydrogen).

Først er alle molekylerne imellem A og B. Bevæges nu B og B' opad, mens afstanden imellem dem bevares, vil molekylerne blive sorteret, idet den ene slags trænger gennem B', og den anden slags trænger gennem A'. Beholderens volumen er nu fordoblet. Stemplerne bevæges, uden at der udføres noget arbejde eller tilføres varme. Ligevægtssituationen opstår atter efter en tid, hvor molekylerne omformes til hinanden (så forholdet $\omega_1 : \omega_2$ genskabes i hvert af de to rum). Herved sker der en varmeudveksling mellem beholderens to rum, og entropien falder.



Figur 4.3: Szilard's andet forslag.

Vi kan nu skifte A' og B' ud med to andre stempler A*' og B*', som er gennemtrængelige for molekyler af forskellig y -værdi istedet for forskellig x -værdi. Værdien af y er endnu ikke blevet ændret. Man kan nu komme tilbage til udgangspunktet ved at bevæge de nye stempler, hvor det kun tillades molekylerne at trænge igennem i overensstemmelse med deres oprindelige form. Hele proceduren kan derefter gentages.

Igen må det gælde, at den entropistigning, som målingerne på molekylerne medfører, må kompensere for den reduktion, som opstår ved udvidelsen. I artiklen viser Szilard, at dette generelt kan formuleres i følgende relation

$$e^{\frac{-\bar{s}_1}{k}} + e^{\frac{-\bar{s}_2}{k}} \leq 1 \quad (4.2)$$

hvor \bar{s}_1 og \bar{s}_2 igen står for entropistigningerne ved målinger, hvor y antager de to forskellige mulige værdier [Szilard, s. 126].

Det sidste, Szilard gør i artiklen, er, at argumentere for, at dæmonen ikke behøver at være et levende væsen, men at det er nok, at den har en form for hukommelse. Dette ligger simpelthen i, at dæmonen bare skal lave målinger. Og da en måling blot består i en kobling af to parametre, kan det gøres mekanisk, hvis bare der er en form for hukommelse, der kan bruges som koblingsparameter. Et eksempel på en måleenhed kan være et legeme, der opvarmes til en given temperatur, således at hukommelsen består i legemets energi. Dette eksempel regner Szilard på, og han viser, at der i denne måleenhed vil ske en entropistigning, der opfylder ligning (4.2) [Szilard, s. 128].

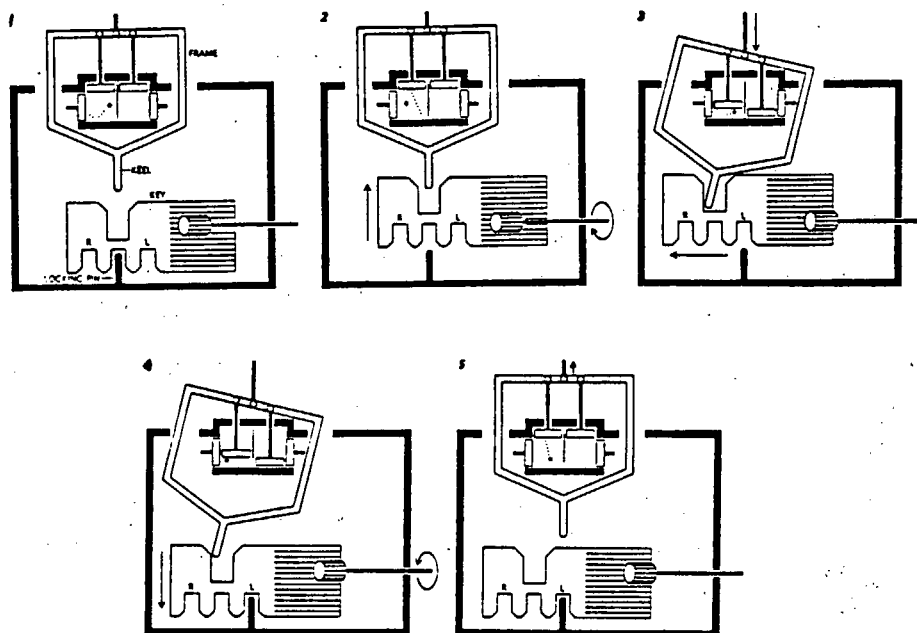
4.4 Den videre udvikling af Maxwell's dæmon.

Selvom Leo Szilard nok havde forestillet sig det, blev dæmonen ikke ma-
net helt til jorden med hans artikel. Mange er siden kommet med yder-
ligere tilføjelser, kommentarer og påpegelser af fejl. Den mest kendte,
der har arbejdet med dæmonen siden Szilard, er nok fysikeren Léon
Brillouin.

Brillouin viser ved flere konkrete eksempler, hvorfor det må skabe en-
tropi at udføre en måling [Brillouin]. Generelt argumenterer han for,
at der er perception, altså sansning, forbundet med at måle. Den mest
brugte form for perception er den visuelle. Derfor foreslår han i forbin-
delse med Szilard's første maskine, at man lyser ind i hvert af de to rum
for at fastslå, hvor partiklen er. Systemet har egenskaber som et abso-
lut sort legeme, og man skal derfor lyse med en bølgelængde, der ikke
forekommer i så høj grad ved den givne temperatur for at kunne "se"
noget. Dette vil netop skabe en entropi, der er stor nok til at kompen-
sere for reduktionen senere, præcis som Szilard også sagde. Brillouin
laver også en mere direkte relation mellem entropi og information, som
han udtrykker

"Information is thus defined by the corresponding amount of
negative entropy."

Den amerikanske fysiker Charles Bennett påpegede i 1982 en fejl i
Szilard's og Brillouin's argumenter [Bennett]. Bennett viser, at man
godt kan lave målinger uden at skabe entropi ved selve måleprocessen.
Han giver et konkret eksempel på dette i forbindelse med Szilard's første
maskine (se figur 4.4). Måleenheden er rent mekanisk, og fungerer uden
at skabe entropi. Det betyder naturligvis ikke, at maskinen vil fungere,
men at entropistigningen må opstå på et andet tidspunkt. Bennett vi-
ser, at det at smide informationen væk igen (altså at nulstille måleren)
også kan skabe entropi. Det er en vigtig pointe, at der skal være tale
om en kredspoces, for at man kan tale om en evighedsmaskine af 2.
art. Szilard havde sådan set ret i, at der forekommer en entropistig-
ning i forbindelse med en måling, men han argumenterede kun for det
tilfælde, hvor det sker under selve måleprocessen.



Figur 4.4: En skitse af en mekanisk måleenhed, der fungerer uden at skabe entropi, til Szilard's første maskine [Bennett, s. 94].

4.5 Kategorisering.

Vi har i løbet af kapitlet været inde på mange forskellige formuleringer af dette tankeeksperiment. Her vil vi fortrinsvis beskæftige os med Szilard's første maskine set i forhold til Maxwell's formulering.

Både Maxwell's og Szilard's formuleringer har alle de kendetegn, der skal til for at karakterisere et tankeeksperiment. I Maxwell's formulering indgår det mystiske "væsen", som har helt specielle evner, og som derfor senere kaldes en dæmon. Det er tilladt at indføre sådan et væsen, da den ikke strider imod nogen forudsætninger i tankeeksperimentet. I Szilard's formulering afskaffes denne dæmon dog og erstattes af en mekanisk indretning, så vi ikke behøver bekymre os om nogen mystisk dæmon.

At Szilard tillader sig at erstatte dæmonen med en mekanisk indretning, begrundet han i sine overvejelser om, hvad målinger indebærer. Han konkretiserer altså dæmonens funktion, som Maxwell kun har beskrevet rent abstrakt, og fjerner derved én af de idealiseringer, som Maxwell

gjorde. Det er egentlig denne konkretisering, som gør ham i stand til at løse problemet. Han går dog ikke så langt i konkretiseringen, at han kommer med en helt specifik måleenhed (før til allersidst i artiklen som et eksempel). Der er altså stadig en del idealisering omkring "dæmonens" specifikke funktion. Senere konkretiserer både Brillouin og Bennett dæmonen endnu mere, end Szilard gjorde.

En anden idealisering, Szilard foretager, er kun at bruge en et-molekyl idealgas. Der ville være nogle tekniske problemer i at skulle fremstille sådan en i virkeligheden. En anden vanskelighed ved at skulle udføre dette tankeeksperiment som et rigtigt eksperiment ligger i begrebet entropi. Entropi er ikke en målelig størrelse, så det vil være svært at fastslå en entropistigning i en måleenhed.

For Maxwell var formålet med dæmonen at illustrere den 2. hovedsætnings begrænsninger, mens formålet med Szilard's formulering af tankeeksperimentet primært var at argumentere imod Maxwell's formodning om, at termodynamikkens 2. hovedsætning godt kan brydes, hvis blot der findes et væsen med så skarpe sanser, at det kan skelne de enkelte molekyler i en gas. Dette er altså et destruktivt formål, som placerer tankeeksperimentet i kategorien af destruktive tankeeksperimente. Samtidig har Szilard dog også den tanke, at han vil skabe en forbindelse mellem hukommelse og entropi. Denne forbindelse var (så vidt vi ved) ikke tidligere blevet lavet, så der var tale om en nyskabelse. Det var ikke ligefrem en nyskabelse af en lov eller teori; snarere af et princip. Alligevel placerer vi af denne grund også tankeeksperimentet i kategorien af konstruktive. Det er altså både destruktivt og konstruktivt, men ikke i forhold til samme emne, så det er ikke platonisk.

Szilard troede sandsynligvis, at begge formål blev opfyldt, hvilket de til dels også gjorde. Han opnåede dog ikke helt at destruere dæmonen som evighedsmaskine, idet der var aspekter, som han ikke havde taget hensyn til (jvf. Bennett's indvendinger ovenfor). Han gjorde dog en stor del af arbejdet i retning af at destruere dæmonen. At skabe en forbindelse mellem hukommelse og entropi blev til gengæld til fulde opfyldt, og det er mest det, han huskes for. I virkeligheden førte denne forbindelse nok til mere, end han havde forestillet sig, at den kunne. Informationsteori er jo nærmest blevet en gren af fysikken (med anvendelse bl.a. i forbindelse med støj og fluktuationer), som der forskes selvstændigt i. Tankeeksperimentet havde altså konsekvenser, der gik ud over Szilard's forventninger og formål med at fremføre det.

Kapitel 5

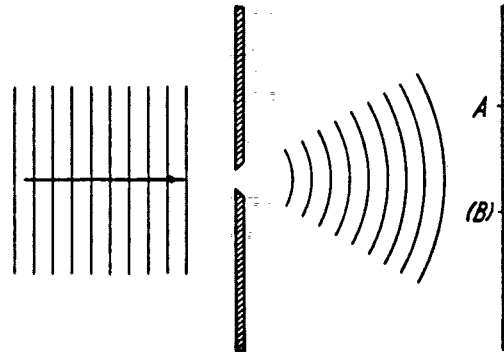
Foton i en kasse

Siden 1911 er der hvert tredje år (anden gang dog allerede i 1913) blevet holdt konferencer for fysikere kaldet Solvay konferencerne. Formålet med konferencerne er først og fremmest at skabe et forum af kompetente fysikere til diskussion af de vanskelige spørgsmål forbundet med kvantemekanik og naturens mindste dele. På konferencerne i 1927 og 1930 forsøgte Einstein ved hjælp af nogle tankeeksperimenter at vise, at kvantemekanikken var inkonsistent. Bohr var naturligvis også til stede og fremførte modargumenter. I dette kapitel vil vi gå i dybden med et af de tankeeksperimenter, der blev fremført af Einstein i 1930.

5.1 Einstein's formulering af tankeeksperimentet.

På konferencen i 1927 havde Einstein fremført adskillige tankeeksperimenter, som havde til formål at angribe bølgefunktionens rolle i kvantemekanikken. De handlede alle om en partikels udbredelse igennem en spalte som en bølge. Dette er en illustration af partikel-bølgedualiteten. I det mest simple tilfælde forestiller Einstein sig en enkelt partikel, f.eks. en elektron, der går igennem en enkelt spalte (se figur 5.1).

På grund af diffraktionen kan man ikke forudsige hvor på den bageste skærm, elektronen vil ramme. Einstein påpeger nu, at der må være en vanskelighed i, at elektronen, idet den rammer skærmen, må overgå fra at være en udbredt bølge til at være i et enkelt punkt. Det må ske momentant, dvs. der kan ikke ske en signaludbredelse fra et sted på



Figur 5.1: Elektron igennem en enkelt spalte [Bohr, s. 55].

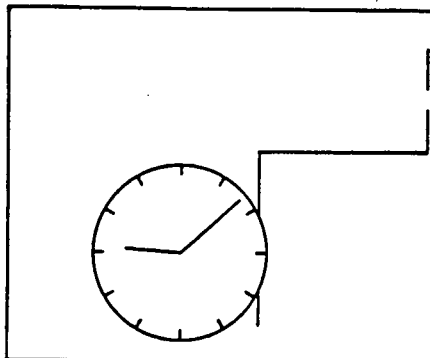
bølgen til et andet (ifølge relativitetsteorien kan en sådan forekomme med højst lysets hastighed; den kan altså ikke ske momentant). Da der ikke kan ske en signaludbredelse, og bølgen alligevel skal finde ud af kun at "materialisere" sig i et enkelt punkt, mener Einstein, at bølgen må have en information om, hvor det skal ske. Bølgebeskrivelsen kan altså ikke alene på en konsistent måde redegøre for elektronens tilsynekomst i et enkelt punkt på skærmen.

Bohr's forklaring på dette er, at bølgen ikke skal forstås som en fysisk bølge, men udelukkende som en sandsynlighedsfordeling for partiklens position. Mange af de tankeeksperimenter, som Einstein foreslog, havde samme karakter som dette; de handlede om partiklers udbredelse gennem en eller flere spalter, og partikel-bølge-dualiteten. I alle tilfælde kunne paradokserne forklares af Bohr med henvisning til fortolkningen af bølgefunktionen og ubestemthedsrelationerne [Bohr, s. 45ff].

På konferencen i 1930 anlagde Einstein derfor en anden strategi. Formålet var stadig at vise kvantemekanikkens inkonsistens, men da Bohr tilbageviste alle hans argumenter med henvisning til ubestemthedsrelationerne, valgte Einstein istedet direkte at angribe en af disse. Dette gjorde han ved at vise en konkret situation, hvor en af ubestemthedsrelationerne, nemlig energi-tid-relationen, ikke er opfyldt. Hvis Bohr ikke kunne fremføre modargumenter baseret på accepterede fysiske principper og love samt kvantemekanikken, på nær energi-tid-ubestemthedsrelationen, ville Einstein have vist et eksempel på kvantemekanikkens inkonsistens.

Einstein formulerede sit tankeeksperiment således:

En kasse indeholder stråling, altså fotoner. Kassen indeholder desuden



Figur 5.2: Kasse med fotoner, ur og lem [Bohr, s. 68].

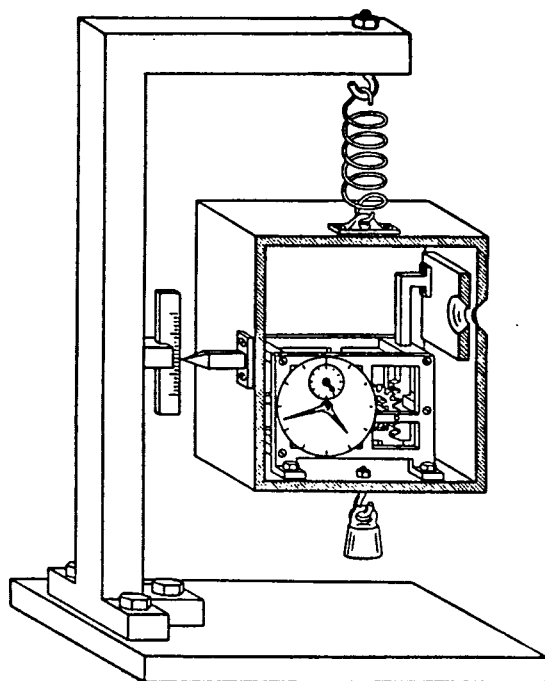
et ur. I kassens ene væg er der en lem, som kan åbnes. Åbningsmekanismen er forbundet med uret, således at uret til et givet tidspunkt kan åbne lemmen (se figur 5.2).

Uret sættes nu til at åbne lemmen i et meget lille tidsinterval til et givet tidspunkt. På den måde kan man opnå, at en enkelt foton slipper ud af kassen, og tidspunktet for undslippelsen kan kendes med vilkårlig nøjagtighed.

Fotonen, der er undsluppet, har en energi E . Fra den specielle relativitetsteori har vi relationen $E = mc^2$. Fotonens energi svarer altså til en masse, og denne masse må ved undslippelsen af fotonen forsvinde fra kassen. Ved at veje kassen før og efter åbningen af lemmen kan vi dermed med vilkårlig nøjagtighed bestemme fotonens energi. Energi-tid-ubestemthedsrelationen $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ er altså brudt.

5.2 Bohr's modargumenter.

Niels Bohr kunne ikke umiddelbart modbevise dette tankeeksperiment. Han kunne ikke svare med det samme, og det siges, at han måtte bruge en søvnløs nat på at finde svaret. Da han så fandt det, var det til gengæld så smukt og overbevisende, at det overbeviste Einstein om kvantemekanikkens konsistens. Han blev dog ved med at anfægte dens fuldstændighed, dvs. spørgsmålet om, hvorvidt kvantemekanikken er en teori, der dækker hele den fysiske virkelighed [Jammer, s. 136].



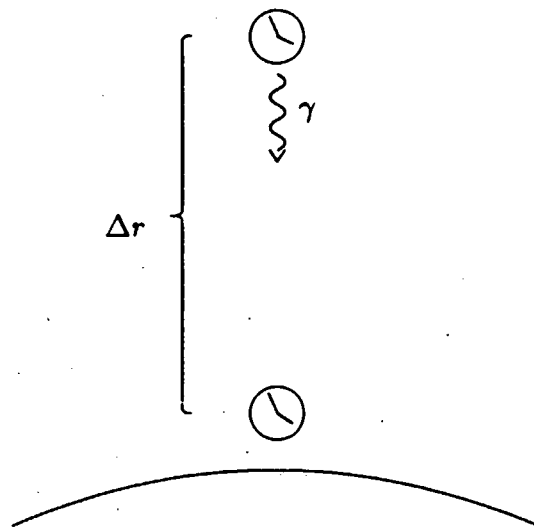
Figur 5.3: Bohr's konkrete opstilling [Bohr, s. 69].

Bohr prøvede at forestille sig en mere konkret opstilling af eksperimentet. Han fandt på denne måde frem til, at uanset opstillingen må kassen kunne bevæge sig i et gravitationsfelt, for at man kan veje den. Dermed befinder også uret sig i dette gravitationsfelt. Et eksempel på et konkret apparat, der kan bruges i tankeeksperimentet ses i figur 5.3. Her bruges en almindelig fjedervægt til vejningen, og vi kan forestille os, at apparatet befinder sig tæt ved jordens overflade (det er det mest naturlige). Vægten kan nulstilles ved at hænge passende lodder under kassen.

Vi ser nu på, hvordan det egentlig er med tidens gang i et gravitationsfelt.

Tid i gravitationsfelter.

Man kan f.eks. forestille sig, at man har to ure, der befinder sig i forskellige højder over jordens overflade. Vi vil gerne undersøge de to ures tikke-frekvens i forhold til hinanden. Da de er adskilte med en afstand Δr (se figur 5.4), må vi sende et signal imellem de to ure for at kunne undersøge dette. Som signal kan vi f.eks. bruge en foton.



Figur 5.4: To ure i forskellig højde over jordens overflade.

Idet fotonen udsendes fra det øvre ur, har den frekvensen ν og dermed energien $E = h\nu$, hvor h er Planck's konstant. Denne energi svarer ifølge den specielle relativitetsteori til en inertiel masse $m = \frac{h\nu}{c^2}$. Hvis vi nu indfører ækvivalensprincippet (inertiel masse = gravitationel masse) vil fotonen, idet den bevæger sig ned igennem jordens gravitationsfelt, tilføres en energi af størrelsen $\Delta E = mg\Delta r = \frac{h\nu g \Delta r}{c^2}$ (g er tyngdeaccelerationen ved jordens overflade). Denne energitilførelse svarer igen til en frekvensændring, som vi kan finde ved at dividere ΔE med h . Afvigelsen i frekvensen for fotonen er altså

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{g\Delta r}{c^2}$$

Når signalet udsendt fra det øvre ur når det nedre ur, har det fået en lidt større frekvens givet ud fra ovenstående formel. Det betyder, at set fra det nedre ur går det øvre ur lidt hurtigere end det nedre. Afvigelsen for et tidsinterval T vil være givet ved

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{g\Delta r}{c^2} \quad (5.1)$$

Dette kaldes tidsforlængelsen (time dilation) tæt ved jordens overflade. Det er egentlig en konsekvens af den generelle relativitetsteori, selvom

det ikke umiddelbart fremgår af den ovenstående udledning. Ækvivalensprincippet, som er kernen i den generelle relativitetsteori, bruges i det ovenstående på det sted, hvor det antages, at fotonen tilføres energi i faldet ned gennem gravitationsfeltet.

Bohr's brug af tidsforlængelsen.

Som det ses på figur 5.3 findes kassens vægt ved at aflæse positionen af en målepind i forhold til en vægtskala. Denne position kan ifølge kvantemekanikken kun findes med en sikkerhed givet ved sted-impuls-ubestemthedsrelationen, $\Delta q \Delta p > h$ ¹. Hvis Δm er den usikkerhed, som vi måler kassens vægt med, kan usikkerheden i kassens impuls på den anden side ikke blive større end den impuls, som et legeme med massen Δm kan nå at få i løbet af det tidsinterval T , måleprocessen tager. Denne impuls vil være givet ved $\Delta p < Tg\Delta m$. Indsætter man denne i ubestemthedsrelationen, får man

$$\frac{h}{\Delta q} < Tg\Delta m \quad (5.2)$$

Den relativistiske tidsudvidelse indenfor intervallet Δq , findes ved at sætte $\Delta r = \Delta q$ i ligning (5.1). Da Δq er en positions-usikkerhed, vil ΔT blive en usikkerhed omkring det eksakte tidspunkt for måleproceduren. Sammenfatter vi ligning (5.1) og ligning (5.2) bliver resultatet følgende relation

$$\Delta T > \frac{h}{c^2 \Delta m} \quad (5.3)$$

Bruger vi igen, at $E = mc^2$, finder vi

$$\Delta E \Delta T > h$$

hvilket netop er ubestemthedsrelationen for tid og energi.

Bohr har hermed vist, at hvis man bruger kvantemekanikken (pånær energi-tid-ubestemthedsrelationen), den specielle relativitetsteori og den generelle relativitetsteori, vil man netop finde, at tiden for fotonens undslippelse og dens energi ikke samtidig kan bestemmes med vilkårlig præcision. Da Einstein fremsatte tankeeksperimentet, havde han håbet, at hans inddragelse af den specielle relativitetsteori kunne bryde kvantemekanikkens konsistens. Istedet viser Bohr, at det netop

¹Egentlig bør der stå $\geq \hbar$, men i sin argumentation bruger Bohr selv h [Bohr, s. 70], det er dog underordnet da $h \geq \hbar$.

er inddragelsen af Einsteins egen generelle relativitetsteori, der gør, at den holder alligevel. Nogen vil måske her indvende, at de ovenstående beregninger jo kun holder for den konkrete målesituation med en fjeder-vægt, men én af Bohr's pointer er netop, at de samme overvejelser vil gælde i ethvert tilfælde, hvor kassen skal vejes. Kassens masse kunne f.eks. også bestemmes ved at give den et skub, og udfra kendskab til den kraft hvormed kassen skubbes, vil man kunne finde massen ved at måle accelerationen. Men dette svarer ifølge ækvivalensprincippet til tilstedeværelsen af et gravitationsfelt.

5.3 Tankeeksperimentets videre historie.

Først og fremmest overbeviser dette tankeeksperiment Einstein om, at kvantemekanikken er en konsistent teori, og han kommer ikke med flere tankeeksperimente, der anfægter dette. Det skyldes nok mest, at det er Einstein's egen teori, der vendes imod ham. Selvom tankeeksperimentet havde stor virkning for Einstein, er der senere kommet meget kritik af det. Bohr selv har kritiseret sin egen løsning bl.a. i forbindelse med ligning (5.2), som siger, at hvis vi gør måleprocessen lang nok, kan vi opnå vilkårlig præcision på samtidige målinger af energi og position. Denne relation giver dog ingen problemer for løsningen, når blot den sættes sammen med ligning (5.3) [Jammer, s. 139].

Einstein fortsætter med at angribe kvantemekanikken, men for dens ufuldstændighed istedet for dens inkonsistens.

En teoris fuldstændighed er et spørgsmål om, hvorvidt teorien er dækkende for den fysiske verden, således at "ethvert element i den fysiske virkelighed har et modsvarende element i den fysiske teori" [Jammer, s. 181]. Kvantemekanikken er en teori, der udover selvfølgelig at være konsistent også skal være fuldstændig.

I et forsøg på at vise kvantemekanikkens ufuldstændighed formulerede Einstein, Podolsky og Rosen i 1935 tankeeksperimentet kendt som EPR-paradokset.

Forudsætningerne for tankeeksperimentet er hele kvantemekanikken, det ovenfor nævnte fuldstændighedskriterie samt et realitetskriterie, der siger, at hvis man uden at forstyrre et system kan forudsige en størrelse med sikkerhed, har størrelsen fysisk realitet [Ein./Pod./Ros.]. Tankeeksperimentet går i det væsentlige udfra et system bestående af to partikler, der i et kort tidsinterval vekselvirker med hinanden, for derefter at blive udsendt i hver sin retning. Måler man f.eks. den ene

partikels impuls, kan man på grund af impulsbevarelse forudsige den anden partikels impuls. Tilsvarende kan man udføre en måling, hvor den ene partikels position fastlægges, hvorefter positionen af den anden partikel kan forudsiges. Disse to størrelser har altså begge fysisk realitet.

Dette sammenholdt med fuldstændighedskriteriet fører til en modstrid, hvoraf Einstein, Podolsky og Rosen konkluderer at kvantemekanikken er ufuldstændig [Ein./Pod./Ros.].

Efter Einstein's død er dette dog gennem et rigtigt eksperiment, Aspect-eksperimentet, blevet afvist [Nørretranders]. Kvantemekanikken er en fuldstændig teori.

5.4 Kategorisering.

I dette afsnit vil vi forsøge at placere tankeeksperimentet i vores begrebsramme.

Først og fremmest vil vi bemærke, at der egentlig er to tankeeksperimentet i dette. Først et formuleret af Einstein og i sig selv en selvstændig enhed bestående af forudsætninger, tankehandlinger og en konklusion. Dernæst et formuleret af Bohr, som også i sig selv er en selvstændig enhed bestående af næsten de samme forudsætninger og tankehandlinger, men den modsatte konklusion. De to formuleringer skal derfor behandles som to separate tankeeksperimentet.

I Einstein's formulering er forudsætningerne for tankeeksperimentet den specielle relativitetsteori og kvantemekanikken. Her omfatter kvantemekanikken ikke energi-tid-ubestemthedsrelationen, da det netop er denne, tankeeksperimentet ønsker at udtale sig om. Egentlig kunne alle andre accepterede teorier også være med som forudsætninger, Einstein bruger dem bare ikke explicit. Det er netop her, Bohr's forudsætninger adskiller sig fra Einstein's, idet han explicit inddrager Newton's mekanik (potentiell energi af et legeme i et tyngdefelt og impuls af et accelereret legeme) samt ækvivalensrelationen fra den generelle relativitetsteori. Desuden inddrager han ubestemthedsrelationen for sted og impuls. Dette er tilladt, da det er kvantemekanikkens konsistens, der skal vises. Det er denne forskel i forudsætningerne for de to formuleringer, der gør, at de når forskellige konklusioner. Ellers er formuleringerne meget ens. Det er næsten den samme konkrete situation med næsten de samme fysiske elementer; en kasse, et ur, en lem og fotoner. Bohr gør det dog lidt mere konkret end Einstein, idet han tilføjer en konkret

vejeenhed i form af et fjederophæng og en måleskala. Dette er vigtigt, for at Bohr kan nå til sin konklusion, da netop den konkrete vejeenhed illustrerer, at der må et gravitationsfelt til, for at man kan veje kassen. Einstein overidealiserede altså sit tankeeksperiment, idet han ikke tillagde selve vejeprocessen nogen betydning. Han kom derfor til en forkert konklusion. Der er ingen af dem, der bekymrer sig om, hvordan uret og lemme kan fungere, men dette er blot noget teknik, der skal fungere og er altså ikke essentielt for tankeeksperimentets udfald.

Einstein's formål med at formulere tankeeksperimentet var uden tvivl at vise, at kvantemekanikken ikke var konsistent. Der var ikke andre sideløbende formål. Det er derfor let at placere denne formulering af tankeeksperimentet i kategorien af destruktive tankeeksperimente. Som sagt blev dette formål ikke opfyldt. Bohr formulerede sit modargument som et tankeeksperiment med det formål at illustrere konsistensen af kvantemekanikken. Hans formulering konstruerede jo ikke nogen ny teori eller nogle nye principper, den illustrerede bare hans allerede kendte fortolkning af kvantemekanikken. Bohr's formulering placerer vi derfor i kategorien af illustrative tankeeksperimente. Vi har altså at gøre med et tankeeksperiment, der har forskellig kategori alt efter, hvem der formulerer det. Det skyldes, at det indgår som et led i en diskussion mellem to mennesker med divergerende holdninger. Det kan synes lidt mærkeligt, at et tankeeksperiment, der hører til i kategorien af illustrative tankeeksperimente, kan have så stor effekt, som Bohr's formulering havde. Det lykkedes ham jo rent faktisk at overbevise Einstein om kvantemekanikkens konsistens. Denne kategori har vi ellers opfattet som ret "harmløs". På den anden side vil vi jo hverken sige, at tankeeksperimentet er konstruktivt eller destruktivt overfor nogen fysisk teori/lov. Når vi ser tankeeksperimentet i sammenhæng, er det alligevel meget naturligt, at det havde så stor virkning. Pointen er, at de kategorier, vi har lavet, kun forholder sig til formål vedrørende fysiske teorier, ikke til tankeeksperimenters eventuelle andre formål. I dette tilfælde forholder Bohr's formulering af tankeeksperimentet sig destruktivt overfor en holdning hos Einstein, der ikke er en fysisk teori. Der er tale om den holdning, at kvantemekanikken ikke kan være konsistent. Denne holdning er ikke i sig selv en fysisk teori, men en stillingtagen til en fysisk teori, og sådan noget tager vores kategorier ikke hensyn til.

Kapitel 6

Diskussion

I dette kapitel vil vi først konkludere i forhold til tankeeksperimenters formål og betydning for fysikken. I kapitel 1 opstillede vi to formål for dette projekt, hvoraf det ene var at undersøge tankeeksperimenters rolle i og for fysikken. Vores hypotese var, at tankeeksperimentet har en betydning for fysikkens udvikling. Det andet formål var at opstille et analyseapparat til brug på tankeeksperimentet. Den hertil knyttede begrebsramme vil vi give en kritik af i sidste del af dette kapitel.

6.1 Konklusioner.

Vi synes generelt, at vi har fået bekræftet vores hypotese om, at tankeeksperimentet kan have indflydelse på fysikkens udvikling. I forbindelse med Maxwell's dæmon sker det ved indførelsen af et nyt begreb, information, i fysikken. For fotonkassen ser vi det som en styrkelse af kvantemekanikken. Vi ser en lignende tendens i flere af de små eksempler fra kapitel 3. Det er klart, at vi ser en bred hypotese om indflydelse bekræftet, idet alle de tankeeksperimentet, vi beskæftiger os med, er kendte. Hvis ikke de havde haft en vis indflydelse, ville de ikke være så kendte. Selve det, at vi har været i stand til at vælge dem, skyldes, at de har haft en virkning, der gør dem værd at huske for eftertiden. Iøvrigt er de fleste udført af indflydelsesrige mænd indenfor fysikken, hvilket i sig selv gør dem anerkendte.

De tankeeksperimentet, vi er stødt på i litteraturen, er fremført af personer, som vi ofte kender fra andre sammenhænge, så det synes at være bestemte mennesker, der kommer med flest interessante fysiske tankeeksperimentet. Der bliver også udført masser af tankeeksperimentet

af "almindelige" mennesker, men de fleste af disse vil nok tilhøre den mindst interessante illustrative kategori (det er ikke så ofte, der f.eks. bliver fremsat ny teori af lægmænd).

Der er måske også nogle mennesker, der er specielt tilbøjelige til at udføre eksperimenter i tanken. Dette lader f.eks. til at være tilfældet med Einstein, som helt fra han er ung (jvf. afsnit 3.5) bruger tankeeksperimenter konstruktivt. Det lader også til, at Galilei og Newton har haft denne egenskab.

Fælles for disse tre er endvidere, at de optræder i forbindelse med gennemgribende revurderinger af begreber i fysikken; det Kuhn kalder paradigmeskift. Einstein bringer f.eks. mange tankeeksperimenter op i forbindelse med indførelsen af både relativitetsteori og kvantemekanik. Begge disse repræsenterer betydelige ændringer af fysikken. Newton arbejder med nye forklaringer på planetbevægelserne og den gængse mekanik. Galilei arbejder også med ny begrebsdannelse i forhold til mekanikken.

Fælles er det, at tankeeksperimenterne handler om svært tilgængelige begreber såsom hastighed og acceleration, rum og tid og kvantemekanik bredt. Det kan skyldes, at der optræder specielt mange tankeeksperimenter i forbindelse med sådanne svære begreber og i forbindelse med revurderinger af disse, men det kan også skyldes, at disse tankeeksperimenter huskes bedst. Vi hælder mest til den første forklaring.

Vi konkluderer altså, at tankeeksperimenter kan have indflydelse på fysikken. Gennem vores eksempler kan vi komme nærmere ind på, hvordan de influerer. For de små eksempler i kapitel 3 gælder det generelt, at de har virket til at indføre nye begreber, revidere gamle begreber og overbevise andre om rigtigheden af noget. Eksempler på dette er i nævnte rækkefølge Newton's roterende spand, idet han indfører begrebet absolut rum; Galilei's frie fald, hvori han reviderer Aristoteles' fremlægning af det frie fald og Einstein's elevator, der godtgør ækvivalensprincippet. Dette svarer meget til de tre former for formål, vi har opstillet i vores kategorisering. Vi har dog svært ved at vurdere, i hvor høj grad selve tankeeksperimenterne har haft denne indflydelse, eller i hvor høj grad de indgår i en større sammenhæng, der tilsammen gør virkningen. For de to store eksempler, hvor der kun er én fri parameter, kategorien, kan vi give mere konkrete bud på deres indflydelse på fysikken omkring 1930.

Szilard's formulering af Maxwell's dæmon har den konkrete effekt, at den for en årrække giver svaret på spørgsmålet om muligheden for konstruktion af evighedsmaskiner af 2. art. Stadig har denne formulering

også givet det meste af svaret, og vigtigst; idéen til resten. Formuleringen er et eksempel på, at et tankeeksperiment giver ny inspiration til fysikken. Her i form af en sammenkædning mellem begreberne entropi og information.

I det andet eksempel, fotonkassen, virkede Bohr's formulering som overbevisningsmiddel overfor en enkelt person, Einstein. Da Einstein var en meget respekteret og indflydelsesrig mand, førte en overbevisning af ham også til en generel overbevisning af den kvantemekanik-kritiske del af fysiksamfundet.

Tankeeksperimenter kan altså virke som overbevisningsmiddel, som inspirationskilde og som middel til at løse problemer (her et problem opstillet i et andet tankeeksperiment fremsat af Maxwell gennem hans formulering af dæmonen). Både Szilard's formulering af Maxwell's dæmon og Bohr's formulering af fotonkassen opfylder dermed deres formål, men vi ser også et eksempel på et, der ikke opfylder sit formål; Einstein's formulering af fotonkassen. Der er en interessant fællesnævner for de to, der opfylder deres formål: Begge gør det ved at tilføje en større grad af konkretisering end andre tidligere formuleringer. I begge tilfælde er der ovenikøbet tale om en større konkretisering i forhold til målesituationen i tankeeksperimentet.

Szilard løser problemet med Maxwell's dæmon ved netop at præcisere, at dæmonens funktion består i at udføre målinger, og han kommer med en definition af en måling. Bohr løser Einstein's problem ved at tilføje en konkret måleenhed til Einstein's formulering af fotonen i kassen. I kapitel 3 ser vi, at større konkretisering af målesituationer fører til problemløsningen i tankeeksperimenterne om Heisenberg's gammastråle-mikroskop og Schrödinger's kat.

I forbindelse med de tankeeksperimenter, der handler om kvantemekanik, er det ikke så mærkeligt, at målinger spiller en stor rolle, da måling er et essentielt begreb i kvantemekanikken. I kvantemekanikken er der to niveauer; naturen, som vi ser den, når vi ser på den, og naturen, når vi ikke ser på den. Det sidste niveau er i høj grad et fortolknings spørgsmål, og er genstand for mange forskellige fortolkninger, hvor Københavnerskolen blot er én. Sammenhængen mellem disse to niveauer formidles netop gennem vores målinger på naturen.

I det andet eksempel er det heller ikke tilfældigt, at målinger kommer til at spille en stor rolle. Vores information om et system er knyttet til de målinger, vi udfører på systemet, og entropibegrebet hænger nøje sammen med vores information om systemet.

I begge eksempler er det overidealiseringer i de tidlige formuleringer, der fører til fejlslagne konklusioner, og større konkretisering af tankeeksperimenterne, dvs. tilnærmelser til rigtigt udførlige eksperimenter, der fører til løsninger.

Vi kan og vil ikke på baggrund af de to eksempler, der begge ligger indenfor områder, hvor målinger naturligt spiller en stor rolle, tillade os at generalisere til alle tankeeksperimenter. Vi mener ikke, at det generelt gælder for tankeeksperimenter, at de har større virkning, jo mere de tilnærmes rigtige eksperimenter. Vi mener, at det er tilfældet for vores to eksempler på grund af de fagområder, de behandler. Man kunne også foreslå en hypotese gående på, at jo mere betydning rigtige eksperimenter har for fysikken, jo mindre betydning får tankeeksperimenterne som uafhængige argumenter. Med teknologiens udvikling har eksperimenter fået stor betydning for fysikken, og det kan være derfor, tankeeksperimenter nærmer sig rigtige eksperimenter.

Vi har prøvet at finde eksempler på tankeeksperimenter i vor tid, dvs. efter 1950, men det er kun lykkedes at finde ganske få. De fleste af disse er senere formuleringer af Maxwell's dæmon, hvoraf vi allerede har nævnt nogle (Brillouin og Bennett). Det kan have mange grunde. Det kan f.eks. skyldes, at vi ikke er inde i en periode med omfattende omvæltninger af fysikkens begreber. Måske er fysikken blevet så stor og specialiseret, at den er svær at overskue, og vi derfor ikke opdager tankeeksperimenterne. Det kan også være, at man skal noget på afstand af begivenheder (også fremførelser af tankeeksperimenter), før man kan bedømme dem, og før andre end de direkte involverede opdager dem. Et fjerde bud er, at der bare ikke er så mange "fødte" tankeeksperimentatorer for tiden. Teknologien er også blevet betydeligt udviklet på det sidste, så flere tankeeksperimenter er mulige at udføre som rigtige eksperimenter. Det vil for mange tankeeksperimenter betyde, at de går i glemmebogen til fordel for de rigtige eksperimenter. Der kan naturligvis stadig være tankeeksperimenter, der af andre end teknologiske grunde ikke kan udføres, men mængden vil være begrænset. Det er da heller ikke alle tankeeksperimenter, der går i glemmebogen, bare fordi et tilsvarende rigtigt eksperiment udføres. Det ser vi f.eks. er tilfældet i forbindelse med EPR og Aspect-eksperimentet, som begge stadig omtales i litteraturen.

6.2 Kritik af begrebsrammen.

Som det fremgår nogle steder i rapporten har vi haft nogle vanskeligheder med at bruge begrebsrammen. Det første problem, vi er stødt på, er, at det kan være svært at afgøre, hvilken kategori, et tankeeksperiment tilhører. Specielt er det svært at skelne den illustrative kategori fra de to andre kategorier af historiske grunde. Når der er gået et stykke tid efter fremførelsen af et tankeeksperiment, kan det være svært at vide, hvilket stadiet en teori var på lige på det tidspunkt, da det blev fremført. Ofte vil et konstruktivt eller destruktivt tankeeksperiment på et eller andet tidspunkt overgå til at være illustrativt, når det er blevet afgjort og accepteret, hvorvidt det opfyldte sit formål eller ej. Et tankeeksperiment kan også subjektivt set være af én kategori, mens det objektivt set er af en anden, så det kan være svært at afgøre, hvordan det skal kategoriseres. For eksempel kan tankeeksperimentatoren have ét formål for sig selv med et tankeeksperiment, mens han kan have et andet formål med at fortælle andre om det. Dette er tilfældet for Newton's formulering af planetbevægelserne, da det for ham selv må have været et illustrativt tankeeksperiment, mens han havde et konstruktivt formål med at videreformidle det.

Vores kategorier forholder sig endvidere kun til formål vedrørende objektive fysiske love eller teorier. De kan ikke umiddelbart bruges til at kategorisere efter eventuelle andre formål, der kan være med at fremføre et tankeeksperiment. Sådanne andre formål kan f.eks. vedrøre personlige holdninger, som det er tilfældet med fotonkassen i kapitel 5. Det giver selvfølgelig nogle mangler i kategorierne, og vi kan ikke være sikre på, at et tankeeksperiment kategoriseret udelukkende ifølge vores kategorier, vil have konsekvenser, der svarer til formålskategorien. Dette er f.eks. ikke tilfældet med Bohr's formulering af fotonkassen.

Generelt kan vi alligevel her sige, at vi har været tilfredse med vores begrebsramme fra kapitel 2. Vi synes, at vi har kunnet bruge den i vores diskussioner og i behandlingen af alle tankeeksperimenterne. Specielt har kategoriseringen givet os et godt udgangspunkt at arbejde med. Det er svært at pege på konkrete steder i rapporten, hvor kategoriernes kvaliteter fremgår, det er mere i vores løbende diskussioner, at vi har brugt dem. Vi har heller ikke været ude for at vores krav har været utilstrækkelige eller for brede. Tværtimod har vi i høj grad kunnet bruge disse krav til at diskutere ud fra.

Litteratur

- [Alonso] Alonso, Marcelo og Finn, Edward J.
Fundamental University Physics
vol. 1-2, Addison-Wesley Publishing Company,
Reading Massachusetts, 1980
- [Bennett] Bennett, Charles H.
Demons, Engines and the second Law
Scientific American 257 (5), 1987, s. 88-96
- [Bohr] Bohr, Niels
Atomfysik og menneskelig erkendelse 1
J.H.Schultz forlag, København, 1957
- [Brillouin] Brillouin, Leon
Science and Information Theory
Academic Press 1962
- [Brown] Brown, James Robert
The Laboratory of the Mind
Routledge, London, 1991
- [Ehrenberg] Ehrenberg, W.
Maxwell's Demon
Scientific American 217 (5), 1967, s. 103-110
- [Ein./Pod./Ros.] Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N.
Can Quantum-Mechanical Description of Physical
Reality Be Considered Complete?
Physical Review, vol. 47, 1935
- [Enzyklopädie] Enzyklopädie Philosophie und
Wissenschaftstheorie
B.I. - Wissenschaftsverlag, 1980

- [Fernandez] Fernandez, E.
From Peirce to Bohr: Theorematic Reasoning and
Idealization in Physics.
- [Feynmann] Feynmann, Richard P.
The Feynmann Lectures, vol. 1-3
Addison Wesley, 1965
- [Harrison] Harrison, Edward R.
Cosmology: The Science of the Universe
Cambridge University Press, 1981
- [Holton] Holton, Gerald
Introduction to Concepts and Theories in Physical
Science
2.udgave, Princeton University Press, Princeton,
1985
- [Jammer] Jammer, Max
The Philosophy of Quantum Mechanics: The In-
terpretations of Quantum Mechanics in Historical
Perspective
John Wiley & Sons, New York, 1974
- [Højgaard] Jensen, Jens Højgaard og Kjørup, Søren
Om fysik 1: Fysikken i historisk og samfundsmæs-
sig belysning. En introduktionsbog
Hans Reitzels Forlag, København 1983
- [Kuhn] Kuhn, Thomas S.
The Essential Tension
kap.10: A Function for Thought Experiments
The University of Chicago Press, Chicago, 1977
- [Mach] Mach, Ernst
Knowledge and Error
kap.11: On Thought Experiments
D. Reidel Publishing Company
Dordrecht-Holland, 1976
Første udgivelse i 1905
- [Maxwell] Maxwell, James Clerk
Theory of Heat
D. Appleton & co., New York, 1872

-
- [Mehra] Mehra, Jagdish
The Solvay Conferences on Physics
D. Reidel Publishing Company
Dordrecht-Holland, 1975
- [Nørretranders] Nørretranders, Tor
Det udelelige
Gyldendal, 2. udgave, 2. oplag, 1988
- [Ohanian] Ohanian, Hans C.
Physics
W.W.Norton & Company, New York, 1985
- [Rohrlich] Rohrlich, Fritz
From Paradox to Reality: Our basic concepts of
the physical world
Cambridge University Press, 1990
- [Sorensen] Sorensen, Roy A.
Thought Experiments
Oxford University Press, New York, Oxford, 1992
- [Szilard] The Collected Works of Leo Szilard: Scientific Pa-
pers
Editeret af Bernard T. Feld og Gertrud Weiss
Szilard
On the Decrease of Entropy in a Thermodynamic
System by the Intervention of intelligent Beings, s.
120-129
Volume 1, 1972, MIT press, London, Cambridge,
Massachusetts
- [Voetmann] Christiansen, Peder Voetmann
Maxwell's dæmon
Gamma nr. 23, feb. 1975, s. 3-16, NBI, København
- [Zemansky] Zemansky, Mark W. og Dittman, Richard H.
Heat and Thermodynamics
6. udgave, McGraw Book Company, 1987

- 1/78 "TANKER OM EN PRAKSIS" - et matematikprojekt.
Projektrapport af: Anne Jensen, Lena Lindenskov, Marianne Kesselhahn og Nicolai Lomholt.
Vejleder: Anders Madsen
- 2/78 "OPTIMERING" - Menneskets forøgede beherskelsesmuligheder af natur og samfund.
Projektrapport af: Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen, Gert Krenøe og Peter H. Lassen
Vejleder: Bernhelm Boss.
- 3/78 "OPCAVESAMLING", breddekursus i fysik.
Af: Lasse Rasmussen, Aage Bonde Krømmer og Jens Højgaard Jensen.
- 4/78 "TRE ESSAYS" - om matematikundervisning, matematiklæreruddannelsen og videnskabsrindalismen.
Af: Mogens Niss
Nr. 4 er p.t. udgået.
- 5/78 "BIBLIOGRAFISK VEJLEDNING til studiet af DEN MODERNE FYSIKS HISTORIE".
Af: Helge Kragh.
Nr. 5 er p.t. udgået.
- 6/78 "NOGLE ARTIKLER OG DEBATINDLÆG OM - læreruddannelse og undervisning i fysik, og - de naturvidenskabelige fags situation efter studenteroprøret".
Af: Karin Beyer, Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 7/78 "MATEMATIKKENS FORHOLD TIL SAMFUNDSØKONOMIEN".
Af: B.V. Gnedenko.
Nr. 7 er udgået.
- 8/78 "DYNAMIK OG DIAGRAMMER". Introduktion til energy-bond-graph formalismen.
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 9/78 "OM PRAKSIS' INDFLYDELSE PÅ MATEMATIKKENS UDVIKLING". - Motiver til Kepler's: "Nova Stereometria Doliorum Vinariorum".
Projektrapport af: Lasse Rasmussen.
Vejleder: Anders Madsen.
-
- 10/79 "TERMODYNAMIK I GYMNASIET".
Projektrapport af: Jan Christensen og Jeanne Mortensen,
Vejledere: Karin Beyer og Peder Voetmann Christiansen.
- 11/79 "STATISTISKE MATERIALER".
Af: Jørgen Larsen.
- 12/79 "LINEÆRE DIFFERENTIALLIGNINGER OG DIFFERENTIALLIGNINGSSYSTEMER".
Af: Mogens Brun Heefelt.
Nr. 12 er udgået.
- 13/79 "CAVENDISH'S FORSØG I GYMNASIET".
Projektrapport af: Gert Kreinøe.
Vejleder: Albert Chr. Paulsen.
- 14/79 "BOOKS ABOUT MATHEMATICS: History, Philosophy, Education, Models, System Theory, and Works of".
Af: Else Høyrup.
Nr. 14 er p.t. udgået.
- 15/79 "STRUKTUREL STABILITET OG KATASTROFER i systemer i og udenfor termodynamisk ligevægt".
Specialeopgave af: Leif S. Striegler.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
- 16/79 "STATISTIK I KRÆFTFORSKNINGEN".
Projektrapport af: Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 17/79 "AT SPØRGE OG AT SVARE i fysikundervisningen".
Af: Albert Christian Paulsen.
- 18/79 "MATHEMATICS AND THE REAL WORLD", Proceedings of an International Workshop, Roskilde University Centre, Denmark, 1978.
Preprint.
Af: Bernhelm Booss og Mogens Niss (eds.)
- 19/79 "GEOMETRI, SKOLE OG VIRKELIGHED".
Projektrapport af: Tom J. Andersen, Tommy R. Andersen og Per H.H. Larsen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 20/79 "STATISTISKE MODELLER TIL BESTEMMELSE AF SIKRE DOSER FOR CARCINOGENE STOFFER".
Projektrapport af: Michael Olsen og Jørn Jensen.
Vejleder: Jørgen Larsen
- 21/79 "KONTROL I GYMNASIET-FORMAL OG KONSEKVENSER".
Projektrapport af: Crilles Bacher, Per S.Jensen, Preben Jensen og Torben Nysteen.
- 22/79 "SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (1)".
1-port lineært response og støj i fysikken.
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 23/79 "ON THE HISTORY OF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role of reality".
Af: Helge Kragh.
-
- 24/80 "MATEMATIKOPFATTELSE hos 2.G'ERE".
a+b
1. En analyse. 2. Interviewmateriale.
Projektrapport af: Jan Christensen og Knud Lindhardt Rasmussen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 25/80 "EKSAMENSOPGAVER", Dybdemodulet/fysik 1974-79.
- 26/80 "OM MATEMATISKE MODELLER".
En projektrapport og to artikler.
Af: Jens Højgaard Jensen m.fl.
- 27/80 "METHODOLOGY AND PHILOSOPHY OF SCIENCE IN PAUL DIRAC'S PHYSICS".
Af: Helge Kragh.
- 28/80 "DILETTANTISK RELAXATION" - et forslag til en ny model bygget på væskernes viscoelastiske egenskaber".
Projektrapport af: Gert Kreinøe.
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 29/80 "ODIN - undervisningsmateriale til et kursus i differentiaalligningsmodeller".
Projektrapport af: Tommy R. Andersen, Per H.H. Larsen og Peter H. Lassen.
Vejleder: Mogens Brun Heefelt.
- 30/80 "FUSIONSENERGIEN - - - ATOMSAMFUNDETS ENDESTATION".
Af: Oluf Danielsen.
Nr. 30 er udgået.
- 31/80 "VIDENSKABSTEORETISKE PROBLEMER VED UNDERVISNINGSSYSTEMER BASERET PÅ MØNGDELÆRE".
Projektrapport af: Troels Lange og Jørgen Karrebæk.
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
Nr. 31 er p.t. udgået.
- 32/80 "POLYMERE STOFFERS VISCOELASTISKE EGENSKABER - BELYST VED HJÆLP AF MEKANISKE IMPEDANSMÅLINGER OG MOSSBAUEREFFEKTMÅLINGER".
Projektrapport af: Crilles Bacher og Preben Jensen.
Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 33/80 "KONSTITUERING AF FAG INDEN FOR TEKNISK - NATURVIDENSKABELIGE UDDANNELSER. I-II".
Af: Arne Jakobsen.
- 34/80 "ENVIRONMENTAL IMPACT OF WIND ENERGY UTILIZATION".
ENERGY SERIES NO. 1.
Af: Bent Sørensen
Nr. 34 er udgået.

- 35/80 "HISTORISKE STUDIER I DEN NYERE ATOMFYSIKS UDVIKLING".
Af: Helge Kragh.
- 36/80 "HVAD ER MENINGEN MED MATEMATIKUNDERVISNINGEN?".
Fire artikler.
Af: Mogens Niss.
- 37/80 "RENEWABLE ENERGY AND ENERGY STORAGE".
ENERGY SERIES NO. 2.
Af: Bent Sørensen.
-
- 38/81 "TIL EN HISTORIETORI OM NATURERKENDELSE, TEKNOLOGI OG SAMFUND".
Projekt rapport af: Erik Gade, Hans Heddal, Henrik Lau og Finn Physant.
Vejledere: Stig Andur Pedersen, Helge Kragh og Ib Thiersen.
Nr. 38 er p.t. udgivet.
- 39/81 "TIL KRITIKKEN AF VEKSTØKONOMIEN".
Af: Jens Højgaard Jensen.
- 40/81 "TELEKOMMUNIKATION I DANMARK - oplæg til en teknologivurdering".
Projekt rapport af: Arne Jørgensen, Bruno Petersen og Jan Vedde.
Vejleder: Per Nørgaard.
- 41/81 "PLANNING AND POLICY CONSIDERATIONS RELATED TO THE INTRODUCTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO ENERGY SUPPLY SYSTEMS".
ENERGY SERIES NO. 3.
Af: Bent Sørensen.
- 42/81 "VIDENSKAB TEORI SAMFUND - En introduktion til materialistiske videnskabsopfattelser".
Af: Helge Kragh og Stig Andur Pedersen.
- 43/81 1. "COMPARATIVE RISK ASSESSMENT OF TOTAL ENERGY SYSTEMS".
2. "ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF DECENTRALIZATION".
ENERGY SERIES NO. 4.
Af: Bent Sørensen.
- 44/81 "HISTORISKE UNDERSØGELSER AF DE EKSPERIMENTELLE FORUDSÆTNINGER FOR RUTHERFORDS ATOMMODEL".
Projekt rapport af: Niels Thor Nielsen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
-
- 45/82 Er aldrig udkommet.
- 46/82 "EKSEMPLARISK UNDERVISNING OG FYSISK ERKENDELSE-1+1 ILLUSTRERET VED TO EKSEMPLER".
Projekt rapport af: Torben O. Olsen, Lasse Rasmussen og Niels Dreyer Sørensen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.
- 47/82 "BARSEBÄCK OG DET VÆRST OFFICIELT-TÆNKELIGE UHELD".
ENERGY SERIES NO. 5.
Af: Bent Sørensen.
- 48/82 "EN UNDERSØGELSE AF MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ ADGANGSKURSUS TIL KØBENHAVNS TEKNIKUM".
Projekt rapport af: Lis Ellertzen, Jørnen Karrebæk, Troels Lange, Preben Nørregaard, Lissi Pedersen, Laust Rishøj, Lill Røn og Isaac Showiki.
Vejleder: Mogens Niss.
- 49/82 "ANALYSE AF MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER".
Projekt rapport af: Preben Nørregaard.
Vejledere: Jørgen Larsen og Rasmus Ole Rasmussen.
- 50/82 "HERSLEV - MULIGHEDER FOR VEDVARENDE ENERGI I EN LANDSBY".
ENERGY SERIES NO. 6.
Rapport af: Bent Christensen, Bent Hove Jensen, Dennis B. Møller, Bjarne Laursen, Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.
Vejleder: Bent Sørensen.
- 51/82 "HVAD KAN DER GØRES FOR AT AFHJÆLPE PIGERS BLOKERING OVERFOR MATEMATIK?".
Projekt rapport af: Lis Ellertzen, Lissi Pedersen, Lill Røn og Susanne Stender.
- 52/82 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS".
Af: Bernhelm Booss og Krzysztof Wojciechowski.
- 53/82 "THE CONSTITUTION OF SUBJECTS IN ENGINEERING EDUCATION".
Af: Arne Jacobsen og Stig Andur Pedersen.
- 54/82 "FUTURES RESEARCH" - A Philosophical Analysis of Its Subject-Matter and Methods.
Af: Stig Andur Pedersen og Johannes Witt-Hansen.
- 55/82 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.
En biografi.
Af: Else Højrup.

Vedr. tekst nr. 55/82 se også tekst nr. 62/83.
- 56/82 "EN - TO - MANGE" -
En undersøgelse af matematisk økologi.
Projekt rapport af: Troels Lange.
Vejleder: Anders Madsen.
-
- 57/83 "ASPECT EKSPERIMENTET"-
Skjulte variable i kvantemekanikken?
Projekt rapport af: Tom Juul Andersen.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
Nr. 57 er udgivet.
- 58/83 "MATEMATISKE VANDRINGER" - Modelbetragtninger over spredning af dyr mellem småbiotoper i agerlandet.
Projekt rapport af: Per Hammershøj Jensen og Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 59/83 "THE METHODOLOGY OF ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES NO. 7.
Af: Bent Sørensen.
- 60/83 "MATEMATISK MODEKSPERTISE"- et eksempel.
Projekt rapport af: Erik O. Gade, Jørgen Karrebæk og Preben Nørregaard.
Vejleder: Anders Madsen.
- 61/83 "FYSIKS IDEOLOGISKE FUNKTION, SOM ET EKSEMPEL PÅ EN NATURVIDENSKAB - HISTORISK SET".
Projekt rapport af: Annette Post Nielsen.
Vejledere: Jens Højrup, Jens Højgaard Jensen og Jørgen Vogelius.
- 62/83 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.
En biografi 2. rev. udgave.
Af: Else Højrup.
- 63/83 "CREATING ENERGY FUTURES: A SHORT GUIDE TO ENERGY PLANNING".
ENERGY SERIES NO. 8.
Af: David Crossley og Bent Sørensen.
- 64/83 "VON MATEMATIK UND KRIEG".
Af: Bernhelm Booss og Jens Højrup.
- 65/83 "ANVENDT MATEMATIK - TEORI ELLER PRAKSIS".
Projekt rapport af: Per Hedegård Andersen, Kirsten Habekost, Carsten Holst-Jensen, Annelise von Moos, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
Vejledere: Bernhelm Booss og Klaus Grünbaum.
- 66/83 "MATEMATISKE MODELLER FOR PERIODISK SELEKTION I ESCHERICHIA COLI".
Projekt rapport af: Hanne Lisbet Andersen, Ole Richard Jensen og Klavs Frisdahl.
Vejledere: Jørgen Larsen og Anders Hede Madsen.
- 67/83 "ELEPSOIDE METODEN - EN NY METODE TIL LINEÆR PROGRAMMERING?".
Projekt rapport af: Lone Billmann og Lars Boye.
Vejleder: Mogens Brun Høefelt.
- 68/83 "STOKASTISKE MODELLER I POPULATIONSGENETIK" - til kritikken af teoriladede modeller.
Projekt rapport af: Lise Odgård Gade, Susanne Hansen, Michael Hviid og Frank Mølgård Olsen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

- 69/83 "ELEVFORUDSÆTNINGER I FYSIK"
- en test i l.g med kommentarer.
Af: Albert C. Paulsen.
- 70/83 "INDLÆRINGS - OG FORMIDLINGSPROBLEMER I MATEMATIK PÅ VOKSENUNDERVISNINGSNIVEAU".
Projektrapport af: Hanne Lisbet Andersen, Torben J. Andreasen, Svend Åge Houmann, Helle Glerup Jensen, Keld Fl. Nielsen, Lene Vagn Rasmussen.
Vejleder: Klaus Grünbaum og Anders Hede Madsen.
- 71/83 "PIGER OG FYSIK"
- et problem og en udfordring for skolen?
Af: Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen, Jette Reich og Mette Vedelsby.
- 72/83 "VERDEN IFØLGE PEIRCE" - to metafysiske essays, om og af C.S Peirce.
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 73/83 "EN ENERGIANALYSE AF LANDBRUG"
- økologisk contra traditionelt.
ENERGY SERIES NO. 9
Specialeopgave i fysik af: Bent Hove Jensen.
Vejleder: Bent Sørensen.
-
- 74/84 "MINIATURISERING AF MIKROELEKTRONIK" - om videnskabeliggjort teknologi og nytten af at lære fysik.
Projektrapport af: Bodil Harder og Linda Szoktak Jensen.
Vejledere: Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.
- 75/84 "MATEMATIKUNDERVISNINGEN I FREMTIDENS GYMNASIUM"
- Case: Linear programmering.
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank Mølgaard Olsen.
Vejledere: Mogens Brun Hæfeldt og Jens Bjørneboe.
- 76/84 "KERNEKRAFT I DANMARK?" - Et høringsvar indkaldt af miljøministeriet, med kritik af miljøstyrelsens rapporter af 15. marts 1984.
ENERGY SERIES No. 10
Af: Niels Boye Olsen og Bent Sørensen.
- 77/84 "POLITISKE INDEKS - FUP ELLER FAKTA?"
Opinionsundersøgelser belyst ved statistiske modeller.
Projektrapport af: Svend Åge Houmann, Keld Nielsen og Susanne Stender.
Vejledere: Jørgen Larsen og Jens Bjørneboe.
- 78/84 "JÆVNSTRØMSLEDNINGSEVNE OG GITTERSTRUKTUR I AMORFT GERMANIUM".
Specialrapport af: Hans Hedal, Frank C. Ludvigsen og Finn C. Physant.
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 79/84 "MATEMATIK OG ALMENDANNELSE".
Projektrapport af: Henrik Ooster, Mikael Wennerberg Johansen, Povl Kattler, Birgitte Lydholm og Morten Overgaard Nielsen.
Vejleder: Bernhelm Booss.
- 80/84 "KURSUSMATERIALE TIL MATEMATIK B".
Af: Mogens Brun Hæfeldt.
- 81/84 "FREKVENSafhængig LEDNINGSEVNE I AMORFT GERMANIUM".
Specialrapport af: Jørgen Wind Petersen og Jan Christensen.
Vejleder: Niels Boye Olsen.
- 82/84 "MATEMATIK - OG FYSIKUNDERVISNINGEN I DET AUTOMATISEREDE SAMFUND".
Rapport fra et seminar afholdt i Hvidovre 25-27 april 1983.
Red.: Jens Højgaard Jensen, Bent C. Jørgensen og Mogens Niss.
- 83/84 "ON THE QUANTIFICATION OF SECURITY":
PEACE RESEARCH SERIES NO. 1
Af: Bent Sørensen
nr. 83 er p.t. udgået
- 84/84 "NOGLE ARTIKLER OM MATEMATIK, FYSIK OG ALMENDANNELSE".
Af: Jens Højgaard Jensen, Mogens Niss m. fl.
- 85/84 "CENTRIFUGALREGULATORER OG MATEMATIK".
Specialrapport af: Per Hædegård Andersen, Carsten Holst-Jensen, Elæe Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 86/84 "SECURITY IMPLICATIONS OF ALTERNATIVE DEFENSE OPTIONS FOR WESTERN EUROPE".
PEACE RESEARCH SERIES NO. 2
Af: Bent Sørensen.
- 87/84 "A SIMPLE MODEL OF AC HOPPING CONDUCTIVITY IN DISORDERED SOLIDS".
Af: Jeppe C. Dyre.
- 88/84 "RISE, FALL AND RESURRECTION OF INFINITESIMALS".
Af: Detlef Laugwitz.
- 89/84 "FJERNVARMEOPTIMERING".
Af: Bjarne Lillethorup og Jacob Mørch Pedersen.
-
- 90/84 "ENERGI I L.G - EN TEORI FOR TILRETTELÆGGELSE".
Af: Albert Chr. Paulsen.
-
- 91/85 "KVANTETEORI FOR GYMNASIET".
1. Lærervejledning
Projektrapport af: Biger Lundgren, Henning Sten Hansen og John Johansson.
Vejleder: Torsten Meyer.
- 92/85 "KVANTETEORI FOR GYMNASIET".
2. Materiale
Projektrapport af: Biger Lundgren, Henning Sten Hansen og John Johansson.
Vejleder: Torsten Meyer.
- 93/85 "THE SEMIOTICS OF QUANTUM - NON - LOCALITY".
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 94/85 "TREENIGHEDEN BOURBAKI - generalen, matematikeren og ånden".
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank M. Olsen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 95/85 "AN ALTERNATIV DEFENSE PLAN FOR WESTERN EUROPE".
PEACE RESEARCH SERIES NO. 3
Af: Bent Sørensen
- 96/85 "ASPEKTER VED KRAFTVARMEFORSYNING".
Af: Bjarne Lillethorup.
Vejleder: Bent Sørensen.
- 97/85 "ON THE PHYSICS OF A.C. HOPPING CONDUCTIVITY".
Af: Jeppe C. Dyre.
- 98/85 "VALGMULIGHEDER I INFORMATIONSALEDEREN".
Af: Bent Sørensen.
- 99/85 "Der er langt fra Q til R".
Projektrapport af: Niels Jørgensen og Mikael Klinton.
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 100/85 "TALSYSTEMETS OPBYGNING".
Af: Mogens Niss.
- 101/85 "EXTENDED MOMENTUM THEORY FOR WINDMILLS IN PERTURBATIVE FORM".
Af: Ganesh Sengupta.
- 102/85 OPSTILLING OG ANALYSE AF MATEMATISKE MODELLER, BELYST VED MODELLER OVER KØRS FODEROPSTÆLSELSE OG - OMSÆTNING".
Projektrapport af: Lis Ellertzen, Kirsten Habekost, Lill Røn og Susanne Stender.
Vejleder: Klaus Grünbaum.

- 103/85 "ØDSLE KOLDKRIGERE OG VIDENSKABENS LYSE IDEER".
Projektrapport af: Niels Ole Dam og Kurt Jensen.
Vejleder: Bent Sørensen.
- 104/85 "ANALOGREGNEMASKINEN OG LORENZLIGNINGER".
Af: Jens Jøger.
- 105/85 "THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE SPECIFIC HEAT OF THE GLASS TRANSITION".
Af: Tage Christensen.
- "A SIMPLE MODEL OF AC HOPPING CONDUCTIVITY".
Af: Jeppe C. Dyre.
Contributions to the Third International Conference on the Structure of Non - Crystalline Materials held in Grenoble July 1985.
- 106/85 "QUANTUM THEORY OF EXTENDED PARTICLES".
Af: Bent Sørensen.
- 107/85 "EN MYG GØR INGEN EPIDEMI".
- flodblindhed som eksempel på matematisk modellering af et epidemiologisk problem.
Projektrapport af: Per Hedegård Andersen, Lars Boye, Carsten Holst Jensen, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
Vejleder: Jesper Larsen.
- 108/85 "APPLICATIONS AND MODELLING IN THE MATHEMATICS CURRICULUM" - state and trends -
Af: Mogens Niss.
- 109/85 "COX I STUDIETIDEN" - Cox's regressionsmodel anvendt på studenteroplysninger fra RUC.
Projektrapport af: Mikael Wennerberg Johansen, Poul Kattler og Torben J. Andreasen.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 110/85 "PLANNING FOR SECURITY".
Af: Bent Sørensen
- 111/85 "JORDEN RUNDT PÅ FLADE KORT".
Projektrapport af: Birgit Andresen, Beatriz Quinones og Jimmy Staal.
Vejleder: Mogens Niss.
- 112/85 "VIDENSKABELIGGØRELSE AF DANSK TEKNOLOGISK INNOVATION FREM TIL 1950 - BELYST VED EKSEMPLER".
Projektrapport af: Erik Odgaard Gade, Hans Hedal, Frank C. Ludvigsen, Annette Post Nielsen og Finn Physant.
Vejleder: Claus Bryld og Bent C. Jørgensen.
- 113/85 "DESUSPENSION OF SPLITTING ELLIPTIC SYMBOLS II".
Af: Bernhelm Booss og Krzysztof Wojciechowski.
- 114/85 "ANVENDELSE AF GRAFISKE METODER TIL ANALYSE AF KONFIGURATIONSTABELLER".
Projektrapport af: Lone Billmann, Ole R. Jensen og Arne-Lise von Moos.
Vejleder: Jørgen Larsen.
- 115/85 "MATEMATIKKENS UDVIKLING OP TIL RENESSANCEN".
Af: Mogens Niss.
- 116/85 "A PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR THE MEYER-NELDEL RULE".
Af: Jeppe C. Dyre.
- 117/85 "KRAFT & FJERNVARMOPTIMERING".
Af: Jacob Mørch Pedersen.
Vejleder: Bent Sørensen
- 118/85 "TILFÆLDIGHEDEN OG NØDVENDIGHEDEN IFØLGE PEIRCE OG FYSIKKEN".
Af: Peder Voetmann Christiansen
- 120/86 "ET ANTAL STATISTISKE STANDARDMODELLER".
Af: Jørgen Larsen
- 121/86 "SIMULATION I KONTINUERT TID".
Af: Peder Voetmann Christiansen.
- 122/86 "ON THE MECHANISM OF GLASS IONIC CONDUCTIVITY".
Af: Jeppe C. Dyre.
- 123/86 "GYMNASIEFYSIKKEN OG DEN STORE VERDEN".
Fysiklærerforeningen, DMFUA, RUC.
- 124/86 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK".
Samtlige opgaver stillet i tiden 1974-jan. 1986.
- 125/86 "UVBY, 6 - systemet - en effektiv fotometrisk spektral-klassifikation af B-, A- og F-stjerner".
Projektrapport af: Birger Landgren.
- 126/86 "OM UDVIKLINGEN AF DEN SPECIELLE RELATIVITETSTEORI".
Projektrapport af: Lise Odgaard & Linda Szkotak Jensen
Vejledere: Karin Beyer & Stig Andur Pedersen.
- 127/86 "GALOIS' BIDRAG TIL UDVIKLINGEN AF DEN ABSTRAKTE ALGEBRA".
Projektrapport af: Pernille Sand, Heine Larsen & Lars Frandsen.
Vejleder: Mogens Niss.
- 128/86 "SMÅRYB" - en ikke-standard analyse.
Projektrapport af: Niels Jørgensen & Mikael Klintorp.
Vejleder: Jeppe Dyre.
- 129/86 "PHYSICS IN SOCIETY"
Lecture Notes 1983 (1986)
Af: Bent Sørensen
- 130/86 "Studies in Wind Power"
Af: Bent Sørensen.
- 131/86 "FYSIK OG SAMFUND" - Et integreret fysik/historie-projekt om naturanskuelsens historiske udvikling og dens samfundsmæssige betingethed.
Projektrapport af: Jakob Heckscher, Søren Brønd, Andy Wierød.
Vejledere: Jens Høyrup, Jørgen Vogelius, Jens Højgaard Jensen.
- 132/86 "FYSIK OG DANNELSE"
Projektrapport af: Søren Brønd, Andy Wierød.
Vejledere: Karin Beyer, Jørgen Vogelius.
- 133/86 "CHERNOBYL ACCIDENT: ASSESSING THE DATA. ENERGY SERIES NO. 15."
Af: Bent Sørensen.
-
- 134/87 "THE D.C. AND THE A.C. ELECTRICAL TRANSPORT IN AsSeTe SYSTEM"
Authors: M.B.El-Den, N.B.Olsen, Ib Høst Pedersen, Petr Visčor
- 135/87 "INTUITIONISTISK MATEMATIKS METODER OG ERKENDELSESTEORETISKE FORUDSÆTNINGER"
MATEMATIKSPECIALE: Claus Larsen
Vejledere: Anton Jensen og Stig Andur Pedersen
- 136/87 "Mystisk og naturlig filosofi: En skitse af kristendommens første og andet møde med græsk filosofi"
Projektrapport af Frank Colding Ludvigsen
Vejledere: Historie: Ib Thiersen
Fysik: Jens Højgaard Jensen
- 137/87 "HOPMODELLER FOR ELEKTRISK LEDNING I UORDNEDE FASTE STOFFER" - Resume af licentiatafhandling
Af: Jeppe Dyre
Vejledere: Niels Boye Olsen og Peder Voetmann Christiansen.
- 119/86 "DET ER GANSKE VIST - - EUKLIDS FEMTE POSTULAT KUNNE NOK SKABE RØRE I ANDEDAMMEN".
Af: Iben Maj Christiansen
Vejleder: Mogens Niss.

138/87 "JOSEPHSON EFFECT AND CIRCLE MAP."
Paper presented at The International
Workshop on Teaching Nonlinear Phenomena
at Universities and Schools, "Chaos in
Education". Balaton, Hungary, 26 April-2 May 1987.

By: Peder Voetmann Christiansen

139/87 "Machbarkeit nichtbeherrschbarer Technik
durch Fortschritte in der Erkennbarkeit
der Natur"

Af: Bernhelm Booss-Bavnbek
Martin Bohle-Carbonell

140/87 "ON THE TOPOLOGY OF SPACES OF HOLOMORPHIC MAPS"

By: Jens Gravesen

141/87 "RADIOMETERS UDVIKLING AF BLODGASAPPARATUR -
ET TEKNOLOGIHISTORISK PROJEKT"

Projektrapport af Finn C. Physant
Vejleder: Ib Thiersen

142/87 "The Calderón Projektor for Operators With
Splitting Elliptic Symbols"

by: Bernhelm Booss-Bavnbek og
Krzysztof P. Wojciechowski

143/87 "Kursusmateriale til Matematik på NAT-BAS"

af: Mogens Brun Heefelt

144/87 "Context and Non-Locality - A Peircean Approach

Paper presented at the Symposium on the
Foundations of Modern Physics The Copenhagen
Interpretation 60 Years after the Como Lecture.
Joensuu, Finland, 6 - 8 august 1987.

By: Peder Voetmann Christiansen

145/87 "AIMS AND SCOPE OF APPLICATIONS AND
MODELLING IN MATHEMATICS CURRICULA"

Manuscript of a plenary lecture delivered at
ICMTA 3, Kassel, FRG 8.-11.9.1987

By: Mogens Niss

146/87 "BESTEMMELSE AF BULKRESISTIVITETEN I SILICIUM"
- en ny frekvensbaseret målemetode.

Fysikspeciale af Jan Vedde

Vejledere: Niels Boye Olsen & Petr Višćor

147/87 "Rapport om BIS på NAT-BAS"

redigeret af: Mogens Brun Heefelt

148/87 "Naturvidenskabsundervisning med
Samfundsperspektiv"

af: Peter Colding-Jørgensen DLH
Albert Chr. Paulsen

149/87 "In-Situ Measurements of the density of amorphous
germanium prepared in ultra high vacuum"

by: Petr Višćor

150/87 "Structure and the Existence of the first sharp
diffraction peak in amorphous germanium
prepared in UHV and measured in-situ"

by: Petr Višćor

151/87 "DYNAMISK PROGRAMMERING"

Matematikprojekt af:
Birgit Andresen, Keld Nielsen og Jimmy Staal

Vejleder: Mogens Niss

152/87 "PSEUDO-DIFFERENTIAL PROJECTIONS AND THE TOPOLOGY
OF CERTAIN SPACES OF ELLIPTIC BOUNDARY VALUE
PROBLEMS"

by: Bernhelm Booss-Bavnbek
Krzysztof P. Wojciechowski

153/88 "HALVLEDERTEKNOLOGIENS UDVIKLING MELLEM MILITÆRE
OG CIVILE KREFTER"

Et eksempel på humanistisk teknologihistorie
Historiespeciale

Af: Hans Hedal

Vejleder: Ib Thiersen

154/88 "MASTER EQUATION APPROACH TO VISCOUS LIQUIDS AND
THE GLASS TRANSITION"

By: Jeppe Dyre

155/88 "A NOTE ON THE ACTION OF THE POISSON SOLUTION
OPERATOR TO THE DIRICHLET PROBLEM FOR A FORMALLY
SELFADJOINT DIFFERENTIAL OPERATOR"

by: Michael Pedersen

156/88 "THE RANDOM FREE ENERGY BARRIER MODEL FOR AC
CONDUCTION IN DISORDERED SOLIDS"

by: Jeppe C. Dyre

157/88 "STABILIZATION OF PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS
BY FINITE DIMENSIONAL BOUNDARY FEEDBACK CONTROL:
A pseudo-differential approach."

by: Michael Pedersen

158/88 "UNIFIED FORMALISM FOR EXCESS CURRENT NOISE IN
RANDOM WALK MODELS"

by: Jeppe Dyre

159/88 "STUDIES IN SOLAR ENERGY"

by: Bent Sørensen

160/88 "LOOP GROUPS AND INSTANTONS IN DIMENSION TWO"

by: Jens Gravesen

161/88 "PSEUDO-DIFFERENTIAL PERTURBATIONS AND STABILIZATION
OF DISTRIBUTED PARAMETER SYSTEMS:
Dirichlet feedback control problems"

by: Michael Pedersen

162/88 "PIGER & FYSIK - OG MEGET MERE"

Af: Karin Beyer, Sussanne Blegaa, Birthe Olsen,
Jette Reich, Mette Vedelsby

163/88 "EN MATEMATISK MODEL TIL BESTEMMELSE AF
PERMEABILITETEN FOR BLOD-NETHINDE-BARRIEREN"

Af: Finn Langberg, Michael Jarden, Lars Frellesen

Vejleder: Jesper Larsen

164/88 "Vurdering af matematisk teknologi
Technology Assessment
Teknikfolgenabschätzung"

Af: Bernhelm Booss-Bavnbek, Glen Pate med
Martin Bohle-Carbonell og Jens Højgaard Jensen

165/88 "COMPLEX STRUCTURES IN THE NASH-MOSER CATEGORY"

by: Jens Gravesen

- 166/88 "Grundbegreber i Sandsynlighedsregningen"
Af: Jørgen Larsen
- 167a/88 "BASISSTATISTIK 1. Diskrete modeller"
Af: Jørgen Larsen
- 167b/88 "BASISSTATISTIK 2. Kontinuerte modeller"
Af: Jørgen Larsen
- 168/88 "OVERFLADEN AF PLANETEN MARS"
Laboratorie-simulering og MARS-analoger undersøgt ved Mössbauerspektroskopi.
Fysikspeciale af:
Birger Lundgren
Vejleder: Jens Martin Knudsen
Fys.Lab./HCØ
- 169/88 "CHARLES S. PEIRCE: MURSTEN OG MØRTEL TIL EN METAFYSIK."
Fem artikler fra tidskriftet "The Monist" 1891-93.
Introduktion og oversættelse:
Peder Voetmann Christiansen
- 170/88 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK"
Samtlige opgaver stillet i tiden 1974 - juni 1988
- 171/88 "The Dirac Equation with Light-Cone Data"
af: Johnny Tom Ottesen
- 172/88 "FYSIK OG VIRKELIGHED"
Kvantemekanikkens grundlagsproblem i gymnasiet.
Fysikprojekt af:
Erik Lund og Kurt Jensen
Vejledere: Albert Chr. Paulsen og Peder Voetmann Christiansen
-
- 173/89 "NUMERISKE ALGORITMER"
af: Mogens Brun Heefelt
- 174/89 "GRAFISK FREMSTILLING AF FRAKTALER OG KAOS"
af: Peder Voetmann Christiansen
- 175/89 "AN ELEMENTARY ANALYSIS OF THE TIME DEPENDENT SPECTRUM OF THE NON-STATONARY SOLUTION TO THE OPERATOR RICCATI EQUATION"
af: Michael Pedersen
- 176/89 "A MAXIMUM ENTROPY ANSATZ FOR NONLINEAR RESPONSE THEORY"
af: Jeppe Dyre
- 177/89 "HVAD SKAL ADAM STÅ MODEL TIL"
af: Morten Andersen, Ulla Engström, Thomas Gravesen, Nanna Lund, Pia Madsen, Dina Rawat, Peter Torstensen
Vejleder: Mogens Brun Heefelt
- 178/89 "BIOSYNTESEN AF PENICILLIN - en matematisk model"
af: Ulla Eghave Rasmussen, Hans Oxvang Mortensen, Michael Jarden
vejleder i matematik: Jesper Larsen
biologi: Erling Lauridsen
- 179a/89 "LÆRERVEJLEDNING M.M. til et eksperimentelt forløb om kaos"
af: Andy Wierød, Søren Brønd, og Jimmy Staal
Vejledere: Peder Voetmann Christiansen
Karin Beyer
- 179b/89 "ELEVHEFTE: Noter til et eksperimentelt kursus om kaos"
af: Andy Wierød, Søren Brønd og Jimmy Staal
Vejledere: Peder Voetmann Christiansen
Karin Beyer
- 180/89 "KAOS I FYSISKE SYSTEMER eksemplificeret ved torsions- og dobbeltpendul".
af: Andy Wierød, Søren Brønd og Jimmy Staal
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 181/89 "A ZERO-PARAMETER CONSTITUTIVE RELATION FOR PURE SHEAR VISCOELASTICITY"
by: Jeppe Dyre
- 183/89 "MATHEMATICAL PROBLEM SOLVING, MODELLING. APPLICATIONS AND LINKS TO OTHER SUBJECTS - State, trends and issues in mathematics instruction"
by: WERNER BLUM, Kassel (FRG) og MOGENS NISS, Roskilde (Denmark)
- 184/89 "En metode til bestemmelse af den frekvensafhængige varmfylde af en underafkølet væske ved glasovergangen"
af: Tage Emil Christensen
-
- 185/90 "EN NÆSTEN PERIODISK HISTORIE"
Et matematisk projekt
af: Steen Grode og Thomas Jessen
Vejleder: Jacob Jacobsen
- 186/90 "RITUAL OG RATIONALITET i videnskabers udvikling"
redigeret af Arne Jakobsen og Stig Andur Pedersen
- 187/90 "RSA - et kryptografisk system"
af: Annemette Sofie Olufsen, Lars Frellesen og Ole Møller Nielsen
Vejledere: Michael Pedersen og Finn Munk
- 188/90 "FERMICONDENSATION - AN ALMOST IDEAL GLASS TRANSITION"
by: Jeppe Dyre
- 189/90 "DATAMATER I MATEMATIKUNDERVISNINGEN PÅ GYMNASIET OG HØJERE LÆREANSTALTER"
af: Finn Langberg

- 190/90 "FIVE REQUIREMENTS FOR AN APPROXIMATE NONLINEAR RESPONSE THEORY"
by: Jeppe Dyre
- 191/90 "MOORE COHOMOLOGY, PRINCIPAL BUNDLES AND ACTIONS OF GROUPS ON C^* -ALGEBRAS"
by: Iain Raeburn and Dana P. Williams
- 192/90 "Age-dependent host mortality in the dynamics of endemic infectious diseases and SIR-models of the epidemiology and natural selection of co-circulating influenza virus with partial cross-immunity"
by: Viggo Andreassen
- 193/90 "Causal and Diagnostic Reasoning"
by: Stig Andur Pedersen
- 194a/90 "DETERMINISTISK KAOS"
Projektrapport af : Frank Olsen
- 194b/90 "DETERMINISTISK KAOS"
Kørselsrapport
Projektrapport af: Frank Olsen
- 195/90 "STADIER PÅ PARADIGMETS VEJ"
Et projekt om den videnskabelige udvikling der førte til dannelse af kvantemekanikken.
Projektrapport for 1. modul på fysikuddannelsen, skrevet af:
Anja Boisen, Thomas Hougård, Anders Gorm Larsen, Nicolai Ryge.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 196/90 "ER KAOS NØDVENDIGT?"
- en projektrapport om kaos' paradigmatiske status i fysikken.
af: Johannes K. Nielsen, Jimmy Staal og Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 197/90 "Kontrafaktiske konditioner i HOL"
af: Jesper Voetmann, Hans Oxvang Mortensen og Aleksander Høst-Madsen
Vejleder: Stig Andur Pedersen
- 198/90 "Metal-Isolator-Metal systemer"
Speciale
af: Frank Olsen
- 199/90 "SPREDT FÆGTNING" Artikelsamling
af: Jens Højgaard Jensen
- 200/90 "LINEÆR ALGEBRA OG ANALYSE"
Noter til den naturvidenskabelige basisuddannelse.
af: Mogens Niss
- 201/90 "Undersøgelse af atomare korrelationer i amorfe stoffer ved røntgendiffraktion"
af: Karen Birkelund og Klaus Dahl Jensen
Vejledere: Petr Višćor, Ole Bakander
- 202/90 "TEGN OG KVANTER"
Foredrag og artikler, 1971-80.
af: Peder Voetmann Christiansen
- 203/90 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK" 1974-1990
af: aflæser tekst 170/88
-
- 204/91 "ERKENDELSE OG KVANTEMEKANIK"
et Breddemodul Fysik Projekt
af: Thomas Jessen
Vejleder: Petr Višćor
- 205/91 "PEIRCE'S LOGIC OF VAGUENESS"
by: Claudine Engel-Tiercelin
Department of Philosophy
Université de Paris-1
(Panthéon-Sorbonne)
- 206a+b/91 "GERMANIUMBEAMANALYSE SAMT A - GE TYNDFILMS ELEKTRISKE EGENSKABER"
Eksperimentelt Fysikspeciale
af: Jeanne Linda Mortensen og Annette Post Nielsen
Vejleder: Petr Višćor
- 207/91 "SOME REMARKS ON AC CONDUCTION IN DISORDERED SOLIDS"
by: Jeppe C. Dyre
- 208/91 "LANGEVIN MODELS FOR SHEAR STRESS FLUCTUATIONS IN FLOWS OF VISCO-ELASTIC LIQUIDS"
by: Jeppe C. Dyre
- 209/91 "LORENZ GUIDE" Kompendium til den danske fysiker Ludvig Lorenz, 1829-91.
af: Helge Kragh
- 210/91 "Global Dimension, Tower of Algebras, and Jones Index of Split Seperable Subalgebras with Unitality Condition."
by: Lars Kadison
- 211/91 "I SANDHEDENS TJENESTE"
- historien bag teorien for de komplekse tal.
af: Lise Arleth, Charlotte Gjennild, Jane Hansen, Linda Kyndlev, Anne Charlotte Nilsson, Kamma Tulinius.
Vejledere: Jesper Larsen og Bernhelm Booss-Bavnbek
- 212/91 "Cyclic Homology of Triangular Matrix Algebras"
by: Lars Kadison
- 213/91 "Disease-induced natural selection in a diploid host
by: Viggo Andreassen and Freddy E. Christiansen

- 214|91 "Hælleøj i æteren" - om elektromagnetisme. Oplæg til undervisningsmateriale i gymnasiet.
Af: Nils Kruse, Peter Gastrup, Kristian Hoppe, Jeppe Guldager
Vejledere: Petr Viscor, Hans Hedal
- 215|91 "Physics and Technology of Metal-Insulator-Metal thin film structures used as planar electron emitters
by: A. Delong, M. Drsticka, K. Hladil, V. Kolarik, F. Olsen, P. Pavelka and Petr Viscor.
- 216|91 "Kvantemekanik på PC'eren"
af: Thomas Jessen
-
- 217/92 "Two papers on APPLICATIONS AND MODELLING IN THE MATHEMATICS CURRICULUM"
by: Mogens Niss
- 218/92 "A Three-Square Theorem"
by: Lars Kadison
- 219/92 "RUPNOK - stationær strømning i elastiske rør"
af: Anja Boisen, Karen Birkelund, Mette Olufsen
Vejleder: Jesper Larsen
- 220/92 "Automatisk diagnosticering i digitale kredsløb"
af: Bjørn Christensen, Ole Møller Nielsen
Vejleder: Stig Andur Pedersen.
- 221/92 "A BUNDLE VALUED RADON TRANSFORM, WITH APPLICATIONS TO INVARIANT WAVE EQUATIONS"
by: Thomas P. Branson, Gestur Olafsson and Henrik Schlichtkrull
- 222/92 On the Representations of some Infinite Dimensional Groups and Algebras Related to Quantum Physics
by: Johnny T. Ottesen
- 223/92 THE FUNCTIONAL DETERMINANT
by: Thomas P. Branson
- 224/92 UNIVERSAL AC CONDUCTIVITY OF NON-METALLIC SOLIDS AT LOW TEMPERATURES
by: Jeppe C. Dyre
- 225/92 "HATMODELLEN" Impedansspektroskopi i ultrarent en-krySTALLINSK silicium
af: Anja Boisen, Anders Gorm Larsen, Jesper Varmer, Johannes K. Nielsen, Kit R. Hansen, Peter Bøggild og Thomas Hougaard
Vejleder: Petr Viscor
- 226/92 "METHODS AND MODELS FOR ESTIMATING THE GLOBAL CIRCULATION OF SELECTED EMISSIONS FROM ENERGY CONVERSION"
by: Bent Sørensen
- 227/92 "Computersimulering og fysik"
af: Per M. Hansen, Steffen Holm, Peter Maibom, Mads K. Dall Petersen, Pernille Postgaard, Thomas B. Schrøder, Ivar P. Zeck
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
- 228/92 "Teknologi og historie"
Fire artikler af:
Mogens Niss, Jens Høyrup, Ib Thiersen, Hans Hedal
- 229/92 "Masser af information uden betydning"
En diskussion af informationsteorien i Tor Nørretranders' "Mærk Verden" og en skitse til et alternativ baseret på andenordens kybernetik og semiotik.
af: Søren Brier
- 230/92 "Vinklens tredeling - et klassisk problem"
et matematisk projekt af
Karen Birkelund, Bjørn Christensen
Vejleder: Johnny Ottesen
- 231A/92 "Elektrondiffusion i silicium - en matematisk model"
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund, Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B. Hansen
- 231B/92 "Elektrondiffusion i silicium - en matematisk model" Kildetekster
af: Jesper Voetmann, Karen Birkelund, Mette Olufsen, Ole Møller Nielsen
Vejledere: Johnny Ottesen, H.B. Hansen
- 232/92 "Undersøgelse om den simultane opdagelse af energiens bevarelse og isærdeles om de af Mayer, Colding, Joule og Helmholtz udførte arbejder"
af: L. Arleth, G.I. Dybkjær, M.T. Østergård
Vejleder: Dorthe Posselt
- 233/92 "The effect of age-dependent host mortality on the dynamics of an endemic disease and Instability in an SIR-model with age-dependent susceptibility
by: Viggo Andreasen
- 234/92 "THE FUNCTIONAL DETERMINANT OF A FOUR-DIMENSIONAL BOUNDARY VALUE PROBLEM"
by: Thomas P. Branson and Peter B. Gilkey
- 235/92 OVERFLADESTRUKTUR OG POREUDVIKLING AF KOKS - Modul 3 fysik projekt -
af: Thomas Jessen
-

- 236a/93 INTRODUKTION TIL KVANTE
HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 236b/93 STRØMSSAMMENBRUD AF KVANTE
HALL EFFEKTEN
af: Anja Boisen, Peter Bøggild
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen
Erland Brun Hansen
- 237/93 The Wedderburn principal theorem and
Shukla cohomology
af: Lars Kadison
- 238/93 SEMIOTIK OG SYSTEMEGENSKABER (2)
Vektorbånd og tensorer
af: Peder Voetmann Christiansen
- 239/93 Valgsystemer - Modelbygning og analyse
Matematik 2. modul
af: Charlotte Gjerrild, Jane Hansen,
Maria Hermannsson, Allan Jørgensen,
Ragna Clauson-Kaas, Poul Lützen
Vejleder: Mogens Niss
- 240/93 Patologiske eksempler.
Om særlige matematiske fæns betydning for
den matematiske udvikling
af: Claus Dræby, Jørn Skov Hansen, Runa
Ulsøe Johansen, Peter Meibom, Johannes
Kristoffer Nielsen
Vejleder: Mogens Niss