TEKST NR 214 1991

Hallój i æteren

– om elektromagnetisme.

oplæg til undervisningsmateriale i gymnasiet.

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
Hallø j i æteren - om elektromagnetisme.
Oplæg til undervisningsmateriale i gymnasiet.
Af: Nils Kruse, Peter Gastrup, Kristian Hoppe, Jeppe Guldager
Vejledere: Petr Viscor, Hans Hedal

IMFUFA tekst nr. 214/91 *76 sider* *ISSN 0106-6242*

ABSTRACT:

Teksten er et 1. modul breddeprojekt på fysikuddannelsen. Rapporten behandler udviklingen af elektromagnetisme i 1800-tallet med focus på datidens æterteorier. Det er således, at Aristoteles i antikken mente, at kvintessensen, som var en slags æter, bar himmellegemerne; og siden hen har man ment, at lys, magnetisme og elektromagnetisme måtte udbrede sig gennem en substans, der normalt blev kaldt ætereren.

Hovedvægten er lagt på en gennemgang af Maxwells teorier og fire ligninger på integralform og projektet slutter omkring år 1900 da Einstein afviser æteren.

Det har været forfatternes intention at skrive projektet således, at det kan bruges i gymnasieundervisningen og dække dimensionen; "fysikken i historisk og filosofisk belysning" og kernestoffet elektricitet og magnetisme.

Halløj i æteren

- om elektromagnetisme.

oplæg til undervisningsmateriale i gymnasiet.

Af:

Nils Kruse

Peter Gastrup

Kristian Hoppe

Jeppe Guldager

Vejledere:

Petr Viščor

Hans Hedal

Breddeprojekt. Fysik. IMFUFA. Efteråret 1990.

Indholdsfortegnelse.

		side
	Indledning	4
1.	**Videnskabelig og filosofisk baggrund**	9
1.1	Træk af elektricitets- og magnetismelærens historie	9
	Magnetisme	9
	Elektricitet	10
1.2	**Æterspekulationer fra antikken til det 18. århundrede**	13
	Atomteorien	13
	Elementteorien	13
	Descartes	14
	Leibniz	16
1.3	**Træk af naturvidenskaben i det 17. og 18. århundrede**	16
	Newton	16
	Boscovich	18
	Kant	19
	Opsummering	20
2	**Fjernvirkningsteorier**	21
2.1	Den franske skole	21
	Stofopfattelse i den franske skole	21
	Kraftopfattelse i den franske skole	22
	Biot-Savarts lov	23
	Ampère	24
2.2	Den tyske skole	25
	Weber	26
	Opsummering	27

3	**Tidlige felt- og æterteorier**	28
3.1	Michael Faraday	28
	Faradays natursyn	28
	Faradays eksperimenter	29
	Kan Faradays kraftliniebegreb sidestilles med et æterbegreb?	32
3.2	William Thomsons æterbegreb	33
	Opsummering	35
4	**Maxwell og æteren**	37
4.1	Maxwells motivation	37
4.2	Maxwells ætermodel	39
	Præsentation af modellen	39
	Modellens analogier	40
	Elektromagnetisk induktion	42
	Kraften på en ladet partikel	43
4.3	Maxwells ligninger på integralform	44
	Gauss' lov for elektricitet	45
	Gauss' lov for magnetisme	46
	Faraday-Henrys lov	47
	Maxwell-Ampères lov	47
	Opsummering	48
5	**Æteren efter Maxwell**	51
5.1	Heinrich Hertz	51
	Hertz' videnskabelige baggrund	51
	Æterdiskussioner	52
	Hertz' eksperimenter	53
	Konsekvensen af forsøget	54
5.2	Hendrik Antoon Lorentz	55
	Michelson-Morleys forsøg	58
5.3	Albert Einstein	61
	Einsteins afvisning af æteren	61
	Einstein to postulater	62
	Opsummering	63
	Opsamling og konklusion	65
	Tidslinier for de omtalte personer	70
	Litteraturliste	72

Indledning.

I vores dagligdag er der mange fænomener, som vi ikke går og tænker på – i hvert fald ikke hele tiden. Det er f.eks ikke så svært at forstå, at lyden udbreder sig som bølger i luften, men hvad med lys? Hvis det er bølger (elektromagnetiske bølger), hvordan kan det så udbredes gennem det tomme rum (vakuum). Det er sikkert et spørgsmål, som de fleste har funderet over på et eller andet tidpunkt. Spørgsmålet er det samme for magnetfelter og elektriske felter; hvordan udbredes de? I det 19. århundrede var der to videnskabelige grupper, som havde hver sin opfattelse af, hvordan sådanne fænomener udbredtes. Den ene gruppe mente, at udbredelsen sker ved nærvirkning gennem en æter, mens den anden mente, at det sker ved fjernvirkning uden en æter. Disse spørgsmål er så interessante, at vi har valgt at beskæftige os lidt nærmere med dem. For at dette ikke skal blive for uoverskueligt, har vi valgt at begrænse os til æterteorierne inden for elektrodynamikken.

Målgruppe:

Med dette projekt henvender vi os til fysiklærere i gymnasiet med henblik på at give inspiration til emnevalg og indgangsvinkler til undervisningen. Grunden til dette er den nye undervisningsbekendtgørelse, hvor man har indført de såkaldte "dimensioner". Den ene af de i alt fem dimensioner lyder: "Fysikken i historisk og filosofisk belysning: Eleverne skal få kendskab til dele af fysikkens historie og få et indtryk af fysik som erkendelsesform." [6]. På grund af at disse dimensioner er så nye, har der hersket nogen tvivl og forvirring om, hvad der skal til for at imødekomme dem. Endvidere har vi gennem flere gymnasielærere fået oplyst, at udbudet af undervisningsmateriale inden for dette område ikke er særlig stort. Derfor er det i høj grad op til den enkelte lærer selv at fremstille undervisningsmateriale. Vi håber, at dette projekt kan virke inspirerende.

Formål:

Formålet med projektet er dels, som vi også nævnte i det foregående afsnit, at det skal tjene som inspirationskilde i forbindelse med den historiske dimension, dels vil vi gerne vise, at den fysik, vi møder i de gængse lærebøger[1] også har en "historie". Med dette mener vi, at fysikerens naturopfattelse har ændret sig, og selv om det som regel er de samme formler, vi

[1] Med dette mener vi bøger, der fremstiller fysikken som et færdigt produkt uden nogen historie.

bruger i dag som i 1850, så er fortolkningen af dem ofte en anden. Ved at vise eleverne fysikken i et historisk perspektiv, kan man – måske – lære dem, at videnskabelige idéer ændrer sig med tiden, og at naturvidenskab er et produkt af menneskets forestillingsevne i samspil med naturen. Vi viser ikke blot at videnskaben ændrer sig, men også hvordan den ændrer sig i sammenhæng med videnskabsmændenes grundlæggende natursyn. Den videnskabelige udvikling har stor indflydelse på vores dagligdag og på vores levevilkår, og det er derfor vigtig, at vi overvåger udviklingen. Det kan vi bedre blive i stand til ved at studere den videnskabelige historie, som derved giver os et grundlag for vores vurdering af videnskab.

Motivation:

Projektet bliver en tur tilbage i tiden, og det stof, vi vil præsentere, er ikke, hvad man normalt vil kalde lærebogsstof. I mange lærebøger fremstår fysikken som værende et færdigt produkt, uden at beskrive den historiske proces, der ligger til grund for denne fysik. Vælger man derimod, at beskæftige sig med det historiske aspekt, kan man gøre undervisningen mere spændende og tilføre den nogle kvaliteter, som ellers ikke ville komme frem. I fysik-undervisningen kan man skelne mellem tematiserede og systematiserede undervisningsforløb [5 s.1]. Brugen af de tra-ditionelle lærerbøger er et eksempel på den sidstnævnte undervis-ningsmetode. Her gennemgår man kernestoffet systematisk og undgår at bruge tid på perspektiveringer. I et tematisk undervisningsforløb beskæftiger man sig med flere ting inden for det pågæld-ende tema. Det undervisningsmateriale, som vores projekt kunne være idégrundlag for, vil være oplagt til brug i et tematisk undervisningsforløb. Vi har valgt ikke selv at skrive selve undervisningsmaterialet, men lade det være op til den enkelte lærer at gøre dette (evt. med udpluk fra dette projekt). Dette skyldes, at undervisningsmateriale bedst laves af gymnasielærere selv eller evt. af andre med en nær tilknytning til gymnasiet, da man undervejs skal have mulighed for at afprøve materialet på eleverne. Det er ikke muligt at sidde i sin egen lille verden og forudse, hvordan eleverne vil forstå et givet materiale.

Når man beskæftiger sig med videnskabshistorie, kan man vælge at gøre det på to forskellige måder:

1) En teoretisk, hvor man ser på, om der er generelle regler ud fra hvilke videnskaben udvikler sig.

2) En eksemplificerende, hvor man tager udgangspunkt i et konkret eksempel, og ud fra dette siger noget om videnskabens historie.

De to måder er selvfølgelig nært beslægtede, da det som regel vil være muligt, at sige noget om de generelle træk ud fra eksemplet, ligesom det er muligt at analysere eksemplet med udgangspunkt i den generelle teori. Vi har valgt at tage udgangspunkt i et konkret eksempel. Dette skyldes dels, at vi ikke ønsker at skrive et decideret videnskabsteoretisk projekt, dels at det vil være mere motiverende og sjovere for eleverne. Da vi yderligere har valgt et emne, som bryder med vore vante forestillinger inden for fysikken (at det tomme rum ikke er tomt) håber vi dette vil være yderligere motiverende.

Videnskabsopfattelse :

Blandt videnskabshistorikere støder man ofte på diskussionen om, hvordan videnskaben udvikler sig. Der hersker utroligt mange opfattelser om dette, men groft kan man skelne mellem to yderpunkter: Eksternalisme og internalisme. Tilhængere af den første an-ser videnskabens udvikling som værende hovedsagelig bestemt af ikke-videnskabelige (ydre) faktorer [14 s.8], mens tilhængere af den anden opfatter videnskaben som værende bestemt af videnskabelige (indre) faktorer. Et problem i denne forbindelse er da at kunne skelne mellem disse indre og ydre faktorer. Disse to opfattelser kan rendyrkes, men oftest vil man møde opfattelser, som ligger et eller andet sted mellem de to yderpunkter, og som ind-drager dem begge. Et eksempel: De store linier i udviklingen er bestemt af ydre faktorer, mens de enkelte forsøg er bestemt af indre faktorer.

Formålet med vores projekt er ikke at beskrive denne diskussion, men vi har nævnt den her, fordi man efter at have læst projektet måske kunne have fået den opfattelse, at vi mener udviklingen udelukkende er bestemt af de indre faktorer. Dette er ikke (nødvendigvis) vores opfattelse, men projektet er skrevet som det er, i et forsøg på følge en rød tråd og fortælle en bestemt delhistorie - æterens betydning for udviklingen af elektrodynamikken -vi vil i den forbindelse ikke komme ind på diskussionen om eksternalisme kontra internalisme.

Projektet og kernestof:

Det meste af den fysik, der er grundlaget for dette projekt er indeholdt i det såkaldte kernestof

for fysik i 3.g (højt niveau) i gymnasiet, og det kan således gennemgås i undervisningen i forbindelse med denne "æterhistorie". Emnerne elektriske felter og magnetfelter dækker kernestoffet elektricitet og magnetisme, mens elektromagnetisk induktion, Maxwells ligninger og relativitetsteori ikke er kernestof, men kan anvendes som valgfrit stof. Ligeledes vil det være muligt at gennemføre forskellige eksperimentelle øvelser, enten som almindelige øvelser eller i forbindelse med et større eksperimentelt projekt. For eksempel vil Hertz' forsøg være en oplagt mulighed i denne forbindelse.

Projektets problemformulering:

Begrebet om en æter går langt tilbage; men i det nittende århundrede fik den en renæssance i forbindelse med udviklingen af elektromagnetismen. Især Maxwell brugte æteren, da han i midten af det nittende århundrede opstillede sine fire ligninger. I slutningen af århundredet gik man væk fra tanken om æteren. Det var især Einstein, som førte an. Vi har, efter at have læst denne historie om æteren, stillet os selv spørgsmålet:

- Hvilken rolle har æterteorier haft i udviklingen af elektrodynamikken?

Projektet og modulkrav på RUC:

Projeket skal opfylde studieordningen for fysiks krav til et breddeprojekt. I studieordningen fra 31.8.89 hedder det bl.a.:

> "§ 10 Breddemodul (modul 1).
> Modulet skal sikre uddannelsens alsidighed samt give kendskab til faget i dets historiske, samfundsmæssige og erkendelsesmæssige sammenhænge.
> Stk.2 Projektet skal behandle et problem, der eksemplarisk belyser
> a) fagets erkendelsmæssige udvikling og kulturelle betydning og/eller
> b) fysikkens og teknologiens historiske udvikling på en måde, der bidrager til en forståelse af fagets samfundsmæssige placering og det nuværende samfunds teknologiske struktur."

Med projektet ønsker vi primært at opfylde a) i ovenstående.

Indledning.

Projektets opbygning :

Som det fremgår af indholdsfortegnelsen består projektet af fem overordnede kapitler samt en afsluttende opsamling og konklusion. Det første kapitel er en gennemgang af den videnskabelige og filosofiske baggrund for videnskabsmændene (inden for fysikken) i det 19. århundrede. Kapitlet er inddelt i tre underafsnit 1) Træk af elektricitets- og magnetismelærens udvikling fra antikken til det 17. århundrede. 2) Den filosofiske baggrund for indførelse af æteren, fra antikken til det 18. århundrede, samt 3) Fremkomsten af Newtons "nye videnskab" og Boscovich' og Kants kombination af Newtons fysik og Descartes og Leibniz' filosofi. Vores intention med dette kapitel er, at man efter at have læst det kender baggrunden for situationen inden for fysikken i det 19. århundrede. I det andet kapitel vil vi kort fortælle den anden side af æterhistorien, nemlig om laplacianerne som var til-hængere af fjernvirkning, og som ætertilhængerne var i opposition til. Kapitel 3 er en gennemgang af Faraday og Thomsons elektricitets- og magnetismeteorier. Det er Faraday og Thomson, som Maxwell hovedsageligt er inspireret af. Vi har givet Maxwell et særskilt kapitel, 4, da han har en meget sofistikeret æterteori og er ophavsmand til Maxwells ligninger. Kapitel 5 handler om tiden efter Maxwell, hvor man prøvede at vise æterens eksistens eksperimentelt. Men æteren blev senere afvist af Einstein. Hvert kapitel afsluttes med en kort opsummering, og hele projektet rundes af med en opsamling og konklusion, hvor vi vil prøve at svare på spørgmålet fra problemformuleringen. Bagest i projektet findes to tidstabeller; den ene over de personer vi nævner i projektet, den anden over elektromagnetismens vigtigste begivenheder.

Kapitel 1. Videnskabelig og filosofisk baggrund

I dette kapitel vil vi se på baggrunden for den retning inden for elektrodynamikken, som benyttede sig af ætermodeller. I den forbindelse vil vi tage fat på tre områder. Først vil vi belyse dele af elektricitets- og magnetismelærens tidlige historie. Næste afsnit vil handle om æterbebegrebets udvikling fra antikken til det 18. århundrede. Endvidere vil vi kort beskrive nogen af de videnskabsmænd, der har haft betydning for den videnskabelige tradition i Europa. Disse tre afsnit skal tilsammen give en ballast, så de følgende kapitler bliver lettere at forstå.

1.1 Træk af elektricitets- og magnetismenlærens historie.

Mennesket har i mange tusinder år vidst, at visse jernmalme kan tiltrække hinanden. Dette havde man også observeret i Magnesia i Lilleasien, hvor forekomsten af magnetjernsten var særlig stor, og det var efter denne by, at betegnelsen magnetisme opstod. I antikken observerede man, at rav, som er gnedet med et dyreskind kan tiltrække hår og andre små partikler. Raveffekten, som man kaldte dette fænomen, blev første gang nævnt af Platon (græsk filosof, ca. 428/7–348/7 f.v.t.) ca. 400 f.v.t. På græsk hedder rav "elektron". Hverken magnetisme eller raveffekten var genstand for nogen nøjere undersøgelse, før William Gilbert (engelsk naturforsker, 1544–1603) behandlede dem i "De Magnete"[1].

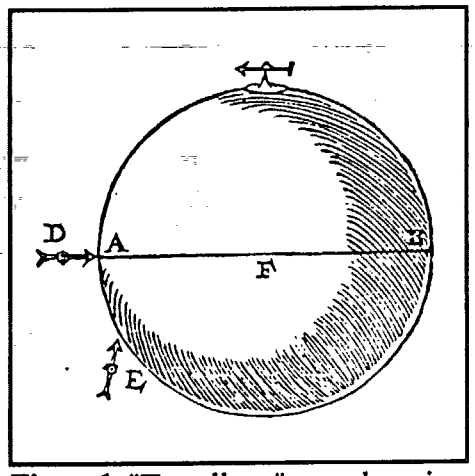
Magnetisme.

I 1600 udgav Gilbert sin bog "De Magnete". Bogen omhandler primært magnetisme; men behandler også raveffekten (statisk elektricitet), hvilket vi vil komme ind på senere.

I "De Magnete" beskriver Gilbert en række forsøg, han lavede med en såkaldt "terrella", hvilket er en magnetjernsten, der er formet som en kugle (se figur 1). Dette var, mente Gilbert, en miniaturejord med de samme magnetiske egenskaber som jorden. Følgeligt måtte dens poler ligge på samme måde som jordens. Polerne kunne findes ved at lægge små stykker af jerntråd på terrellaen, hvorved de vil placere sig på en bestemt måde. Med kridt tegnes så en streg på terrellaen langs tråden, hvorefter den flyttes og man tegner igen osv. På denne måde får man streger, der går hele vejen rundt om terrellaen (meridianer), og hvor disse streger krydser hinanden, er dens poler. Man kan placere terrellaen på en træplade, som flyder i et kar med

[1] Dette er ikke helt sandt. Den første, der undersøgte magnetismen var Petrus Peregrinus i det 13. århundrede.

vand, og den vil indstille sig så terrellaens sydpol peger mod nord, og dens nordpol mod syd. Gilbert kunne konkludere, at jorden var én stor magnet med polerne placeret, som terrellaens. I "De Magnete" fastslår han ligeledes, at ens magnetpoler vil frastøde hinanden, mens forskellige vil tiltrække hinanden [20 s.128–129].



Figur 1 "Terrellaen" og placeringen af dens to poler A og E [20 s.129].

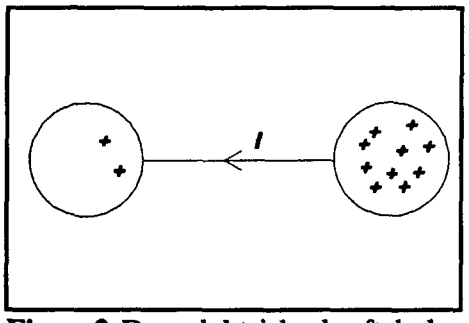
Ca. 150 år senere, i 1750, udleder John Michell (engelsk naturvidenskabsmand, 1724–1794) som den første loven om størrelsen af den kraft, hvormed to magnetpoler påvirker hinanden. Loven udledte han dels på baggrund af egne observationer dels på baggrund af observationer andre havde gjort. Michell kom frem til, at kraften aftager med kvadratet på afstanden mellem magnetpolerne.

Elektricitet.

Langt tilbage i tiden har man også kendt til elektriske fænomener. Nogle af disse fænomner var: 1) Lyn, 2) stød fra elektriske rokke, 3) St.Elms ild, en bleg glød, som viste sig på spidsen af genstande i uvejr og 4) raveffekten [21 s.543]. Imidlertid vidste man ikke, hvad der lå bag, ligesom man heller ikke var klar over, at disse fænomener overhovedet havde noget med hinanden at gøre. Indtil da havde man ikke skelnet skarpt mellem magnetisk og elektrisk tiltrækning, men blot "forklaret" dem som okkulte fænomener [20 s.92]. Med Gilbert opstod den første egentlige opdeling i magnetiske og elektriske fænomener. Modsat magnetjernsten vil rav ikke orientere sig i en bestemt retning, selvom det er frit drejeligt. En anden forskel er, at magnetjernsten kun tiltrækker jern, mens rav stort set tiltrækker alle småpartikler. Det er kun nogen stoffer, der, efter at være gnedet, tiltrækker småpartikler. Disse stoffer kaldte Gilbert elektrika, mens de, der ikke gør kaldtes non-elektrika. Gilbert kunne konkludere, at også en række andre stoffer end rav, er elektrika, han nævner bl.a. diamant, safir, opal og forseglingsvoks. Der findes enkelte elektrika, som har den tiltrækkende egenskab, uden at være gnedet først. Gilbert udskilte således elektricitetslæren fra magnetismelæren, og det blev et selvstændigt område inden for naturvidenskaben. At Gilberts hovedinteresse i forbindelse med elektriske fænomener var at eliminere dem, så han kunne koncentrere sig om sit primære emne – magnetismen – er så en anden sag [20 s.127].

Niccolo Cabeo (italiensk jesuit) fremkom, efter at have læst "De Magnete", med en teori, ifølge hvilken elektrisk tiltrækning kan forklares på følgende måde: Når et elektrikum gnides, opvarmes det, hvorved de udskiller "dunste" (effluvium), som skubber den omkringliggende luft væk. Når denne luft rammer den stillestående luft udenom, kastes det tilbage mod elektrikummet, og på denne måde trækker de småpartikler med sig. Af dette kan man udlede, at elektrisk tiltrækning kun kan finde sted, når et elektrikum er omgivet af luft [21 s.556]. Allerede her har vi altså diskussionen om det medium, der formidler kræfter. Denne diskussion skal vi høre meget mere til senere. Medlemmer af "Accademia del Cimento" i Firenze prøvede omkring 1667 at opstille et eksperiment, der skulle be- eller afkræfte denne hypotese; men de havde ikke heldet med sig. Det lykkedes nemlig ikke for dem at skabe et ordentlig vakuum. Til gengæld lykkedes det for dem at vise, at den elektriske tiltrækning var gensidig. Det vil sige, at det ikke kun er rav, der trækker i småpartiklerne; men småpartiklerne trækker også i ravet. Gilbert havde ikke ment, at dette var tilfældet. Robert Boyle (engelsk kemiker, 1627–1691) viste ca. 10 år senere, at den elekriske tiltrækning ikke er betinget af tilstedeværelsen af luft, da han brugte den nyligt opfundne vakuumpumpe. Hermed blev Cabeos hypotese aflivet.

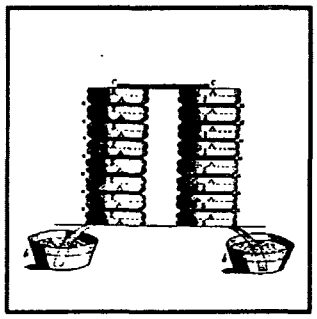
I 1729 opdagede Stephen Gray (engelsk fysiker, 1666/7–1736), at det er muligt at overføre elektrisk "kraft" fra et legeme til et andet. Dette kan man gøre ved at bringe de to legemer i direkte kontakt med hinanden. På den måde vil det legeme, der før var uelektrificeret nu være elektrificeret, og tiltrække småpartikler på samme måde som det elektrificerede legeme. Gray lavede en række eksperimenter, hvor han prøvede at blive klogere på dette område. Og det lykkedes. Han fandt nemlig ud af, at han kunne opnå den samme effekt, uden at de to legemer direkte rørte ved hinanden. Hvis man f.eks. forbinder de to legemer med en metaltråd, vil det uelektrificerede legeme også blive elektrificeret (se figur 2). Jean Théophile Desaguliers (engelsk naturforsker) fortsatte Grays eksperimenter og kunne 1736 konkludere, at kun visse stoffer , f.eks. metaller, havde den evne, at de kunne formidle den elektriske "kraft". Disse stoffer kaldte han "conductors" (ledere). Benjamin Franklin (amerikansk fysiker, 1706–1790) fremsatte, omkring 1747, den lov, som vi i dag kalder loven om ladningsbevarelse: "Den totale ladning i et isoleret system er konstant" [25 s.47].



Figur 2 Den elektriske kraft ledes fra ét legeme til et andet

Vi vil nu vende blikket mod Frankrig og Charles-François du Fay (fransk naturforsker, 1698-1739). I et brev til Royal Society i England skrev han, at han havde opdaget, at der findes to slags elektricitet. Den ene, som er forbundet med f.eks glas, kaldte han glas-elektricitet (vitreous electricity), mens han kaldte den anden, som er forbundet med f.eks. rav, for harpiks-elektricitet (resinous electricity). To ens elektriciter vil frastøde hinanden, mens to forskellige vil tiltrække hinanden.

Efter at man havde observeret, at elektricitet kan strømme fra et legeme til et andet, antog man nu, at elektricitet er en væske. Når et legeme bliver elektrificeret skyldes det blot, at det tilføres elektricitet, som er en usynlig væske. [21 s.589]. Til at begynde med opererede man med en-væsketeorier, men da du Fay havde vist, at der findes to slags elektricitet, må der også findes to slags elektriske væsker. Dette blev således efterhånden den herskende opfattelse. Også inden for magnetisme verserede der væsketeorier. Her gik man også fra en- til to-væsketeorier. De to magnetiske væsker kaldte man "boreal" og "austral". Med Coulomb blev disse teorier anerkendt af de fleste naturvidenskabsmænd. Teorien om de elektriske og magnetiske væsker vil vi høre mere om i kapitel 2.



Figur 3 Voltasøjlen.

I 1800 opfandt Alessandro Volta (italiensk naturvidenskabsmand, 1745-1827) voltasøjlen. Denne består af kobberplader og zinkplader anbragt skiftevis med et lag fugtigt filt eller pap imellem hvert pladepar (se figur 3). Volta var blevet ledt på sporet til sin søjle af Lugi Galvanis (italiensk læge, 1737-1798), som nærmest tilfældigt havde observeret, at musklerne i et frølår fra en død frø vil trække sig sammen, hvis en messingkrog fastgjort til frøens rygsøjle bringes i kontakt med den jernplade, frøen ligger på. Det arbejdede Volta videre på, og med hans søjle havde man nu en kilde til en jævn elektrisk strøm, hvor man før havde været nødt til at arbejde med statisk elektricitet.

I kapitel 2 vil vi beskæftige os mere med teorier inden for elektricitet og magnetisme. Nu vil vi i stedet se på, hvordan begrebet æteren er opstået. Også her vil vi begynde i antikken.

1.2 Æterspekulationer fra antikken til det 18. århundrede.

De fleste græske filosoffer beskæftigede sig stort set med alle tilværelsens mysterier, og således også med spørgsmålet om, hvordan den fysiske verden er opbygget. De overvejelser, de gjorde sig om dette, var primært baseret på spekulationer, mens forsøg og eksperimenter ikke blev brugt. To af de mest fremtrædende teorier om den fysiske verdens opbygning var atomteorien og elementteorien. Det er de to teorier, som vi vil gennemgå i det følgende.

Atomteorien.

Atomteorien blev startet af Leukippos (f.480/470 f.v.t.) og blev senere udviklet af Demokrit (460-380/370 f.v.t.) og Epikur (341-270 f.v.t.). Alle tre var græske filosoffer. Det grundlæggende i atomteorien er atomerne og det tomme rum. Atomerne er hele og ikke delelige, da forudsætningen for at noget er deleligt, er, at det indeholder det tomme rum i sine porer. Ligeledes skyldes komprimering af f.eks. luft, at det indeholder mindre af det tomme rum, når det er trykket sammen og mere, når det udvider sig. Forskellen mellem objekter består kun af modifikationer af formen, ordningen og positionen af atomerne [15 s.42]. Atomerne bevæger sig hele tiden i det tomme rum, støder ind i hinanden og opnår derved forskellige hastigheder og retninger. Man må sige, at Demokrits atomteori har mange lighedspunkter med vor tids atommodel, men dengang rendte Demokrit ind i et erkendelsesmæssigt spørgsmål. Demokrit påstod, at der eksisterer et tomrum. De andre filosoffer ville så spørge: "Hvad er det du påstår eksistensen af?" Hvis Demokrit svarede: "Ingenting", opstod der et paradoks, dvs. der findes noget, som ikke er noget. Leukippos sagde det på en lidt anden måde, nemlig at ikke kun "væren" eller "det der er" - atomerne - men også "ikke væren" eller "det som ikke er" - det tomme rum - må anses som eksisterende [18,I s.86].

Elementteorien.

Som tidligere nævnt var det ikke alle, som troede på atomteorien. Nogle (blandt andre Platon, Aristoteles og stoikerne[2]) troede i stedet for, at alt bestod af fire elementer: ild, luft, vand og

[2] Græsk-romersk filosofisk bevægelse fra ca. 300 f.v.t. til ca. 200 e.v.t. og er opkaldt efter den søjlegang, hvor den havde sit mødested. Stoicisme betegner en systematisk filosofi, hvis

jord, en lære der var startet af Empedokles (483/82–423 f.v.t.). Ifølge Empedokles' lære om verdens oprindelse starter processer, når ild først bliver til luft, så til vand og så til jord. Omvendt bliver verden destrueret, når processen går den modsatte vej, og de andre elementer bliver til ild. Verden begynder og slutter med ild [16 s.128].

Udover de fire elementer mente Aristoteles (384–322 f.v.t.), at der må findes et femte element, som himlen og himmellegemer består af. Det femte element kalder han æteren. Aristoteles' motiv for at foreslå et femte element er himmellegemernes konstante cirkulære bevægelse (evt. epicykel). De fire jordiske elementer har en naturlig bevægelse, som enten er op eller ned. Ild og luft stiger naturligt, mens jord og vand falder naturligt. Man kan selvfølgelig godt kaste en sten op i luften, men da er dens bevægelse ikke naturlig – og ikke evig – men påtrykt. Da himmellegemernes cirkulære bevægelse er evig, kan den ikke være jordisk, og derfor måtte han indføre æteren til at forklare bevægelsen. Både for Aristoteles og Platon var det femte element, æteren, det vigtigste element og betegnes også kvintessensen. Aristoteles efterlod dog flere uløste problemer. Han fortalte ikke noget om, hvad der sker i overgangen mellem den jordiske og den himmelske region, han forklarede heller ikke, hvordan solen kunne varme og udsende lys, når den nu bestod af æter, som hverken var varm eller kold, hverken våd eller tør [15 s.109].

Stoikernes æterteori, der ifølge Sambursky [23] er den det 17. århundredes æterteori udspringer af, var et kraftfelt som gennemtrængte al materie og rum. Dette blev betegnet pneuma. Pneumaen skulle være årsag til fysiske fænomener så som kohæsion og materies hårdhed, og ligeledes skulle den transmittere lys og gravitationel tiltrækning [23 s.37 og 3 s.66].

Descartes.

Den aristoteliske lære holdt helt frem til det 16. århundrede, hvor mænd som Copernicus, Kepler og Galilei begyndte at ændre verdensbilledet[3]. René Descartes (fransk filosof og naturforsker, 1596–1650) var en af sin tids største filosoffer og naturforskere og satte sig som

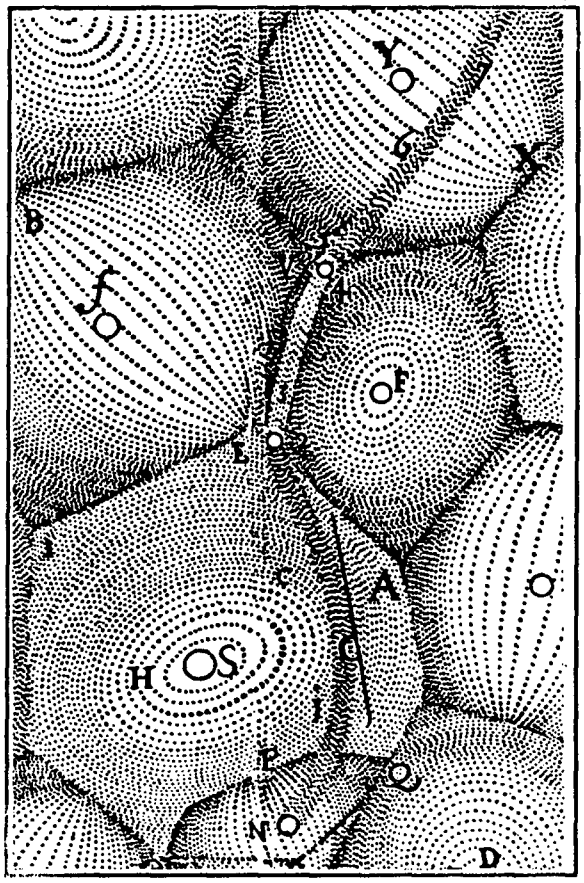
---

hoveddele er logik, fysik og etik [17].

[3] Der havde tidligere været forsøg på at ændre verdensbilledet væk fra Aristotels'; men uden held.

mål at skabe en teori for hele universet og udarbejdet så detaljeret som muligt. Denne teori fremkom a priori[4].

Decartes var tilhænger af en ætermodel, som mindede om stoikernes. Descartes skrev: "Det er i strid med fornuften at sige, at der findes vakuum eller rum, hvor der er absolut ingenting" [3, s.218 v.o.]. Han mente, at legemer kun kunne vekselvirke hvis de rent faktisk rørte ved hinanden, og derfor kunne der ikke være fjernvirkning, (med fjernvirkning menes øjeblikkelig virkning over afstand uden et formidlende medium). Det vil altså sige, at der for eksempel ikke kunne være tomrum mellem jorden og månen, men at det måtte være fyldt, dels af luft og diverse (støv)partikler og dels af nogle meget finere partikler, som tilstadighed presser og støder ind i hinanden, og er årsag til alle fysiske hændelser. Det er disse fine partikler, som Descartes kalder æteren. Æterpartiklerne er hele tiden i bevægelse, og for at der ikke skal opstå tomrum, må det nødvendigvis være sådan, at når en partikel flytter sig, så flytter den sig til en anden partikels plads. Denne anden partikel er også i bevægelse. Således må bevægelser i æteren foregå i lukkede kæder som Descartes kaldte hvirvler (se figur 4).



Figur 4 Descartes æterhvirvler [22 s.248].

Den mekaniske filosofi, som Descartes var ophavsmand til, opstod, da det copernikanske verdensbillede[5] blev anerkendt, og man ikke længere kunne forklare tyngdekraften som tings stræben mod universets centrum, jorden. Descartes foreslog da, at man forestillede sig jorden som én stor maskine, hvor alle hændelser i den fysiske verden kunne forudsiges med

[4] Udelukkende af tankens vej, spekulativt.

[5] I det copernikanske verdensbillede er solen centrum, mens jorden og de andre planeter kredser rundt om den.

matematiske beregninger. Han udtrykte det således: "Giv mig materie og bevægelse og jeg skal konstruere universet." [25 s.8].

Leibniz.

Gottfried Wilhelm Leibniz (tysk filosof og naturforsker, 1646–1716), som var en af Descartes' efterfølgere, viderudviklede hans teorier. Han mente, at alle fænomener kan kan føres tilbage til æterens bevægelse gennem og omkring de stoffer, som dannede jorden i dens tidligste fase. Æterpartiklernes bevægelse er årsag til legemers fysiske egenskaber. [3 s.423 v.o.]. Leibniz' begrundelse for indførelse af en æter var mestendels af teologisk art. Han sagde, at en verden, hvor der forekommer vakuum, ville være en mindre perfekt verden, og dette vil betyde, at Gud – skaberen –, vil være ufuldkommen, hvilket for Leibniz var umuligt [1 s.25].

1.3 Træk af naturvidenskaben i det 17. og 18. århundrede.

Vi har nu set nogle filosofiske træk fra tiden før Newton. I dette afsnit vil vi se på, dels hvordan Newton udviklede sin mekanik, dels hvordan denne sammen med filosofien inspirerede naturvidenskaben samtidig og umiddelbart efter Newton. Udover Newton vil vi i dette afsnit også beskæftige os med Boscovich og Kant. Dette vil vi fordi, de har inspireret Faraday, og igennem ham Thomson og Maxwell.

Isaac Newton (engelsk fysiker, 1642–1727).

I begyndelsen af det 17. århundrede havde Johannes Kepler (tysk astronom, 1571–1630) opstillet sine tre planetlove, hvor den anden lov siger, at forbindelseslinien mellem solen og en planet overstryger lige store areal til lige store tidsrum. Den tredie siger, at hvis planetens omløbstid kaldes T og dens middeladstand til solen a, da er T^2 proportional med a^3. Newton udgiver i 1687 Principia, hvori han bl.a. postulerer sine tre bevægelseslove. Disse siger[6]:

[6] I dag formuleres de som beskrevet, skønt Newton formulerede dem anderledes, men ækvivalente.

1) En partikel, som ikke påvirkes af nogen kraft, vil enten være i hvile eller bevæge sig retlinet med konstant hastighed.

2) For en partikel med massen m gælder: $F = m \cdot a$, hvor F er den resulterende kraft, der virker på partiklen og a dens acceleration.

3) To partikler vil påvirke hinanden med lige store og modsatrettede kræfter.

Ved hjælp af begreberne tid, sted, hastighed og acceleration kunne Newton nu beskrive vores fysiske virkelighed på en ny og endnu mere præcis måde. Dette revolutionerede videnskabens verdensbillede. Med Newtons bevægelseslove var man i stand til at forudsige et legemes (f.eks månens) position i forhold til jorden langt ud i fremtiden, ligesom man også kunne gå den anden vej og bestemme dets placering til et hvilket som helst tidspunkt tilbage i tiden. (Dette skal vi senere vende tilbage til i forbindelse med franskmanden Laplace).

Som nævnt accepterede Newton Keplers 2. og 3. lov; men dette var ikke hans eneste udgangspunkt. Fire ting var vigtige for Newton:

1) Accept af Keplers love.
2) En gennemført brug af loven om inerti.
3) En klar forståelse af centrifugalkraft.
4) Idéen om en universel gravitationskraft, hvor alle legemer i hele universet trækker i hinanden med en kraft, der er proportional med $1/r^2$ og med legemernes masse. [9 s.133]

Idéen om universel gravitation var ikke ny, da Newton fremkom med sin gravitationslov i 1687. I 1670 skrev Hooke f.eks.

> "Alle himmellegemer har en tiltrækkende eller gravitationel kraft mod deres egne centre, hvorved de tiltrækker ikke bare deres egne dele og forhindre dem i flyve væk fra dem, som vi kan observere Jorden gør, men også tiltrækker alle andre himmellegemer, som er inden for deres aktive sfære..." [9 s.134 v.o.].

Det lykkedes ham endvidere at fastslå, at jordens gravitationskraft er proportional med $1/r^2$ (dette gjorde han ved at kombinere Huygens' lov for centrifugalkræfter med Keplers 3. lov).

Det samme kom Newton frem til. Med udgangspunkt i Keplers love samt ved brug af matematik udledte han en lov for størrelsen af kraften, hvormed to legemer med masserne M og m og indbyrdes afstand r trækker i hinanden. I dag vil vi skrive den som:

$$F = G \frac{M \cdot m}{r^2}$$

hvor G er en universalkonstant kaldet gravitationskonstanten. Udtrykket ovenfor kaldes gravitationsloven. Newton antog, at kræfterne virkede i en lige linje mellem legemerne (centralkræfter).

Newton beskæftigede sig også med årsagen til, at legemer trækker i hinanden. Han mente, der findes en forklaring, men indrømmede at det var svært at opstille nogen beviselig teori. Oftest endte han med at konkludere, at gravitationskræfter blot skyldes den allestedsnærværende Gud. Spørgsmålet om en æter optog også Newton, men han endte med at konkludere, at

> "Planeternes og kometernes bevægelser er bedre beskrevet uden den (æteren)." [2 s.465].

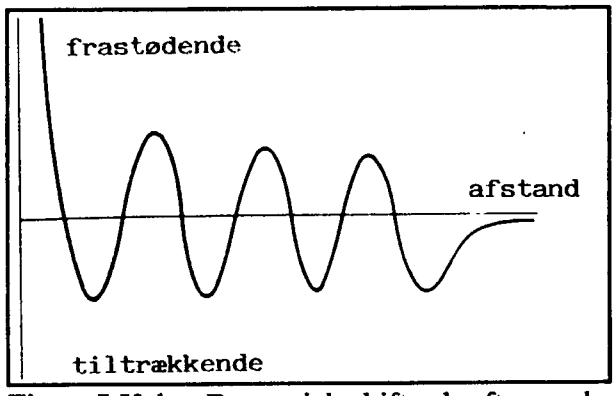
Med Newton opstod en mere systematisk måde at drive naturvidenskab på. Sammenhænge blev udledt på baggrund af systematiske observationer og matematiske behandlinger. Derimod anerkendte Newtons tilhængere ikke teorier udledt af spekulativ vej. Newtons metode fik bl.a. en del tilhængere i Frankrig ca. 100 senere i slutningen af 1700-tallet.

Ruggero Giuseppe Boscovich.

Boscovich (kroatisk astonom og matematiker, 1711-1787) udledte sit natursyn af Leibniz' og integrerede den med den newtonske fysik. Han og Kant (Kant vil blive belyst i næste afsnit) var dog modstandere af Descartes og Leibnizs opfattelse af det fulde rum, altså at rummet var et område af materie eller kraft [1 s.25].

Han mente, at materien består af identiske punkter uden udstrækning, og disse materiepunkters egenskaber er inerti, og at de udøver en kraft på andre materiepunkter. Hans idé var altså, at erstatte materie (med udstrækning) med matematiske punkter, som har inertiegenskaber [9 s.166]. Leibniz mente, at der må findes en grundlæggende frastødende kraft, som er årsag til,

at materie er uigennemtrængelig. Sammen med gravitationskræfter prøvede Boscovich at kæde dette sammen i en fælles teori. Ser man først på de to yderstillinger, så skal kraften mellem to punkter være tiltrækkende, når de er uendelig langt fra hinanden, og frastødende når de næsten rører hinanden. For at forklare kemiske bindinger skal kraften mellem to materiepunkter være tiltrækkende, når afstanden mellem dem bliver lidt større. Boscovich mente således, at kraften mellem to punkter vil skifte mellem at være tiltrækkende og at være frastødende som en funktion af afstande imellem dem (se figur 5).



Figur 5 Ifølge Boscovich skifter kraften mellem at være tiltrækkende og frastødende afhængig af afstanden.

Én af hans idéer, som fik stor indflydelse på eftertiden, og som især påvirkede Faraday, var at sammenligne kræfter mellem materiepunkterne med kraften mellem enderne af en fjeder, som et fysisk billede på, at kraft er et mere fundamentalt begreb end materie. Denne idé blev også taget op af Kant og feltteoretikere i det 19. århundrede [9 s.166].

Immanuel Kant (tysk filosof, 1727–1804)

Kant kombinerer Leibniz' verdensbillede (al materie er kraft) med Newtons verdensbillede med partikler og det tomme rum [1 s.27].

I følge Kant kan materien ikke gennemtrænges af andet materie, hvilket er en fundamental egenskab ved materien. Denne uigennemtrængelighed skyldes en frastødende kraft, som er knyttet til hvert materiepunkt. Denne kraft er ligeledes en fundamental egenskab ved materien. Den frastødende kraft virker i det umiddelbare rum omkring materiepunktet og forhindrer tilstedeværelse af andet materie i dette rum [9 s.173]. Den frastødende kraft kan have en hvilken som helst størrelse, hvorved uigennemtrængeligheden kun er relativ, og legemer kan sammenpresses, hvis de blot bliver påvirket af en tilstrækkelig stor ydre kraft [9 s.174].

Kant mente, at frastødende kraft er lig materie, og deraf må følge, at hvor der er kraft, må der også være materie. Eftersom rummet, som er fyldt af frastødende kraft, er uendelig deleligt,

så må materien også være uendelig delelig [9 s.174]. Materien skal ikke identificeres som værende særlige punkter i et kraftfelt, men som værende selve det sammenhængende område af frastødende kræfter (Kant tilskrev også materien inertielmasse, som han kaldte "materiens kvantitet") [9 s.174].

Kants verdensbillede var tiltrækkende for mange, bl.a. danskeren Ørsted, som specielt lagde vægt på, at al materie består af tiltrækkende og frastødende kræfter; alle kendte former for kræfter er dannet af de to fundamentale kræfter [1 s.28].

Opsummering.

I dette kapitel har vi set, hvordan mennesket første gang observerede magnetiske og elektriske fænomener, og hvordan man i høj grad ad spekulativ vej lavede teorier, der skulle forklare disse fænomener. Ligeledes har vi set, hvordan de første idéer om en æter opstod, og hvordan disse idéer blev viderudviklet i det 17. og 18. århundrede. Med Newton opstod en ny måde at drive naturvidenskab på. Nogle naturforskere (f.eks. Boscovich og Kant) kombinerede dele af Newtons teorier med bl.a. Descartes' og Leibniz'. En af dem, der blev inspireret af dette var englænderen Michael Faraday. Faradays tanker og hans forskning vil blive belyst i kapitel 3. I Frankrig var det Newtons mekanik i en mere rendyrket udgave, som var inspiration for naturvidenskaben med Simon Laplace i spidsen. Deres natursyn og forskning vil være emnet for det næste kapitel.

Kapitel 2. Fjernvirkningsteorier.

I dette kapitel vil vi se på, hvordan fjernvirkningsteorier blev brugt som beskrivelse af elektriske og magnetiske fænomener. Fjernvirkningsteorierne var den dominerende beskrivelsesform af disse fænomener i omkring 100 år (fra slutningen af det attende århundrede til slutningen af det nittende). Det var især to teoretiske skoler som stod for denne teori, nemlig den franske skole og senere den tyske skole. Disse skoler udviklede teorier for elektricitet og magnetisme og deres indbyrdes interaktion sideløbende med, at æterteoretikerne (feltteoretikerne) udviklede deres teorier inden for det samme område. Fjernvirkningsteoretikerne operede også med en æter; men den var ikke nødvendig i udviklingen af deres teorier, og derfor tillader vi os helt at se bort fra denne kendsgerning. De gjorde det dog på et andet baggrund, idet de mente at elektrisk og magnetisk interaktion foregår ved nærvirkning (hvilket vi vil se på i kapitel tre og fire).

2.1 Den franske skole.

Et af de steder, hvor man byggede videre på Newtons mekaniske love (jf. afsnit 1.3), var i Paris. Ført an af matematikeren og astronomen Pierre Simon Laplace (1749–1827) dannedes den franske skole, som blev et af hovedcentrene for forskning inden for na–turvidenskaben. Den franske skole havde sin storhedstid i perioden 1790 til 1820, men også derefter spillede den en betydelig rolle i udviklingen af naturvidenskaben. Forbilledet var Newtons "Principia", hvori han opstiller sine bevægelseslove. Disse blev som sagt holdt i et strengt matematiske sprog; man kan tale om en kvantitativ beskrivelse fremfor en kvalitativ. Dette optog La–place, hvis verdensbillede kom til at repræsentere determinisme i sin yderste konsekvens. Hvis man forestillede sig et intellekt, som på et bestemt tidspunkt kunne se alle objekter, disse objekters tilstand og hvilke kræfter, der virkede på dem, og dette intellekt så ud fra naturlovene analyserede disse oplysninger, så mente Laplace, at intellektet ville kunne forudsige hele universets udvikling lige fra atomar til planetar plan (det kunne også se bagud i tiden). Dette intellekt kaldes Laplace's dæmon, og er altså udtryk for en streng determinisme.

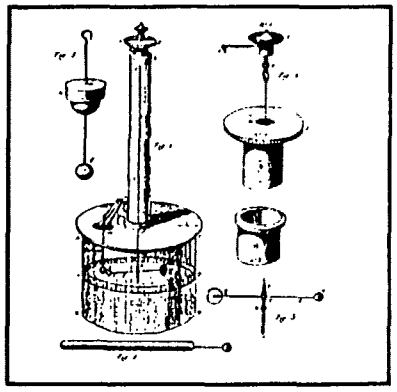
Stofopfattelse i den franske skole.

Laplacianerne opfattede al stof som opbygget af molekyler, dervekselvirkede med gravitationskræfter [12 s.8]. Ud over disse molekyler mente de også, at der eksisterede forskellige meget fine væsker eller fluida. En af disse var Lavoisiers "calorique", som var et varmestof,

der var så fint, at det kunne strømme gennem porerne i andre stoffer. Det var imidlertid ikke kun varme, som de forklarede med en væsketeori. En sådan brugte de også til at forklare fænomenerne elektricitet og magnetisme, som vi har set i afsnit 1.1. Til forklaring af hvert af de to fænomener brugte de to væsker. Disse vekselvirkede ved, at partikler fra samme væske frastødte hinanden, mens de tiltrak partikler i den anden væske. At et legeme ikke var elektrisk ladet, forklarede de således, at det indeholdt samme mængde af de to væsker. Dette kaldtes den naturlige tilstand. På samme måde kunne man forklare magnetisme med to modsatte væsker [12 s. 9]. Udover disse to-væske-teorier fandtes også teorier, der kun opererede med én væske for hver af de to fænomener. At et legeme var elektrisk ladet, blev her forklaret ved, at der enten var overskud eller underskud af den elektriske væske [9 s.183]. Coulomb, som vi skal høre om i næste afsnit støttede to-væsketeorien.

Kraftopfattelse i den franske skole.

Som nævnt var Newtons gravitationslov det store forbillede for Laplace og hans tilhængere, og det var således ingen tilfældighed, at han undertiden benævnes som "den anden Newton". Ligesom Newtons gravitationslov siger, at to legemer trækker i hinanden, således gør to ladninger. Coulomb opstillede i 1785 en lov, som sagde noget om størrelsen af den kraft, hvormed to ladninger påvirker hinanden. Denne kom han frem til efter en række "meget nøjagtige" målinger af henholdsvis tiltrænings- og frastødningskræfter for elektriske ladninger. Til dette brugte han et torsionpendul (se figur 1). Hvis q_1 og q_2 er størrelsen af de to ladninger, og r er deres indbyrdes afstand, da gælder følgende lovmæssighed (som vi i dag benævner med Coulombs lov; ikke fordi han var den første til at formulere den, men fordi han med sine nøjagtige målinger efterviste dens gyldighed):



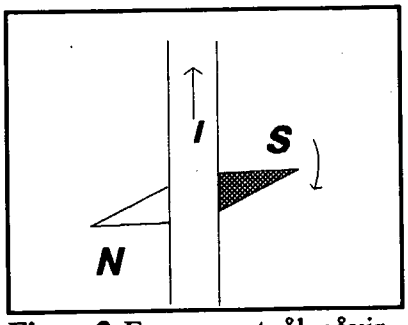
Figur 1 Torsionspendul som Coulomb anvendte.

$$F = K_e \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \ , \ hvor \ K_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$$

ε_o kaldes vakuum-permitiviteten og har værdien $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ $C^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$.

Med Coulombs lov for kraften mellem to ladninger blev Newtons mekanik "overført" til elektricitetslæren. At Coulomb kunne eftervise denne sammenhæng var ikke tilfældigt, mente laplacianerne. Det viste blot, at Newton havde ret, og at hans gravitationslov, med relationen r^{-2}, blot skulle overføres til andre grene inden for fysikken. Alle kræfter kunne beskrives som centralkræfter[1]. Ligeledes var begrebet fjernvirkning for kræfter essentielt: kræfter virker over en afstand, og de er ikke afhængige af et mellemliggende medium.

I 1820 opdagede H.C. Ørsted, at en magnetnål slår ud, når den holdes parallelt med en strømførende leder. Om det var en tilfældighed eller ej, der gjorde Ørsted i stand til at finde på dette forsøg, har der været ført mange diskussioner om; dem vil vi imidlertid lade ligge. Opdagelsen stemmer imidlertid ikke overens med laplacianernes teori om, at alle kræfter er centralkræfter. I Ørsteds forsøg bevæger magnetpoler (kompasnålen) sig vinkelret på strømretningen (se figur 2). Ligeledes passede resultatet af forsøget ikke sammen med, at Coulomb tidligere havde konkluderet, at der ikke er sammenhæng mellem elektricitet og magnetisme. Dette havde han gjort med udgangspunkt i de førnævnte to-væsketeorier. De magnetiske og elektriske væsker reagerer uafhængigt af hinanden, og således kunne magnetisme kun vekselvirke med magnetisme, og elektricitet kunne kun vekselvirke med elektricitet [1 s.37]. Så det er ikke nogen overdrivelse at fastslå, at Ørsteds opdagelse skabte en del røre og aktivitet i Frankrig. Det varede heller ikke længe før de første laplacianske teorier fremsattes, således at Ørsteds opdagelse passede til det laplacianske natursyn. Her er Ampères arbejde nok det vigtigste, men vi vil også nævne Biot og Savarts.

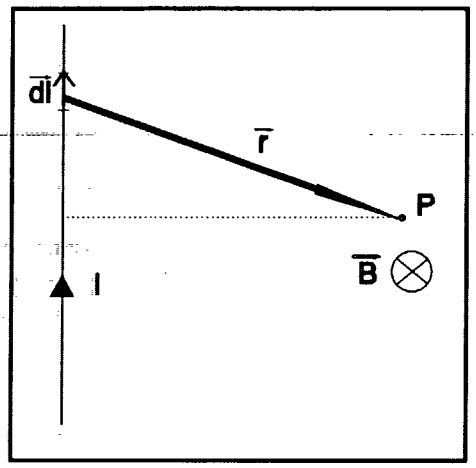


Figur 2 En magnetnål påvirkes af en strømførende leder.

Biot-Savarts lov.

Jean Baptiste Biot (1774-1862) og Félix Savart (1791-1841) var de første, der kom med en kvantitativ analyse af Ørsteds opdagelse [24 s.186]. De fandt hermed frem til, at den magnetiske kraft i et hvert punkt i nærheden af en lang lige strømførende ledning ændres med afstanden ved forholdet r^{-2}, samt at den magnetiske kraft er både vinkelret på lederen og på

[1] En centralkraft virker i lige linie mellem to legemer, der betragtes som uendelige små punkter med hele massen centreret i dette punkt. F.eks. er gravitationskraften en centralkraft, idet kraften mellem to masser er en funktion af afstanden mellem deres massemidtpunkter, og virker i en lige linie mellem disse to punkter.



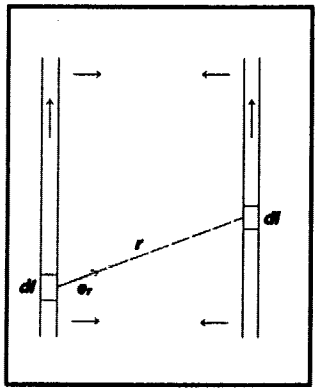
Figur 3 Det magnetiske felt i et punkt, P.

normalen mellem lederen og P. Denne sammenhæng fandt de ved at sammenligne en magnets (ophængt i en silketråd) svingningstider i forskellige afstande til ledningen. Resultatet er i dag kendt som Biot–Savarts lov. Vi ser, at denne lov stemmer overens med laplacianernes teorier, idet størrelsen af den magnetiske kraft er omvendt proportional med kvardratet af afstanden. Det skal dog her bemærkes, at Biot–Savarts lov ikke beskriver en centralkraft, som Ampères kraftlov, hvilket gav anledning til en polemik. I dag udtrykker vi det således, at størrelsen af det magnetiske felt **B** fra strømelementet dl i punktet P er:

$$d\mathbf{B} = konstant \cdot I \cdot \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

hvor I betegner strømstyrken, og r betegner afstanden mellem et strømelement og punktet P. Konstanten kendes i dag som $\mu_o/4\pi$, hvor μ_o kaldes vakuumpermeabiliteten og har værdien $4\pi \cdot 10^{-7}$
$m \cdot kg \cdot C^{-2}$.

André Marie Ampère (1775–1836).



Figur 4 Vekselvirkning mellem to strømførende ledere.

Ampère satte sig for at vise, at Ørsteds forsøg udmærket kunne forenes med laplacianernes eksisterende opfattelse. Han opstillede en teori, ud fra hvilken magnetisme kunne forklares ved hjælp af elektricitet. Han antog, at magnetisme skyldes små cirkulære strømme i magneten. Disse strømme var så i stand til at vekselvirke med tilsvarende strømme i andre magneter, eller som i Ørsteds forsøg med en strøm i en leder. Konsekvensen af dette var, at også to strømførende ledere skulle vekselvirke med hinanden, og det havde man ikke hidtil observeret. Ampère viste imidlertid, at dette netop er tilfældet. Han lavede en række forsøg, ud fra hvilke han kunne konkludere, at når strømmen i to parallelle ledere har samme retning tiltrækker de hinanden, mens de frastøder hinanden, når

strømmene er modsatrettede (se figur 4). Derved var Ampère så i stand til at forklare disse kræfter som centralkræfter. Man skulle blot forestille sig strømmen "delt op" i uendelig mange små stykker kaldet strømelementer, og kræfterne mellem to strømelementer var så en centralkraft. Ampère udførte en række forsøg og kom frem til, at størrelsen af kraften, hvormed to strømelementer i to lukkede strømkredse påvirker hinanden, kan beskrives således [12 s.20]:

$$\boldsymbol{F}_{12} = konstant \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{r^2} \cdot \left[d\boldsymbol{l}_1 \cdot d\boldsymbol{l}_2 - \frac{3}{2} (d\boldsymbol{l}_1 \cdot \boldsymbol{e}_r) \cdot (d\boldsymbol{l}_2 \cdot \boldsymbol{e}_r) \right] \cdot \boldsymbol{e}_r$$

Som vi ser i første led er det altså tale om en kraft, der er omvendt proportional med kvadratet på afstanden og er en centralkraft (den virker på linien mellem de to strømelementer), hvilket jo passede glimrende til laplacianernes teorier. De andre led siger noget om strømelementernes (dl) længde og om geometrien i systemet [12 s.20]. Konstanten er, som i Biot–Savarts lov, $\mu_0/4\pi$. Den eneste "indrømmelse" laplacianerne således måtte komme med var, at der beviseligt er en sammenhæng mellem elektricitet og magnetisme.

Efterhånden var franskmændenes rolle ved at være udspillet, men det betød ikke, at idéen om fjernvirkning blev opgivet. De betydeligste tilhængere var nu blot at finde i Tyskland. Vi vil nu se på nogen af de vigtigste resultater fra denne fløj.

2.2 Den tyske skole.

Den romantiske naturfilosofi[2] havde tidligere haft mange tilhængere i Tyskland, hvor grundlaget for den mere eller mindre var blevet lagt. Men omkring midten af det nittende århundrede voksede der i Tyskland en ny generation af fysikere frem, som vendte sig mod den romantiske tankegang. Denne tyske skole, som primært bestod af eksperimentalfysikere, fortsatte franskmændenes forsøg på at forklare elektriske og magnetiske fænomener med centralkræfter, fjernvirkning og væske–teorien. Disse tyskere var bl.a. Franz Neumann, Wilhelm Weber, Gustav Kirchhoff, Hermann von Helmholtz, og til dels også Heinrich Hertz og hollænderen H.A. Lorentz. Disse tyskere forsøgte at videreudvikle det laplacianske program, hvilket i første omgang ville sige at få teorien til at omfatte elektromagnetisk

[2] Romantisk naturfilosofi gik ud på, at der var en enhed i naturen. Denne filosofi påvirkede bl.a. Ørsted i høj grad.

induktion og andre af Faradays opdagelser (se afsnit 3.1). Vi vil i dette afsnit begrænse os ved kun at komme ind på Webers arbejde.

Wilhelm Weber.

Vi lægger hovedvægten på Weber (1804–1891), fordi han forsøgte at lave en samlet teori, som omfattede alle de på den tid kendte elektriske og magnetiske fænomener, på baggrund af den Laplacianske tradition (dog afveg hans teori fra dette fundament, idet den omfattede virkningen mellem elektriske partikler i relativ bevægelse [1 s.128]). Han mente, at kraften mellem strømelementerne, som beskrevet i Ampères kraftlov, grundlæggende måtte skyldes elektriske partiklers bevægelse. I følge Weber bestod en elektriske strøm i en ledning af positive og negative elektriske partikler, som bevægede sig i modsat retning med lige stor hastighed. I 1846 fremkom Weber med en kraftlov, der skulle omfattede alle kendte elektriske og magnetiske fænomener. Heri er kraften mellem elektriske partikler gjort afhængig af deres indbyrdes afstand, deres hastighed og acceleration.

$$\boldsymbol{F}_{12} = \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{2c^2}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \frac{r}{c^2} \cdot \frac{d^2r}{dt^2}\right] \cdot \boldsymbol{e}_r$$

I Webers kraftlov er e_1 og e_2 to elektriske partikler, r er afstanden mellem partiklerne, og c en konstant, som beskriver forholdet mellem elektrostatiske og elektromagnetiske enheder for ladning. Denne konstant bestemte Weber (assisteret af Kohlrausch) i 1855 til at være $3{,}11 \cdot 10^8$ $m \cdot s^{-1}$, hvilket svarer omtrent til lysets hastighed [12 s.25 ,1 s.129–130 og 24 s.205].

Som vi umiddelbart kan se, indeholder denne kraftlov i det første led noget, der ligner Coulombs lov for elektrostatiske kræfter. Dette led siger da også noget om tiltrækningen mellem elektriske partikler i hvile. Det andet og tredie led gør rede for elektrodynamikken [12 s.25]. Webers kraftlov skulle forklare alle kendte elektrodynamiske fænomener. Når partiklerne ikke bevæger sig ($dr/dt=0$ og $d^2r/dt^2=0$), kan vi se, at kraften svarer til Coulombs kraft. Det er ligeledes muligt at udlede Ampères lov, hvad vi dog ikke vil gøre her. Endelig beskriver kraftloven induktion af elektromotorisk kraft i en ledning. Dette vil sige at kraftloven gør rede for elektromagnetisk induktion [1 s.130].

Weber udbyggede senere sin teori bl.a. så den også omfattede andre elektriske og magnetiske fænomener.

Det er værd at lægge mærke til, at Weber forklarede elektriske og magnetiske fænomener som værende et resultat af elektriske partiklers bevægelse, i modsætning til feltteoretikerene (som vi skal se senere). Feltteoretikerne forklarede disse fænomener som værende et resultat af interaktion mellem kraftfelter.

Opsummering

Vi har i dette kapitel set, hvordan den franske og tyske skole udviklede sig på baggrund af Newtons mekanik og Laplaces teorier, samt at de opfattede både elektricitet og magnetisme som bestående af to slags væsker. Den franske skole prøvede at beskrive alle kræfter, der virker gennem rummet, ud fra Newtons kraftlove. Denne virkning sker ved fjernvirkning og alle disse kræfter skulle være centralkræfter. De franske fysikere fik opdagelserne inden for elektricitet og magnetisme til at stemme overens med Newtons r^{-2}–lov. Vi har set, at Coulombs kraftlov indeholder denne relation; vi så den også i Biot–Sarvarts lov og ligeledes i Ampères kraftlov. Den tyske skole fortsatte i samme spor som franskmændene, og her så vi, at Webers kraftlov også indeholder r^{-2}–relationen. Men Weber gik videre, idet han ikke blot så på elektriske partikler i hvile, men også tillagde deres hastighed og acceleration en betydning. Dette var et brud med det laplacianske program, idet kræfter hidtil var blevet beskrevet som en funktion af afstanden mellem to legemer. Webers teori beskriver ikke elektricitet som væske, men som værende positive og negative partikler.

I næste kapitel vil vi se på, hvordan engelske fysikere forklarede elektrisk og magnetisk interaktion ved nærvirkning.

Kapitel 3. Tidlige felt- og æterteorier.

De kraftopfattelser samt tankerne om en æter, som vi beskrev i afsnit 1.2 kom til at få en afgørende betydning for tilsynekomsten af en ny retning inden områderne elektricitet og magnetisme. Kraftopfattelserne var især inspiration for Michael Faraday (engelsk naturforsker 1791–1867), mens æterspekulationerne inspirerede William Thomson (engelsk naturvidenskabsmand, senere adlet til Lord Kelvin, 1824–1907). Dette kapitel handler om, hvilke teorier de to fremkom med, der havde betydning for Maxwell.

3.1 Michael Faraday.

Faradays natursyn

Faradays natursyn havde en afgørende betydning for hans videnskabelige forskning. Det var hans natursyn, der ledte ham til hans store opdagelser som elektromagnetisk rotation, elektromagnetisk induktion og interaktion mellem lys og magnetisme. Faraday havde aldrig lært matematik, hvorved hans forskning var en vekselvirkning mellem abstrakt tænkning og konkrete eksperimenter. Det var først senere at Faradays teorier blev matematificeret af bl.a. Thomson og Maxwell.

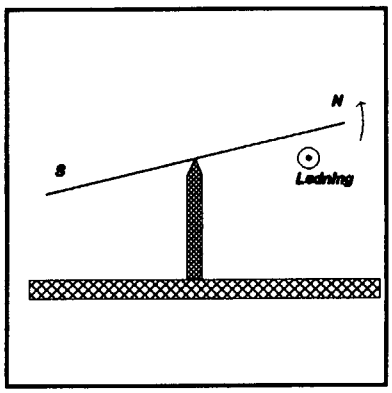
Det kan være svært præcist at redegøre for Faradays natursyn, idet hans beskrivelser om dette område er ret vage, men også fordi hans natursyn ændredes i takt med hans forskning. I det følgende vil der dog blive redegjort for hovedtrækkene.

Faraday mente, at kraft udfyldte hele rummet, og at det ikke var nødvendigt at skelne mellem kraft og materie. Partikler er de steder, hvor kræfter bliver omformet til materielle punkter. Dvs. at legemer blot kan betragtes som et system af kræfter. Når to legemer påvirker hinanden, er det kræfterne, som indbyrdes virker på hinanden. Påvirkningen mellem kræfter er betinget af deres indbyrdes størrelse og retning. Hele rummet kan betragtes som et hav af kraftpunkter. Påvirkning mellem to legemer sker således ved at kræfterne påvirker nabokræfterne som ved en kædereaktion. Dette må medføre at udbredelsen af påvirkningerne tager tid, og at påvirkningerne ikke nødvendigvis vil foregå langs den rette forbindelseslinie mellem de to legemer. Ved at mene dette, bragte Faraday sig i opposition til de kontinetale skoler (den franske og den tyske), som mente, at kraften virker øjeblikkeligt og langs forbindelseslinierne (se kapitel 2). Kraftens udbredelseshastighed er betinget af kraftens intensitet i kraftpunktet [1 s.52].

Kraftbevarelse var et vigtigt begreb i Faradays natursyn. Kræfter kan ikke pludselig opstå eller forsvinde, da kraft er selve den fysiske substans [1 s.58]. Kræfterne kan derimod omformes fra én kraft til en anden (f.eks. fra elektriske til magnetiske), da de kendte kræfter alle er former af én fundamental, bagvedliggende kraft (danskeren H.C. Ørsted havde de samme tanker om enhed i naturen) [1 s.60].

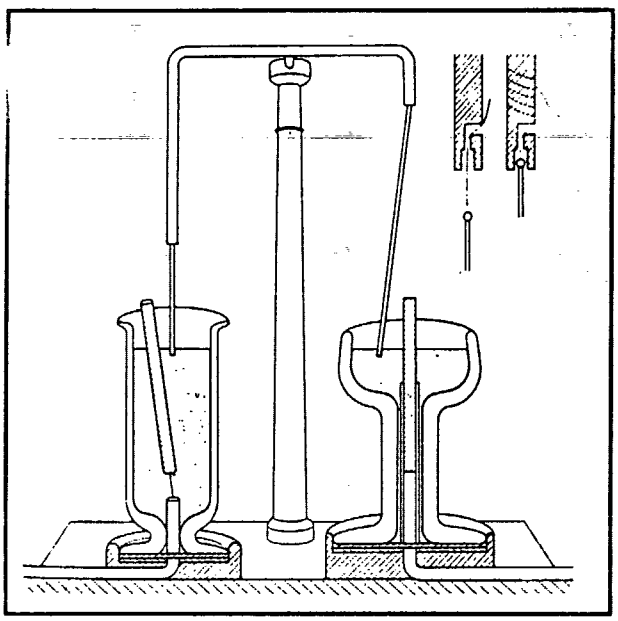
Faradays eksperimenter

Kort efter Ørsteds opdagelse af en strømførende lednings evne til at påvirke en magnetnål fremkom Ampère med en teori om interaktion mellem to parallelle strømførende ledninger, hvor han regnede kraften for værende en centralkraft (se afsnit 2.1). Faraday mente ikke, at det var så simpelt endda. Han eftergjorde Ørsteds forsøg med en strømførende ledning i forskellige positioner i forhold til magnetnålen. Han opdagede, at hvis han placerede ledningen over magnetnålens akse og vinkelret på nålens retning, ville nålen ikke give et udslag. Men førte han den bort fra nålens akse, og stadigvæk vinkelret på nålen, ville nålen give et udslag i det vertikale plan (se fig. 1) [1 s.42].



Figur 1 Påvirkning af en magnetnål med en strømførende ledning.

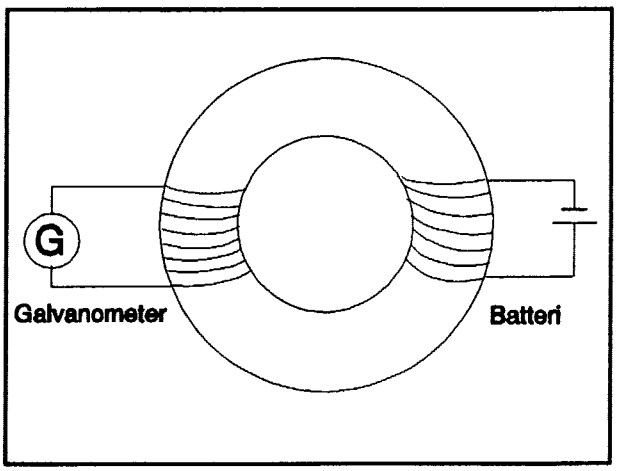
Dette sammen med flere lignende forsøg førte frem til idéen om, at en ledning har en tendens til at rotere omkring en magnet og omvendt. Det endelige forsøg, som påviste den elektromagnetiske rotation af både en strømførende ledning omkring en magnet og omvendt, var følgende (se fig 2). Et frit bevægeligt ledningsstykke var ophængt over et bæger med kviksølv og en fastgjort magnet med den ene pol pegende opad. I et andet bæger også med kviksølv og med en fastgjort ledning kunne magneten bevæge sig frit omkring ledningen. Når der sendtes strøm igennem bægerne og ledningsstykkerne, begyndte den frit bevægelige ledning og magnet at rotere og fortsatte så længe strømmen var tilsluttet [1 s.45]. Faraday så sit forsøg som et afgørende argument mod Ampères teori om, at tiltrækning og frastødning mellem to strømelementer sker langs de to elementers forbindelseslinie, og at kraften, der virker fra det ene strømelement på det andet ikke er en centralkraft (se afsnit 2.1) men en rotationel kraft.



Figur 2 Faradays eksperiment der viser elektromagnetisk rotation [1 s.45].

I årene op til 1831 søgte Faraday uden held en metode til at konvertere magnetisme til elektricitet. Som tidligere nævnt mente han, at de kendte kræfter var repræsentationer af en fundamental kraft og er indbyrdes konvertible. I en række af forsøg, som han foretog i 1825, prøvede han at påvise ændringer i strømstyrken i en ledning ved at placere magneter i nærheden af ledningen. Han ændrede dog ikke på magneternes placering under forsøgene; for hvis han havde gjort det, ville han have kunnet påvise ændringer i strømstyrken. Han havde den idè, at en kraft, som påvirker et legeme, ændrer dets indre kraftstruktur, eller sætter det i en særlig tilstand af pres. F.eks vil en ledning i et magnetfelt være i en særlig spændingstilstand. Da en strøm efter Faradays opfattelse eventuelt kan betragtes som en vibration af spændingsforskelle i en ledning, vil tilstedeværelsen af et magnetfelt i en ledning skabe en elektrisk strøm [1 s.62].

En senere idé fra 1831 førte frem til opdagelsen af elektromagnetisk induktion. Baggrunden for denne idé var bl.a. at Faraday havde læst Fresnels fremstilling af bølgeteorien for lys. Ifølge idéen om kraftbevarelse vil en kraft, der bevæger sig gennem en ledning med varierende intensitet (en elektrisk strøm), få sin ændring modsvaret af ændringer i de omliggende kræfter. Så omvendt skulle en pludselig ændring i en lednings omkringliggende kræfter forårsage en vibration i ledningens kræfter. Denne ændring, mente Faraday, kan være en elektrisk strøm. Han lavede derefter et forsøg med en ringkerne med to adskilte spoler, den ene spole tilsluttet et galvanometer. Når den anden spole tilsluttedes et batteri (se figur 3), gav galvano-



Figur 3 Elektromagnetisk induktion ved en ringkerne med to spoler.

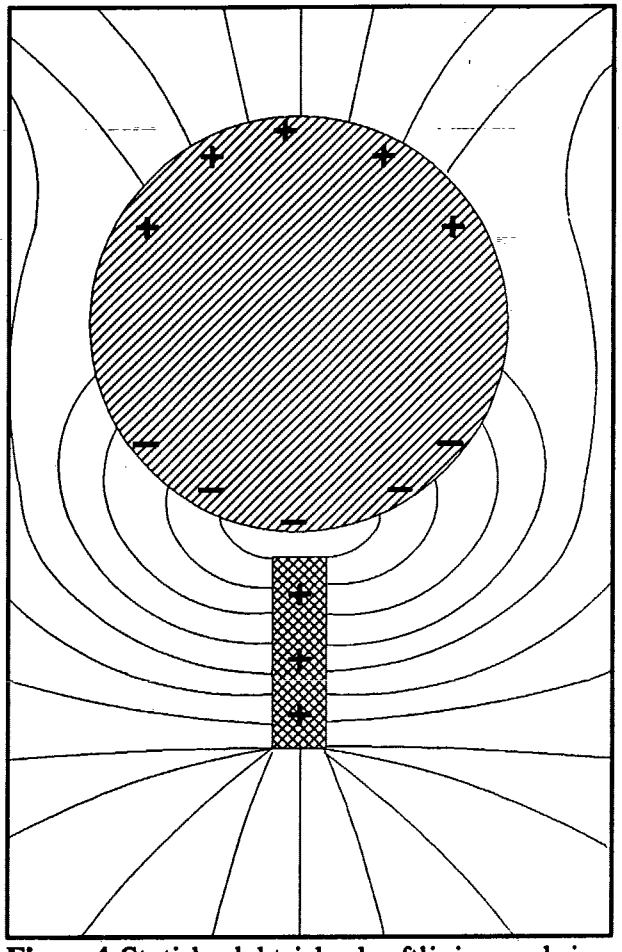
meteret et udslag. Det samme gjorde sig gældende ved afbrydelse af strømmen. Han kaldte den spændingstilstand ledningen er i, når den befinder sig i et magnetisk felt for den elektrotoniske tilstand (lat. tonus: spænding). En ændring i den elektrotoniske tilstand vil altid forårsage en elektrisk strøm [1 s.65–67].

Det var først efter opdagelsen af elektromagnetisk induktion, at Faraday indførte kraftliniebegrebet. Hidtil havde han blot brugt linierne, som han kaldte magnetiske kurver, som en geometrisk beskrivelse af de kræfter, der virker mellem en magnet og en strømførende ledning [12 s.23]. En magnetisk kurve viser den retning, en magnetnål vil have i et punkt i nærheden af en magnet eller en strømførende ledning. Senere tillagde han de magnetiske kurver en anden og udvidet betydning, idet han nu mente, at kraftlinierne (som han nu kaldte dem) havde en reel fysisk betydning. Således mente han, at en fysisk beskrivelse af en magnet, i lige så høj grad som magneten selv, omfattede en beskrivelse af dens kraftlinier.

Han måtte senere revidere sin teori om, at en ændring i den elektrotoniske tilstand altid vil forårsage en elektrisk strøm, for det viste sig at bevægelse af en ledning i et område med en konstant magnetisk kraft, og derved også en konstant elektrotonisk tilstand, vil inducere en elektrisk strøm. Han ændrede teorien, således at den inducerede strøm er proportional med antallet af magnetiske kraftlinier, der gennemskæres per sekund. Faradays kraftliniebegreb viste sig således at kunne beskrive det samme, som den elektrotoniske tilstand kunne og mere til [1 s.69].

Faraday forsøgte at vise at elektrostatisk og magnetisk interaktion foregik langs krumme linier. Han så eksistensen af krumme kraftlinier som et afgørende argument mod fjernvirkning, idet fjernvirkning foregår i lige linier [8 s.184]. Han prøvede med flere opstillinger at demonstrere kraftliniernes krumme natur. Følgende opstilling med elektrostatiske kraftlinier, opfattede han som en afvisning af Coulombs elektrostatiske teori (at kraften mellem to ladede partikler foregår i lige linie og ved fjernvirkning). Hvis man anbringer en kugle af ledende materiale over et ladet dielektrikum (F.eks. shellak), er det muligt at måle de elektriske kraftlinier oven over kuglen. Da kraftlinierne ikke kan gå igennem en leder, må de være krumme, ræsonnerede Faraday [1 s.90]. Dette ræsonnement holder dog ikke, da det elektrostatiske kraftfelt polariserer metalkuglen. Derfor vil ladningen på toppen af kuglen have den samme polaritet som shellakstangen, og de krumme kraftlinier er derfor et resultat af de to kraftfelter (se figur 4).

Faraday skelnede mellem elektrostatiske og magnetiske kraftlinier, og han mente, at de elektrostatiske kraftlinier eksisterede som en sammenhængende række af partikler (luftpartikler som er polariserede), medens de magnetiske eksisterer i et rum uden materie. Han mente, at der var bevis for, at de magnetiske kraftlinier måtte eksistere i det tomme rum, idet de var dele af magneten. Han kunne til gengæld ikke finde bevis for, at de elektrostatiske kraftlinier kunne eksistere uden et medium [8 s.185].



Figur 4 Statisk elektriske kraftlinier omkring en metalkugle.

Kan Faradays kraftliniebegreb sidestilles med et æterbegreb?

Faraday mente ikke, at hans kraftlinieteori var en æterteori, selv om han ikke udtalte sig helt entydigt herom. Faraday ville ikke afvise eksistensen af en æter i forbindelse med opfattelse af kraftlinierne som "transportmiddel" for kraft, men mente blot, at den var unødvendig. Selve linierne transmitterer alle naturens kræfter og forbinder hver partikel med en hver anden, således dets indflydelsessfære er hele solsystemet. Derfor er der ikke behov for en æter. Om man kalder hans kraftfelt for en æter var snarere et spørgsmål om ord end om fysik [8 s.185+151].

Der er lighedspunkter mellem Faradays kraftliniebegreb og et æterbegreb, idet virkningen sker ved nærvirkning. Nærvirkningen sker dog ikke mellem æterpartikler, men mellem eller langs kraftlinier. Faraday opererede heller ikke med ætermodeller som eksempelvis Maxwell og Thomson gjorde (se afsnit 3.2 og kapitel 4).

Faraday forestillede sig ikke, at rummet er udfyldt af en æter bestående af æterpartikler, men snarere et hav af kraftlinier hvor igennem en virkning sker (muligvis kan man sammenligne hans kraftpunkter, som udfylder hele rummet, med æterpartikler). I følge sædvanlige æterteorier sker virkningen ved, at æterpartiklerne indbyrdes påvirker hinanden. Hos Faraday sker påvirkningen igennem kraftlinier som en vibration langs med eller evt. på tværs af dem. Virkninger i Faradays kraftlinieteori sker ved nærvirkning, og udbredelsen foregår med en endelig hastighed.

Alt i alt kan man med en vis rimelighed sige, at Faradays kraftliniebegreb på mange måder minder om et æterbegreb, skønt han ikke selv opererede med en æter. Denne diskussion er vel primært en splid om ord, som vi ikke ser nogen grund til forfølge. Som vi skal se i kapitel 4, fik Faradays kraftbegreb under alle omstændigheder stor betydning for Maxwells udvikling af sin ætermodel. Som nævnt indledningsvis var nogle af Thomsons teorier også vigtige for Maxwell, så lad os nu se på, hvad de gik ud på.

3.2 William Thomsons ætermodeller

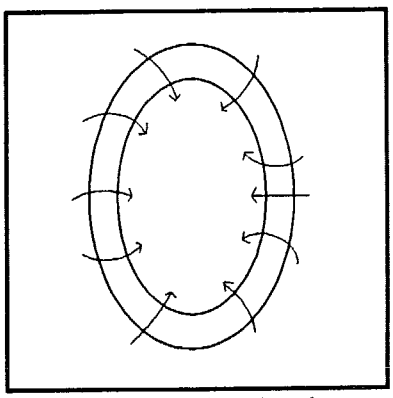
Thomson begyndte at beskæftige sig med æterteorier i ca. 1841 på baggrund af Faradays arbejde, som han ville formalisere ved hjælp af matematik [12 s.26]. Thomson beskæftigede sig med emnet, mere eller mindre intenst, frem til sin død i 1907 og udtalte på en international kongres i Paris i 1900, at han efter 50 års ihærdige forsøg på at forstå lysæteren og dens indvirkning på elektrisk- og magnetisk kraft ikke vidste mere om emnet, end han gjorde 50 år tidligere [24 s.211].

Trods denne udtalelse nåede han dog at fremkomme med nogle teorier, eller illustrationer som han foretrak at kalde dem, for magnetisme og elektricitet. Hans første serie af matematiske artikler om emnet udkom i 1842, hvor han viser, at de samme formler kan benyttes som love for væsketransport, varmetransport, elektriske og magnetiske fænomener og elasticitet [9 s.209]. En væske- eller varmekilde er analog med en elektrisk ladning, magnetpol eller en elektrisk strømkilde; strømlinier er analoge med kraftlinier; temperatur er analog med potentiale osv. [9 s.209]. Thomson pointerer, at disse analogier intet siger om den fysiske karakter.

Formålet med at lave en ætermodel var for Thomson at forklare de magnetisk kraftlinier som

en tilstand eller forandring i æteren [12 s.27]. Idéen med kraftlinier havde han hentet hos Faraday, der havde opdaget dem ved forsøg men jernfilspåner. I 1856 kom han med sit første bud på en ætermodel, som han havde udviklet ved at studere den magnetiske drejning af polarisationsplanen[1] [12 s.27]. Han havde hentet inspiration fra en celleteori som Rankine havde lavet for varme, og mente at æteren bestod af mikroskopiske celler/dele, der roterer med de magnetiske kraftlinier som akser.

I følge Whittaker [25 s.294] skulle det første forsøg på at lave en generel fysisk teori baseret på celler være fremført af Thomson i 1867 efter, at han hos sin ven P.G. Tait havde observeret, at røgringe preller af mod hinanden, når de nærmer sig hinanden. Atomernes gensidige påvirkning kunne altså illustreres med røgringes opførsel. Dette finder vi dog lidt besynderligt, da vi ikke har observeret at røgringe preller af mod hinanden.



Figur 5 Simpel hvirvel.

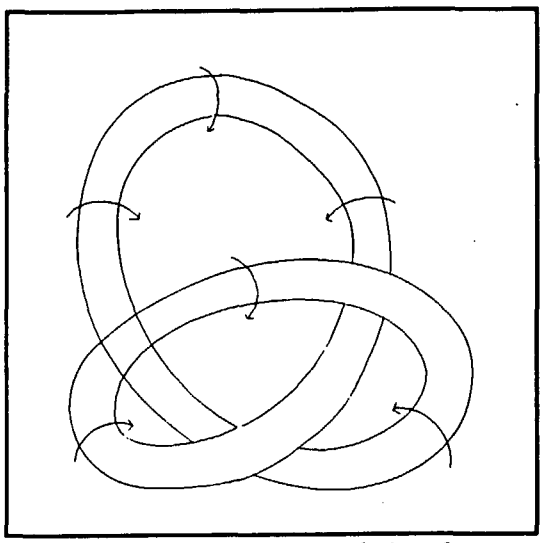
En anden og mere plausibel version af historien giver Goldman i [7 s.97], hvor Tait skulle have demonstreret fænomenet ved hjælp af dampringe, der blev gjort synlige ved hjælp af amoniumnitrat. En af de store fordele som Thomson så, var at disse hvirvler kunne vibrere men ikke gå i stykker, samt at de kan vibrere med mange forskellige egenfrekvenser; og det skal atomer kunne, fordi de udsender lys med mange forskellige frekvenser. Hvis man anser atomer for punkter, vil de ikke kunne sitre [7 s.98]. Egenskaberne ved en sådan hvirvel model blev undersøgt matematisk for første gang af von Helmholtz. Under antagelse af at væsken, som hvirvlerne bevæger sig i, er friktionsløs, usammentrykkelig og homogen, ville den have følgende egenskaber:

1) En hvirvel kan aldrig opstå eller forsvinde, dvs. at antallet af hvirvler er konstant.

2) Den roterende del af væsken, som udgør hvirvlerne, beholder deres form og er altid adskilt fra den ikke-roterende del af væsken.

3) Disse hvirvelbevægelser må bestå af endeløse tråde (ringe), og på alle dele af tråden må

[1] Faraday havde i 1845 opdaget at hvis man sender polariseret lys i gennem et kraftigt magnetfelt vil polarisationsplanen rotere [1 s.94].



Figur 6 Hvirvel med enkelt knude.

væsken rotere vinkelret på trådens akse.

4) En hvirvel opfører sig som en perfekt elastisk substans.

5) To hvirvler kan ikke krydse (gennemskære) hinanden, og en enkelt hvirvel kan ikke krydse sig selv.

Thomson byggede sin ætermodel ud fra disse egenskaber, og her i var atomet blot en hvirvel i materien. Man vidste, at der fandtes forskellige atomer, og derfor måtte der også findes forskellige typer hvirvler. Ud fra den femte egenskab foreslog Thomson, at en hvirvel ikke nødvendigvis burde være så simpel som på figur 5, men kunne også have en knude som på figur 6, og disse hvirvler ville til stadighed være uforanderlige på grund af at hvirvlerne var endeløse. Man kunne således kende forskel på atomerne ved at se på hvor mange knuder de havde [4 s.10].

Opsummering.

På baggrund af sit natursyn og sine eksperimenter, opdagede Faraday bl.a. elektromagnetisk rotation og elektromagnetisk induktion. Faraday kunne vise med sit forsøg for elektromagnetisk rotation, at kraften mellem en strømførende ledning og en magnet har rotationel karakter. Dette brugte Faraday som en afvisning af, at kraften mellem to strømførende ledningselementer er en centralkraft, som Ampère hævdede med sin kraftlov.

Det var efter opdagelsen af induktion, at Faraday indførte kraftliniebegrebet, som er, hvad vi i dag kalder feltlinier. Han fandt frem til, at induktion af en strøm i en ledning er afhængig af antallet af skårede kraftlinier per tid. Faraday mente, at han kunne afvise Coulombs lov, ved at vise at elektrostatiske kraftlinier er krumme. Kraftliniernes krumhed skulle være et argument imod fjernvirkning, som jo altid foregår i lige linier.

Faradays kraftlinieteori byggede bl.a. på Boscovichs tanker om spænding mellem legemer som

udspændte fjedre. Faraday beskriver, at der er en spænding langs med kraftlinierne og et pres imellem dem, som holder dem fra hinanden. Disse idéer kom, som vi skal se i næste kapitel, i høj grad til at påvirke Maxwell, da han skabte sin ætermodel.

Faraday fik også stor betydning for Thomson, som prøvede at forklare kraftlinier ved hjælp af en æterteori. I den forbindelse opstillede han i 1867 den første mekaniske ætermodel. Dette inspirerede også Maxwell i hans arbejde med at opstille en ætermodel. Modellen vil blive beskrevet i det følgende kapitel.

Kapitel 4. Maxwell og æteren.

En af Thomsons samtidige - James Clerk Maxwell (engelsk fysiker, 1831-1879) - var ligeledes inspireret af Faradays kraftliniebegreb. Han satte sig for, at lave en samlet teori for elektricitet og magnetisme. Midlet til dette var en mekanisk model af æteren, og det er denne model, der er emnet i dette kapitel.

4.1 Maxwells motivation.

Maxwell ville lave en samlet feltteori, der omfattede elektrostatik, elektrodynamik og magnetisme. Desuden ville han prøve at finde sammenhængen mellem lys og elektromagnetisme, da man havde fundet ud af, at lysets polarisationsplan kan ændres i magnetfelter. Æteren skulle være den samme for både lys og elektromagnetisme, da han ikke mente, der kunne eksistere to ætere [1 s.149]. Maxwell gik ud fra, at en samlet feltteori skulle opfylde alle de love inden for elektromagnetisme, man indtil da havde udledt, og den måtte desuden forklare de tilfælde, hvor disse love ikke kunne anvendes. En sådan teori skulle også hænge sammen med Newtons mekanik, som Maxwell på intet tidspunkt tvivlede på. Som vi så i afsnit 2.2 havde Weber også lavet en samlet teori for elektromagnetisme. Maxwell fandt af flere årsager ikke denne teori brugbar. Den byggede på fjernvirkning, hvilket Maxwell ikke var tilhænger af. Weber tillagde alle elektromagnetiske fænomener bevægelse af elektriske partikler, som vekselvirkede på afstand.

Maxwell var ikke bange for, at hans teori skulle blive en fiasko, for hvis teorien

> "..ikke er sand, kan den kun modbevises med eksperimenter, som vil forøge vores viden om denne del af fysikken betydeligt." [22 s.425 v.o.].

Ligegyldigt om teorien blev accepteret eller ej, ville den altså ifølge Maxwell selv bevæge os et skridt nærmere forståelsen af elektricitet og magnetisme.

I sine analogimodeller tog Maxwell sit udgangspunkt i Faradays arbejder. Faraday havde en ikke matematisk teori for kraftlinjer. Maxwell var også inspireret af Thomsons analogier mellem varme og elektricitet. Denne metode med analogier gav Maxwell en fleksibilitet i sine undersøgelser. Det ansporede ham til at opstille modeller, som han ikke selv fandt virkelige (dvs. at han ikke mente, at æteren i virkeligheden bestod af mekaniske systemer). Imidlertid gav de ham matematiske systemer, som var oplysende, når han prøvede at anvende dem på de fænomener, han undersøgte [1 s.142]. Fordelen ved brug af analogier er nemlig, at selv

undersøgelser af teorier, som man anser for forkerte, kan give en bedre idé om, hvad sandheden er. Analogimodeller udmærker sig netop ved at være overskuelige og forholdsvis let forståelige, da de hovedsagelig bygger på mekanik. Denne metode blev også anbefalet af Faraday [1 s.142]. Ud fra disse analogier "konstruerede" Maxwell modeller, der kan beskrives med mekaniske love. Dermed er de ikke i modstrid med Newtons mekanik. Dette gjorde han for at undersøge modellerne således, at han lettere kunne finde en matematisk beskrivelse.

Den første model, Maxwell opstillede, var en for Faradays kraftlinjer. Maxwell forestillede sig elektrisk kraft som en perfekt væske[1], der bevæger sig i nogle små rør. Disse rør svarer til Faradays kraftlinjer. Positiv ladning skal være en kilde, hvorfra væsken kommer, og negativ ladning er et afløb, som væsken forsvinder i. Det må være indrettet således, at kilden producerer netop så meget væske, som afløbet leder ud. Den negative og den positive ladning skal altså altid være lige store. Problemet med denne teori var, at denne væske skal opstå et sted og forsvinde et andet sted. Men Maxwell mente, at det ikke betød noget, så længe man holdt sig til, at det blot var en matematisk model.

Maxwell var også inspireret af Thomsons tanker om at lave en mekanisk analogimodel, som skulle kunne forklare alle kendte elektriske og magnetiske fænomener ved nærvirkning. Maxwell skriver selv:

> "Ved at påpege de mekaniske konsekvenser af en sådan hypotese[2] håber jeg, at være til gavn for dem, som anser fænomenet som følge af virkning via et medium, men som tvivler på sammenhængen mellem denne hypotese og allerede eksperimentelt påviste love, som fortrinsvis har været forklaret ved hjælp af andre hypoteser [fjernvirkning]" [22 s.425 v.o.].

Et af Maxwells mål var altså at styrke nærvirkningstilhængernes tro på rigtigheden af deres teorier. Teorien ville han lave ud fra en ætermodel, hvilket vil sige en model for alle elektromagnetiske fænomener i rummet. Ud fra denne ville han så lave en matematisk model.

---

[1] En perfekt væske har sejheden 0 (uendelig letflydende) og er usammentrykkelig.

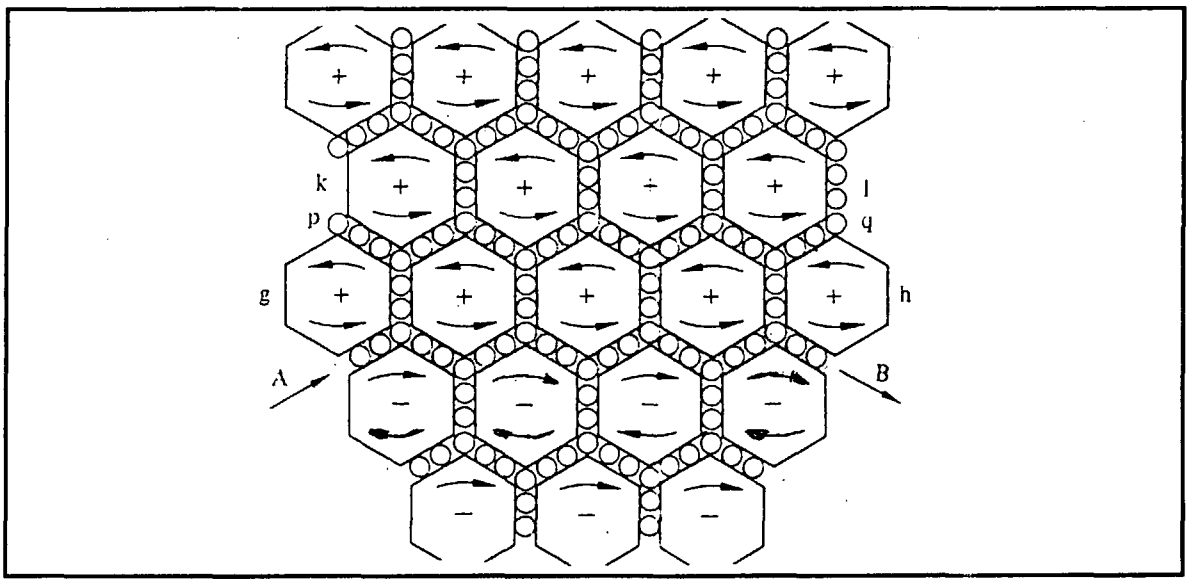
[2] Hypotesen er, at man ved at undersøge en mekanisk model, kan blive i stand til at forklare elektriske og magnetiske fænomener.

4.2 Maxwells ætermodel

I det følgende vil vi beskrive Maxwells ætermodel, samt forklare, ved hjælp af nogle eksempler, hvordan den virkede. Dette afsnit er hovedsageligt skrevet på baggrund af Berkson [1]. Maxwell publicerede sin elektromagnetiske teori, som var udledt ved hjælp af ætermodellen, i skriftet "On Physical Lines of Forces" i 1861.

Præsentation af modellen.

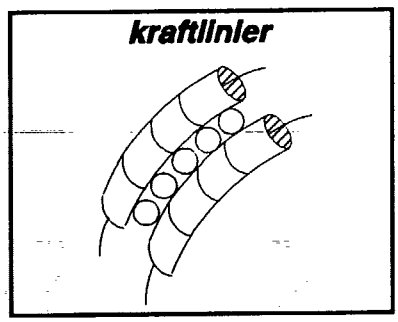
Ifølge Maxwells model tænkes æteren at bestå af hvirvler og kugler (mindre end stofmolekyler), som var ordnet i et bestemt mønster, som vist på figur 1 herunder.



Figur 1 Maxwells model af æteren [1].

Sekskanterne kaldte han hvirvler, og imellem disse er kuglerne. Hvirvlerne, som tænkes at være cylindre (se figur 2), kan kun rotere om deres egne akser (disse skal på figur 1 tænkes vinkelret på papiret). Når dette sker, vil de udvide sig vinkelret på omdrejningsaksen og

trække sig sammen i aksens retning[3] (Faraday havde gjort sig lignende tanker i forbindelse med sit kraftliniebegreb). Hvirvlernes akser i modellen kan sammenlignes med feltlinier. Kuglerne kan både rotere om deres egne akser og bevæge sig frem eller tilbage mellem hvirvlerne. Kuglerne er også elastiske og kan, hvis de påvirkes af en kraft, deformeres. Æteren er så fin, at den gennemtrænger alt. En konsekvens af dette er, at den ikke kan måles på nogen måde. Men den er altså i luften og i alt stof.



Figur 2 Hvirvlerne tænkes at være cylindre.

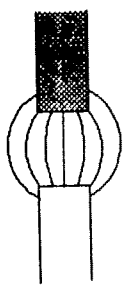
Modellen er en videreudvikling af en model William Thomson havde opstillet tidligere. Den største forskel på Thomsons og Maxwells modeller er, at Maxwell indførte de små kugler mellem hvirvlerne. Grunden til, at han gjorde dette, var, at han på denne måde kunne få alle hvirvlerne til at rotere samme vej på én gang. I øvrigt tænkte Maxwell ikke på hvirvlerne som sekskanter, men som større kugler. Han tegnede dem kun som sekskanter, fordi de små kugler på denne måde passede mere præcist mellem dem (se figur 3). Maxwell troede ikke selv på at æteren så sådan ud, men han lavede modellen, fordi han bedst kunne forstå en teori, når han kunne forestille sig den mekanisk som denne model var [7]. Men det var ikke mekanik Maxwell ønskede at opstille en teori for, men elektromagnetisme. Derfor svarede der til enhver mekanisk egenskab en elektromagnetisk størrelse.

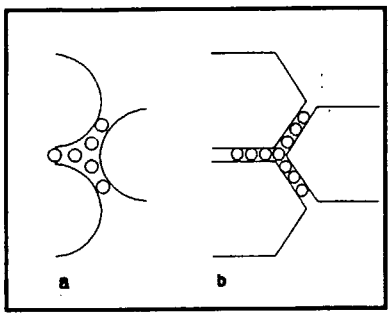
Modellens analogier.

I modellen repræsenterer de små kugler elektricitet og hvirvlerne magnetisme. Tager man et tværsnit af en leder, da repræsenterer antallet af kugler, der passerer dette tværsnit per sekund, strømtætheden. Strømtætheden betegnes med et j, vi vil i dag sige, at strømtætheden er den samlede ladning, der passerer per areal per tidsenhed (den har SI-enheden $Cs^{-1}m^{-2}$ =

3

Dette kan forklare, at modsatte magnetpoler tiltrækker hinanden, og at feltlinierne er buede (se figuren). Man skal forestille sig hvirvler med akser parallelt med feltlinierne. På grund af udvidelsen på tværs af akserne vil hvirvlerne skubbe til nabohvirvlerne, hvorved feltlinierne bliver buede. Ligeledes vil hvirvlerne trække sig sammen i aksernes retning, og derved trække polerne mod hinanden.





Figur 3 Kuglerne mellem runde a) og sekskantede b) hvirvler.

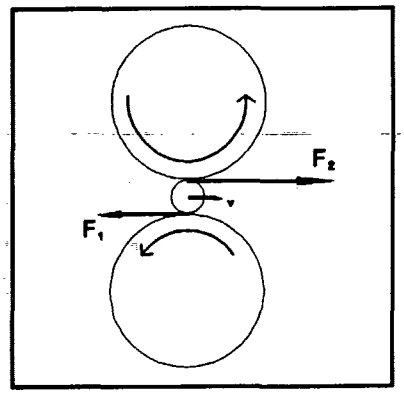
Am^{-2}). Når kuglerne bevæger sig mellem hvirvlerne, vil disse begynde at rotere om deres egne akser. Dette betyder, at når der løber en strøm, vil der skabes et magnetisk felt. Når kuglerne bevæger sig mellem hvirvlerne, vil sidstnævnte roterer. Samtidig vil de udvide sig vinkelret på rotationsaksen. Man kan så måle hvirvlernes overfladehastighed, som vil repræsenterer det magnetiske felt (**H**)[4] (SI-enheden er $Cm^{-1}s^{-1}$ = Am^{-1}). Hvirvlernes gennemsnitlige massefylde er et mål for et stofs gennemtrængelighed for et magnetisk felt. Dette kaldes magnetisk permeabilitet, og betegnes μ. I vakuum kaldes magnetisk permeabilitet μ_0 og har værdien $4\pi \cdot 10^{-7}$, (SI-enheden er m^2kgC^2 = Hm^{-1}). Sammenhængen mellem **H**-feltet og **B**-feltet er givet ved relationen $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$ (**B**-feltet har Si-enheden $kgs^{-1}C^{-1}$ = T). Hvirvlernes kinetiske energi repræsenterer det magnetiske felts energi.

Den elektromotoriske kraft (emk), som induceres i en leder betegnes med **E**. Emk har her en anden betydning, end vi i dag bruger. Her er det den kraft, der får kuglerne til bevæge sig, og derfor kan **E** bedst sammenlignes med det elektriske felt (SI-enheden for **E** er Vm^{-1}). Den elektromotoriske kraft forklares i modellen på følgende måde. Når styrken af et magnetisk felt ændres, vil to nabohvirvler rotere med forskellig hastighed. Dermed påvirkes den mellemliggende kugle af en kraft, som virker tangentielt, som vist på figur 4. Det er denne kraft, der er et mål for den elektromotoriske kraft som følge af induktion. Fænomenet induktion vil blive forklaret mere indgående senere i dette afsnit.

Hvis de små kugler sidder i et dielektrikum (et dielektrikum vil typisk være en isolator), vil de ikke kunne flytte sig (fordi der jo ikke kan løbe en strøm i en isolator). Når der opstår en hastighedsforskel mellem to hvirvler, vil hvirvlerne, hvis de sidder i et dielektrikum, deformeres (se figur 5). Dette kaldes forskydningsstrøm (**D**), og i dag vil vi sige, at denne strøm forårsages af, at stoffet polariseres (stoffets molekyler ordner sig således, at deres positive ende vender samme vej). Men forskydningsstrømmen blev i den mekaniske model altså forklaret ved en deformation af kuglerne (elektrisk forskydning har SI-enheden Cm^{-2}). Forskydningsstrømmen vil blive forklaret senere i dette kapitel. Maxwell mente at den totale forskydning var proportional med den kraft (**E**), der virker på kuglerne: $\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$, den mekaniske pro-

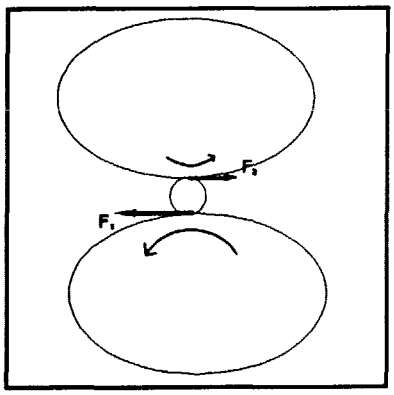
[4] Når en størrelse er skrevet med **fed** betyder det, at det er en vektor (**D**) eller et vektorfelt (**H** og **E**).

portionalitetskonstant ε svarer i elektrodynamikken til dielektricitets-konstanten (og har SI-enheden $C^2s^2m^{-3}kg^{-1}$), mens den i Maxwells model svarer til en elasticitets-konstant. Energien af det elektriske felt kan sammenlignes med de deformerede partiklers elastiske energi. Denne energi er lig det arbejde, der er udført for at deformere kuglerne. Dette arbejde er lig kraften gange forskydningen (deformationen), og således proportionalt med **E**·**D**, og da **D** = ε·**E** er arbejdet også proportionalt med ε·$\mathbf{E}^2$.



Figur 4 Kraften virker tangentielt.

Modellen er også i stand til at forklare begrebet ladning. Kuglerne (som jo er elektriske partikler) vil udøve et tryk på hinanden. Dette tryk svarer til elektrisk potential (V) (SI-enheden for dette er volt). En forskel i trykket på hver sin side af en elektrisk partikel er ophav til den del af den elektromotoriske kraft, der skyldes statisk elektricitet. I et ladet legeme vil dets elektriske partikler udøve et tryk på det omgivende dielektrikum. Man kan tænke sig, at når et ladet legeme bringes i kontakt med en leder, vil de elektriske kugler begynde at bevæge sig i lederen som følge af det tryk, dielektrikummets kugler udøver på dette. Det er værd at bemærke, at Maxwell ikke taler om ladning i forbindelse med strøm, men kun i forbindelse med statisk elektricitet (ladede legemer). For ham er en elektrisk strøm altså ikke bevægelse af ladninger, som det er for f.eks Weber, som beskrevet i afsnit 2.2.



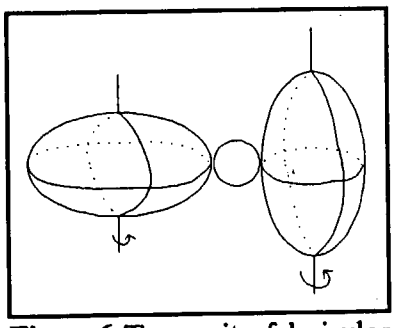
Figur 5 Deformation af hvirvler.

Elektromagnetisk induktion.

Men lad os prøve og se, hvordan et par konkrete elektromagnetiske fænomener forklares ved hjælp af modellen. Vi vil først se på elektromagnetisk induktion. Når man ændrer et magnetfelt omkring en leder, vil der induceres en strøm i denne. Det forklarer Maxwell på følgende måde: Vi skal antage, at vi har to ledere, hvori der kun i den ene løber en strøm. Dette betyder, at de små kugler i den strømførende leder bevæger sig fra A til B (se figur 1). Derved gnider de mod de omkringliggende magnetiske hvirvler, som igen gnider mod det næste lag

kugler (som kun roterer men ikke bevæger sig, da det, der omgiver lederen er et dielektrikum). Sådan fortsætter det videre ud i lagene. Kuglerne i den anden ikke strømførende leder vil også rotere, men ikke flytte sig, da hvirvlerne på hver side af en kugle vil roterer med samme hastighed. Nu tænker vi os, at vi mindsker strømmen i den strømførende leder. Dette betyder, at kuglerne løber langsommere mod B, og dermed vil nabohvirvlerne rotere langsommere. Der opstår således en hastighedsforskel mellem hvirvlerne nærmest lederen AB og den næste række hvirvler osv. I de rækker af elektriske kugler, som er i et dielektrikum, vil kuglerne på grund af hastighedsforskellen ikke flytte sig, men vil blive deformerede. Derved vil de påvirke de næste lag af hvirvler (som vil bremses), og på denne måde vil hastighedsforskellen forplante sig væk fra lederen, og samtidig aftage. Når denne "bølge" når til pq vil kuglerne i denne leder begynde at bevæge sig fra q mod p, hvilket betyder, der er induceret en strøm i lederen.

Induktion kan også ske ved, at en leder flyttes i et statisk magnetfelt. Denne situation beskæftigede Maxwell sig også med. Han forestillede sig, at når man bevæger en leder på tværs af de magnetiske hvirvler, vil hvirvlerne foran blive trukket ud, mens hvirvlerne bagved vil blive trykket sammen, som det er vist på figur 6. Han havde beregnet, at når de bliver trukket ud, vil deres hastighed forøges, ligesom den vil aftage, når de bliver trykket sammen. Hvis en leder bevæges sidelæns og vinkelret på hvirvlernes akser, dette svarer til, at lederen AB på figur 1 bliver flyttet op eller ned, vil der opstå en forskel i rotationshastigheden mellem hvirvlerne på hver side af kuglerne. På grund af denne hastighedsforskel vil de elektriske partikler begynde at vandre i lederen, og der er således induceret en strøm. Maxwell viste, at $\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mu\mathbf{H}$, hvor $\mathbf{v}$ er den hastighed, hvormed lederen bevæges.



Figur 6 Tværsnit af hvirvler foran og bagved en leder i bevægelse mod højre.

Kraften på en ladet partikel.

Maxwell havde som nævnt forudsat, inden han gik i gang med modellen, at den skulle indeholde allerede kendte teorier. I dette eksempel vil vi se på, hvordan han udledte Coulombs lov ved hjælp af modellen. Han betragtede to elektriske ladede legemer, e_1 og e_2, som bevæger sig meget langsomt mod hinanden. Derved vil det magnetiske felt, de skaber, være forsvin-

dende lille. I denne situation skal man kun tage energien fra det elektriske felt i betragtning. Det arbejde, som det elektriske felt udfører på ladningerne, svarer til kraften **E**, som flytter ladningen, gange den strækning ladningen er flyttet. Han kunne da vise, at

$$F = K \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}$$

hvor der gælder:

$$K = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}, \qquad \varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$$

Vi kan nu skrive formlen om, så den lyder:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{e_1 \cdot e_2}{r^2}$$

Da e er udtryk for ladningen er ovenstående formel netop Coulombs lov, som den er beskrevet i kapitel 2 (side 25). Dette er et eksempel på, hvordan Maxwell kunne få sin model til at passe med de allerede kendte teorier, som forklarede tiltrækning- og frastødningskræfter med fjernvirkning. Maxwell havde imidlertid nu udledt de samme relationer på baggrund af nærvirkning.

Maxwell opstillede altså en model for æteren, hvori der til ethvert elektromagnetisk fænomen svarede et mekanisk. Han havde antaget, at ætermekanismen skulle følge Newtons bevægelseslove, og derefter gik han så i gang med at opstille nogle matematiske sammenhænge for elektricitet og magnetisme. Vi vil nu se på, hvad det var han nåede frem til.

4.3 Maxwells ligninger på integralform.

I det forrige afsnit så vi, hvordan Maxwell opstillede sin analogimodel med hvilken han kunne beskrive ethvert elektrisk og magnetisk fænomen. Endvidere så vi, at han kunne udlede Coulombs lov ud fra modellen. Maxwell lavede nogle meget omfattende og omhyggelige beregninger, og resultatet af anstrengelserne blev de fire ligninger, som vi i dag kalder Maxwell ligninger. En totaludledning af Maxwells ligninger fra den mekaniske ætermodel er meget svær og vil derfor være for omfattende i dette projekt. I stedet vil vi præsentere de maxwellske ligninger, som de ser ud i dag samt forklare deres betydning.

De maxwellske ligninger kan både skrives på differentialform og på integralform. Vi vil beskrive dem i den sidstnævnte form, da differentialformen omfatter vektoroperatorerne divergens og rotation, hvilket også vil være for omfattende at komme ind på her.

Her er Maxwells fire ligninger:

1) $\oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{A} = \frac{Q}{\varepsilon_o}$ Gauss lov for elektricitet.

2) $\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{A} = 0$ Gauss lov for magnetisme.

3) $\oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ Faraday–Henrys lov.

4) $\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_o I + \mu_o \varepsilon_o \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$ Maxwell–Ampères lov.

$\oint$–tegnet sammen med dA betyder at integralet er et lukket overfladeintegrale, dvs. at der integreres over hele overfladen, som omslutter et volumen. Kombineres det lukkede integral–tegn med dl, betyder det, at der er tale om et lukket linieintegrale.

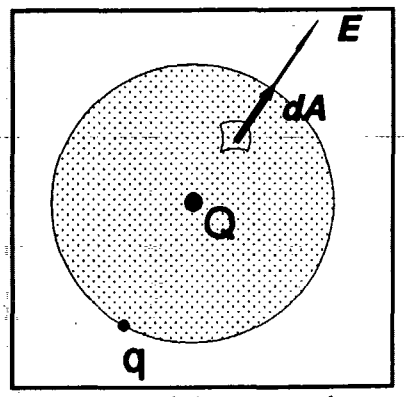
I det følgende vil vi forklare Maxwells 4 ligninger lidt nærmere. Vi vil gennemgå, i hvilke tilfælde, de gælder og hvad de betyder.

1. Gauss lov for elektricitet.

Denne lov siger, at den samlede elektriske fluks gennem en lukket flade er proportional med ladningsmængden, som fladen omslutter. Hvis der ikke er ladninger inden for den lukkede flade er fluksen gennem den lukkede flade nul. Dette gælder også hvis der findes ladninger uden for den lukkede flade, fordi den indgående fluks er lig den udgående. Gauss lov for elektricitet er fundamental inden for elektrostatikken. Coulombs lov kan ses som en konse–kvens af Gauss lov. Disse to love er ækvivalente inden for elektrostatikken.

Udledning af Coulombs lov fra Gauss'.

Hvis man ser på en symmetrisk kugleoverflade, hvor ladningen (Q) er i centrum, kan man hurtigt udlede sammenhængen mellem Gauss lov for elektricitet og Coulombs lov. Da kuglen er symmetrisk falder **E**-vektoren sammen med d**A**, hvilket vil sige at vinklen imellem vektorerne er nul. Derfor er cosinus til vinklen 1 og



Figur 7 Ladninger omsluttet af en lukket overflade.

$$\oint \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{A} = \oint E \cos\theta \, dA = E \oint dA$$

og da den lukkede overflade omkring ladningen simpelthen er $4\pi r^2$, kan vi indsætte dette i stedet for $\oint dA$, så vi får

$$E(4\pi r^2) = \frac{Q}{\varepsilon_o} \quad \textit{som kan skrives således} \quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{Q}{r^2}$$

hvilket er det elektriske felt, som udgår fra Q. Hvis vi ganger dette felt med en ladning (q), der er placeret på kuglens overflade, får vi Coulombs lov, da den elektriske kraft som bekendt er F = qE,

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{Qq}{r^2}$$

2. Gauss lov for magnetisme.

Denne lov siger, at den samlede magnetiske fluks gennem en lukket flade er nul. Dvs. at den indgående magnetiske fluks er lig den udgående. Denne lov siger også, at der ikke eksisterer magnetiske monopoler dvs. at magnetiske nord- eller sydpoler ikke kan eksistere alene.

3. Faraday–Henrys lov.

Denne lov siger, at der bliver induceret et elektrisk felt omkring et ledningsstykke, når det bevæges i et magnetfelt, eller når der sker ændringer af det magnetiske felt (dvs. enten en ændring af dets styrke eller retning).

4. Maxwell–Ampères lov.

Denne lov siger, at der bliver dannet et magnetisk felt, enten ved at der går en konstant elektrisk strøm i en ledning, eller ved at det elektriske felt ændres. Denne lov er en modificering af Ampères lov:

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_o I$$

Ampères lov gælder kun for tidsuafhængige felter. Når der er tale om tidsafhængige felter skal ledet

$$\mu_o \varepsilon_o \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

tilføjes, hvor

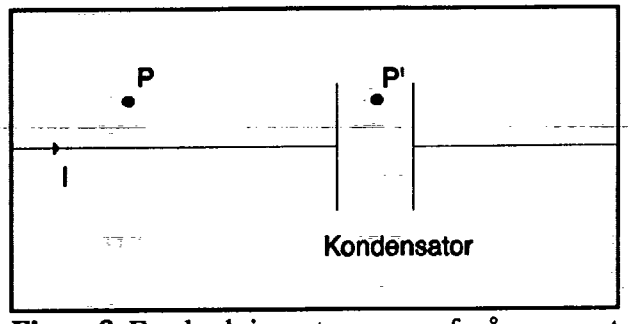
$$\varepsilon_o \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

er forskydningsstrømmen, I_D. Vi kan altså skrive ligningen på følgende vis:

$$\oint \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{l} = \mu_o(I+I_D)$$

Vi vil med følgende eksempel demonstrere forskydningsstrøm. Lad os forestille os en lige leder forbundet med en kondensator. Vi oplader kondensatoren med en konstant strøm ved en løbende øgning af den elektrisk spænding. Man kan i et givet punkt (P) måle en magnetisk feltstyrke. I et andet punkt (P)' imellem kondensatorpladerne og med den samme afstand fra ledningen som P, kan man måle en magnetisk feltstyrke med samme størrelse som i P. Dette er i strid med Ampères lov, da der ikke går en strøm mellem kondensatorpladerne, hvorfor den magnetiske feltstyrke i P' burde være mindre end i P. Magnetfeltet i P' kan forklares som værende et resultat af forskydningsstrømmen, I_D. Forskydningsstrømmen kan betragtes som

bestående af to dele. Den ene kan forklares som en forskydning af ladningerne inden for molekylerne i et dielektrikummet mellem kondensatorpladerne (isolerende materiale, evt. luft), der kan betragtes som en slags elektrisk ladningsstrøm. Den anden kan forklares som en tidslig ændring af **E**-feltet mellem kondensatorpladerne. Dette kan dog ikke betragtes som en elektrisk ladningsstrøm. Både ændringen i **E**-feltet og den molekylære forskydningsstrøm bidrager begge til dannelse af et magnetfelt. En ændring af **E**-feltet, som jo sker ved opladningen af kondensatoren (samt ved afladningen), inducerer et magnetfelt.



Figur 8 Forskydningsstrømmen forårsager et magnetfelt i P'.

Faraday-Henrys lov og det sidste led i Maxwell-Ampères lov forklarer elektromagnetisk bølger. Hvis der sker en ændring af **B**-feltet i tiden, vil der blive induceret et **E**-felt (se ligning 3), som også ændrer sig i tiden. Som vi kan se med det sidste led i ligning 4, forårsager en ændring i **E**-feltet et **B**-felt, osv. Denne skiftevis dannelse af elektrisk og magnetiske felter foregår ud i rummet med en udbredelseshastighed som er lysets, hvilket er naturligt, da lys jo er elektromagnetiske bølger.

Opsummering.

Selvom det var Maxwell, der opstillede ætermodellen og udledte de fire ligninger, er hverken Faraday eller Thomson uden betydning. Det var disse to, som havde dannet det fundament, Maxwell byggede videre på. Faraday opererede med en spænding langs kraftlinier (og et pres imellem), og dette tog Maxwell med i sin model, hvor spændingen er det, der får en strøm til at løbe. Fra Thomson havde han idéen om æteren som roterende hvirvler. Maxwell udbyggede og forbedrede denne model ved at tilføje de elektriske kugler.

Maxwells model havde mange fordele, hvilket nok bedst understreges af, at den førte til en samlet teori for elektromagnetismen. På Maxwells tid var det som nævnt mekanikken, man havde mest styr på inden for fysikken. Derfor var det ikke tilfældigt, at han kastede sig over mekanikken, da han satte sig for at forene alle de teorier, der var inden for magnetisme og elektricitet (især brugte han sit kendskab til elasticitetslæren, da han bygge modellen). Om

disse teorier kan man sige, at de ikke hang sammen, men kun sagde noget om sammenhænge i enkelte delområder. Eksempler på dette er Coulombs lov, Ampères kraftlov, Faradays induktionslov etc. Alle sammen love, der siger noget om sammenhænge i delområder af elektricitets- og magnetismelæren. De var typisk udledt efter en række eksperimentelle målinger. Maxwell derimod opstillede en mekanisk model for det tomme rum. Med de mekaniske love som ballast gav han sig til at regne på modellen. Da han var færdig med det, havde han fire ligninger, som kunne beskrive alle kendte fænomener. Da han opstillede modellen, forudsatte han, at den skulle kunne forklare de førnævnte lovmæssigheder, og det viste sig, at de alle er gemt i Maxwells fire ligninger. Det interessante ved denne historie er, at Maxwell ikke selv lavede nogen forsøg og målinger; men blot tog udgangspunkt i noget kendt, som han bag skrivebordet fik samlet til en samlet teori. Webers model kunne imidlertid også bruges til at samle de førnævnte delområder i én samlet teori, så på dette punkt var hans teori lige så god som Maxwells.

Maxwell bidrog med det sidste led til den 4. ligning, hvilket han simpelthen tilføjede, fordi den mekaniske model "krævede" det. Det betyder, at han "forudså" de elektromagnetiske bølger ved at analysere modellen. Med det i baghovedet må man sige, at det var en virkelig stærk model, han havde opstillet. Ikke alene var den i stand til at beskrive alle kendte elektromagnetiske fænomener, den var også i stand til at forudse nye, som endnu ikke var observerede [12 s.29].

Selvom modellen er genial, har vi alligevel stødt på ting, som vi har haft svært ved at forstå, og hvor vi har måtte sige til os selv, at her er der noget, der halter. Vi vil kort trække nogle af de ting frem.

Man kan have svært ved at forestille sig, hvordan modellen ser ud i den tredje dimension. Maxwells egen tegning (se figur 1) er kun i to dimensioner og siger således ikke noget om, hvordan man skal forestille sig hvirvlerne i rummet. I Goldmans bog [7] beskrives de som spheres (kugler).

Da vi præsenterede modellen, skrev vi, at hvirvlerne og de elektriske partikler er meget mindre end stofmolekyler. Når Maxwell forklarede, hvordan strømmen løber i en leder, placere han lederen i en enkelt række af de elektriske partikler (se figur 1). Man kan synes, at dette er lidt mystisk, da man skulle tro, at den skulle indeholde flere rækker elektriske partikler. Hvis dette skulle være tilfældet, opstår der imidlertid et problem, idet kuglerne i to på hinanden efter-

følgende rækker i så fald ville løbe hver sin vej. På denne måde ville nettostrømmen være nul. Hvis en leder kun skulle indeholde en række kugler, ville dette betyde, at hvirvler og kugler skal kunne ændre størrelse med lederen.

Da Maxwell opstillede sin ætermodel, var han måske klar over, at den havde de førnævnte "svagheder". Måske så han blot bort fra dem, fordi hans intuition fortalte ham, at disse uklarheder ikke havde nogen betydning for hans udledninger. Var han heldig, eller var han smart?

Kapitel 5. Æteren efter Maxwell.

Æteren (i form af en mekanisk model) havde hjulpet Maxwell til at opstille sine ligninger. Man kunne så forestille sig, at man bare gik væk fra den igen, nu hvor man ikke havde mere at bruge den til. Men spekulationerne om æteren sluttede ikke. Et vigtigt spørgsmål var stadigvæk: eksisterer æteren, eller gør den ikke? I dette kapitel vil vi følge hovedlinierne i denne diskussion for at se, hvor den foreløbig er endt. Den første vigtige begivenhed var en sejr for nærvirkningstilhængerne og skyldtes tyskeren Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894). Dernæst vil vi se på Lorentz' problemer i forbindelse med beskrivelsen af påvirkninger mellem æter og stof, samt Michelson og Morleys forsøg, der skulle afgøre, hvorledes disse bevæger sig i forhold til hinanden. Kapitlet afsluttes med en gennemgang af Einsteins begrundelse for definitivt at opgive idéen om en mekanisk æter.

5.1 Heinrich Hertz.

Hertz var med nogle af sine forsøg med til at give ætertilhængerne tro på rigtigheden af deres teorier. Hertz udførte nemlig en række forsøg, hvor han påviste eksistensen af elektromagnetiske bølger. Hvad disse forsøg gik ud på, og hvorfor de var så vigtige for ætertilhængerne, vil blive hovedbestanddelen i dette afsnit. Endvidere vil vi også kort behandle Hertz' opfattelse af æteren. Men vi vil starte med at se på hans videnskabelige baggrund.

Hertz' videnskabelige baggrund.

Hertz fik sin videnskabelige uddannelse i Tyskland på det prøjsiske videnskabernes akademi i Berlin. Lederen af dette fra 1888–1894 var professor Hermann von Helmholtz, som på denne måde blev en af de vigtigste inspirationskilder for Hertz. En af hovedinteresserne på akademiet var forskningen i elektrodynamik, og der blev således udskrevet en række prisopgaver inden for dette emne, hvilket var medvirkende til at sætte Hertz i gang med det videnskabelige arbejde. Tyskernes udgangspunkt var, som beskrevet i kapitel 2, et andet end de engelske videnskabsmænds, med Maxwell i spidsen. Hertz startede altså med at være tilhænger af tyskernes fjernvirkningsteori. Et nærmere studie af Maxwells arbejder gjorde imidlertid, at han efterhånden mere og mere støttede dennes nærvirkningsteorier, med æteren som det medium, der formidler kræfter. Hertz troede ikke på Maxwells begrebsapparat, men benyttede i stedet i sine udregninger sin lærer Helmholtz' [13 s.29]. Maxwell døde i 1879, og da det først var

efter dette år, at Hertz for alvor kom i gang med sin forskning, nåede han aldrig at have nogen kontakt med Maxwell selv. Men Maxwells teorier, samlet i de fire ligninger, blev efter hans død ført videre af en række britiske videnskabsmænd, og det var med dem, Hertz havde en del korrespondance. De omfattede bl.a. George Francis FitzGerald (1851–1901) og Oliver Heaviside (1850–1925). Vi vil i det følgende afsnit se på, hvilke diskussioner Hertz førte om æterspørgsmålet.

Æterdiskussioner.

Efter Maxwell var det store spørgsmål ikke længere at opstille en analogimodel af æteren. En af grundene til dette giver Oliver Heaviside i 1889 i et brev til Hertz:

> "...angående strukturen af æteren selv, er det et meget vanskeligere spørgsmål, og det kan aldrig, sådan forekommer det mig, besvares andet end spekulativt.
> Min erfaring med såkaldte "modeller" er, at de er sværere at forstå, end bevægelsesligningerne." [19 s.74 v.o.].

Men det betød ikke, at man ikke beskæftigede sig med æterens egenskaber. Som vi vil se i det næste afsnit om Lorentz og Michelson–Morley, var et af de varme emner spørgsmålet om æterens bevægelse. Dette behandler Heaviside også i brevet til Hertz. Han skriver:

> "Så er der spørgsmålet om bevægelse af æteren. Bevæger den sig, når legemer[1] bevæger sig gennem den, eller forbliver den i hvile? Vi ved, der er en æter; spørgsmålet er derfor et legitimt fysisk spørgsmål, som må besvares. Jeg håber udbygningen af dine undersøgelser vil give materiale til et svar" [19 s.73–74 v.o.].

Problemet optog også Hertz, men det synes ikke som om, at hans forsøg umiddelbart gav ham de svar, som Heaviside gerne ville have. I hvert tilfælde lyder Hertz' svar til denne:

> "Jeg håber på mange nye resultater fra eksperimenterne... Bevægelsen af æteren i forhold til stof – dette er i sandhed et stort mysterium. Jeg har tit tænkt over det, men er ikke kommet en tomme længere. Jeg håber på

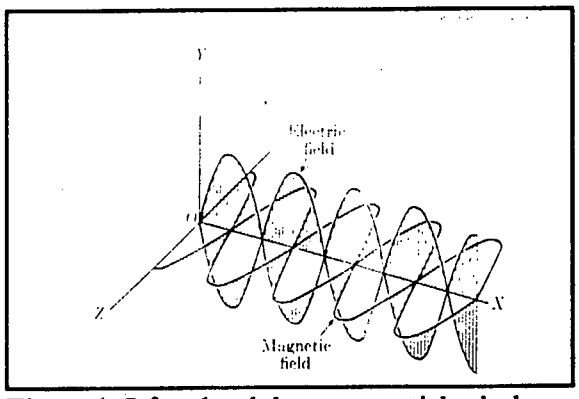
[1] Legeme skal vist nok her forstås temmelig bredt

eksperimentel hjælp; alt hvad der hidtil er blevet gjort har givet negative resultater." [19 s.74–75 v.o.].

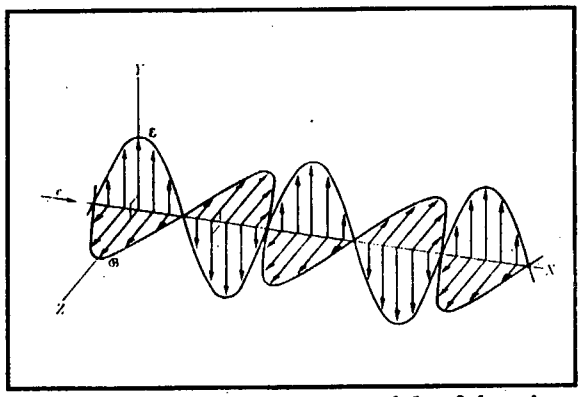
Netop spørgsmålet om den bevægede æter skulle senere være det, som var medvirkende til at aflive idéen om æteren. Dette vil vi beskrive senere, og i stedet vil vi nu vende os mod Hertz' eksperimentelle arbejde.

Hertz' eksperimenter.

Som nævnt i indledningen til dette afsnit havde Hertz' eksperimenter stor betydning for ætertilhængerne. Derfor vil vi i dette afsnit se på hvilke forsøg, han lavede. Vi vil koncentrere os om det afgørende forsøg og se bort fra de forsøg, der ledte ham frem til det. Dette mener vi godt, vi kan tillade os, da det ikke er forsøgene i sig selv, der i denne sammenhæng er interessante, men resultaterne af dem.



Figur 1 Stående elektromagnetiske bølger.

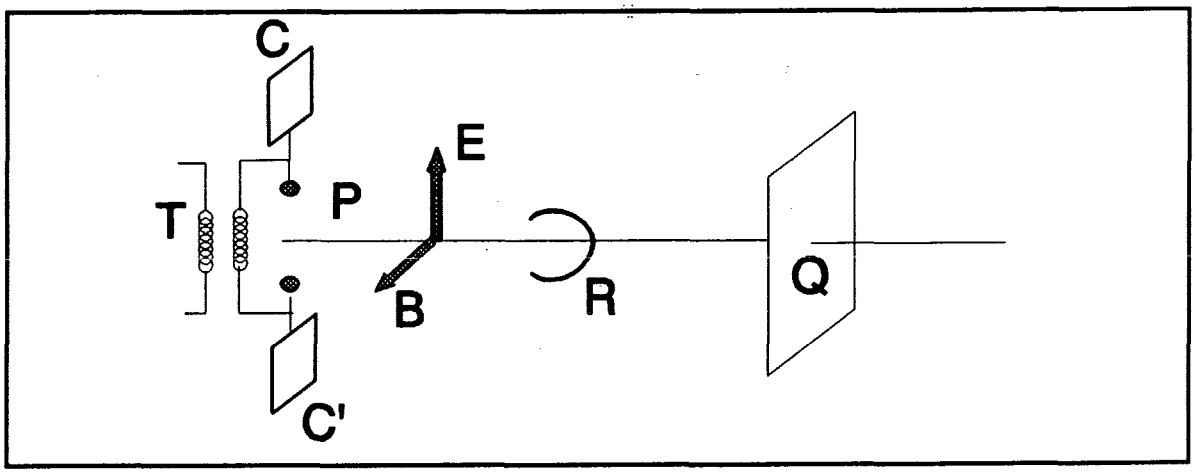


Figur 2 Elektriske og magnetiske felter i en harmonisk elektromagnetisk bølge.

Figur 3 herunder er en skematisk tegning af Hertz opstilling. Ved hjælp af transformatoren T oplades de to plader C og C'. Når pladerne afledes gennem gabet P, vil der udsendes elektromagnetisk stråling (der skabes et elektromagnetisk felt som følge af bevægelse af elektrisk ladning). På figuren er vist retningerne af hhv. det magnetiske og det elektriske felt (benævnt med hhv. **B** og **E**). Hertz kunne observere bølgerne ved hjælp af en såkaldte resonator (R). En sådan består af en kort ledning, som er bukket rund, men med et lille gab. Når den placeres vinkelret på et magnetisk felt, vil det varierende magnetiske felt inducere en emk i resonatoren, hvilket vil resultere i, at der springer en gnist i gabet. Placeres den derimod parallelt med det magnetiske felt, vil der ikke induceres nogen emk (og følgelig springer der

ingen gnist).

Hertz ønskede at producere stående elektromagnetiske bølger (se figur 1). Derfor placerede han en reflekterende overflade i Q, hvorved de udsendte bølger ville reflekteres. Placeres resonatoren nu i en knude, vil der ikke induceres nogen emk (fordi det magnetiske felt vil være 0), og der vil ikke springe nogen gnist, ligegyldigt om den holdes parallelt med eller vinkelret på det magnetiske felt. En bug derimod vil kunne findes ved at holde resonatoren vinkelret på det magnetiske felt, og derefter finde det sted, hvor gnistspringene er kraftigst.



Figur 3 Skematisk tegning af Hertz opstilling.

Hertz kunne nu, ved at flytte resonatoren langs linjen PQ, finde ud af, hvor knuderne lå, ligesom han kunne bestemme retningen af det magnetiske felt. Ved at måle afstanden mellem to på hinanden følgende knuder, var han i stand til at beregne bølgelængden (λ) af de elektromagnetiske stråler (bølgelængden er lig den dobbelte afstand mellem to på hinanden følgende knuder). Han kendte endvidere frekvensen (f) af de udsendte stråler, og da hastigheden af bølgerne (v) er givet ved $v = \lambda \cdot f$, kunne han nemt beregne denne. Det viste sig senere, at den var lig med lysets hastighed (c). Bølgelængden var derimod flere meter, hvor den for synligt lys ligger mellem 380 og 780 nm.

Konsekvensen af forsøget.

Men hvorfor var dette forsøg så vigtigt for ætertilhængerne? Svaret er enkelt: De mente simpelthen, at det var det endelig bevis for, at den æter som elektromagnetiske bølger

udbredes i, er den samme som lysæteren (og denne tvivlede ingen på) således skrev FitzGerald i en artikel[2] til Royal Institution of Great Britain:

> "Dette var Hertz' fundamentale eksperiment med hvilket, han viste, at elektromagnetiske virkning udbredes i tiden, og med nogle overslagsberegninger viste han, at hastigheden af udbredelsen er den samme som for lys. Det følger at lysæteren er eksperimentalt vist at være det samme medium, som er skyld i elektriske og magnetiske fænomener, og at de elektromagnetiske bølger, som vi har studeret blot, er meget lange lysbølger" [19 s.42-43 v.o.].

Hertz havde altså vist, at elektromagnetiske bølger udbreder sig med en endelig hastighed, og at denne hastighed er lig lysets. Ætertilhængerne kunne nu argumentere for eksistensen af æteren. Da bølgerne har en endelig hastighed, måtte de udbrede sig gennem et medium, og dette medium måtte naturligvis være æteren. Hertz forsøg understøttede altså nærvirkningsteorierne, mens den talte mod teorien om fjernvirkning. Dette betød, at tilhængerne af æterteorierne kom til at stå stærkt. Efter at man nu havde "bevist" eksistensen af æteren, gav man sig igen til at spekulere over, om æteren lå i hvile eller var i bevægelse. Denne diskussion vil vi nu behandle i næste afsnit.

5.2 Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928).

Det store spørgsmål på Lorentz tid var, om æteren ligger stille eller bevæger sig, samt hvis den bevæger sig, på hvilken måde og i forhold til hvad bevæger den sig så [1 s.257]. Desuden ville man finde ud af, hvad der sker, når et legeme bevæger sig gennem æteren. Man indførte æteren, som det medium lyset udbreder sig i, da man ikke kunne forestille sig at en bølgebevægelse, som lys jo er kan udbrede sig i ingenting. Da lyset udbreder sig i æter-en, må det have en konstant hastighed i forhold til denne, lige-som alle andre bølgetyper i forhold til deres medie.

Der fandtes to udbredte æteropfattelser:

1) George Gabriel Stokes'(engelsk fysiker, 1819-1903) medførte æter: Stokes' æterteori gik

[2] Artiklen havde titlen: "Electromagnetic Radiation"

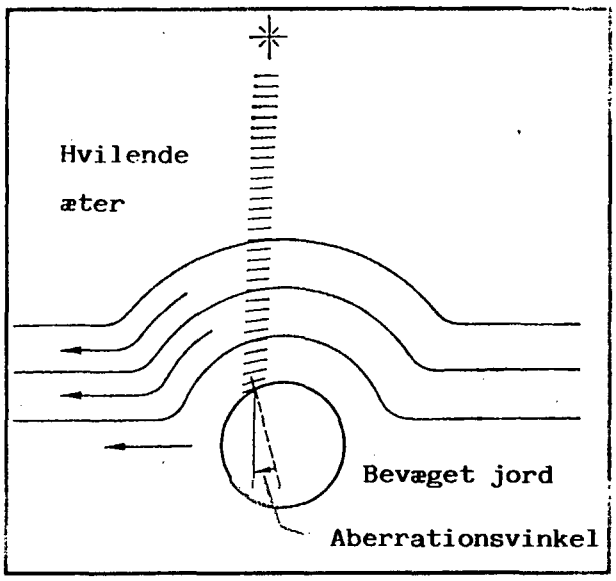
ud på, at et legeme, der bevæger sig gennem æteren, påvirker æteren og trækker den delvis med sig. Omtrent som et legeme, der bevæger sig igennem en klæbrig væske vil gøre. Tæt ved jorden kan man opfatte den på samme måde som en atmosfære. Påvirkningen vil så aftage med afstanden fra jorden, således at æteren langt ude i rummet vil ligge helt stille i forhold til fiksstjernerne. Stokes' æter har egenskaber som en perfekt væske hvilket vil sige at den er uendelig letflydende og den er usammentrykkelig [1 s.264].

2) Augustin Fresnels (fransk civilingeniør, 1788–1827) absolutte æter: Fresnels æterteori går ud på, at æteren er et "stift legeme", der er så let gennemtrængelig, at alle legemer kan bevæge sig gennem den uden nogen påvirkning [1 s.262]. Æteren skal så være uendelig udstrakt og ligge stille i forhold til fiksstjernerne.

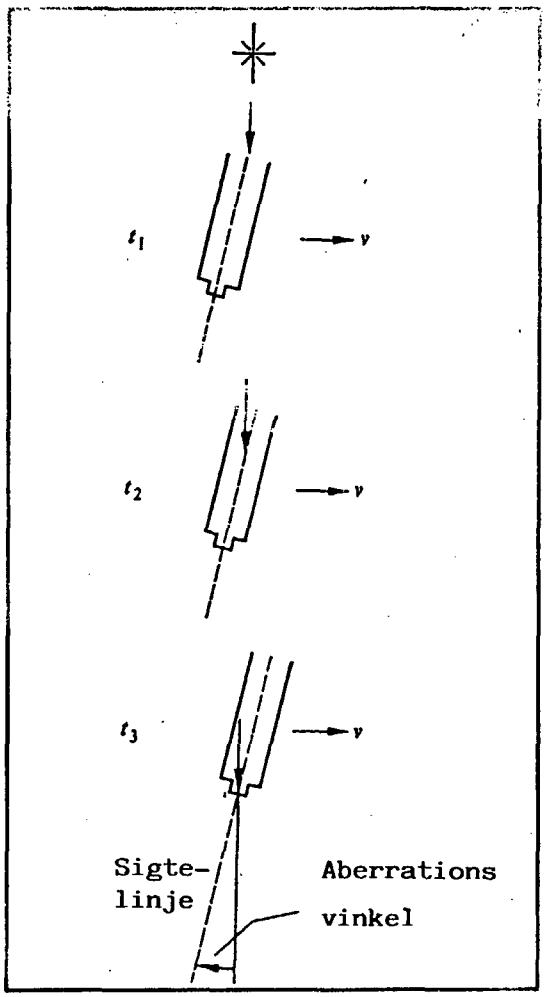
Den første gang, en teori for æterens bevægelser i forhold til faste legemer blev nødvendig, var ved forklaringen af stjernelysets aberration [1 s.261]. Aberration giver sig udtryk ved, at stjernerne tilsyneladende foretager en eliptisk bevægelse med en storakse på 41 bue sekunder, i løbet af et år. Denne eliptiske bevægelse går fra at være en cirkel for stjerner over polerne, til at være en linje for stjerner på ekliptika[3]. Sjernelysets aberration er den forskel i sigtelinjen til en stjerne i løbet af året, der stadig er tilbage, når man har korrigeret for ændringen i jordens position i forhold til solen. Da man havde korrigeret for jordens position i forhold til dens bane omkring solen, mente man, at stjernelysets aberration må skyldes jordens hastighed i forhold til æteren.

Fresnel forklarede det med, at æteren ikke bliver trukket med af legemer. Lyset bevæger sig så i rette linjer gennem æteren, og hvis man på et legeme, der ikke bevæger sig parallelt med denne lysstråle, prøver at pejle retningen til lyskilden, vil man måle en lidt forkert vinkel. Den "fejlagtige" vinkel opstår ved, at når man, i bevægelse pejler en retning med kikkert, så skal man have lysstrålen nøjagtig ind gennem midten af både objektivet og okularet, og det kan man kun få ved at holde kikkerten lidt skråt i forhold til lysets udbredelsesretning. Denne æter giver det samme resultat, som Newtons partikelteori for lys, hvor man opfatter lys som bestående af partikler.

[3] Ekliptika er den cirkel på himlen, som solen beskriver i sin tilsyneladende årlige bevægelse i forhold til fiksstjernerne.



Figur 5 Stjernelys aberration ifølge Stokes.

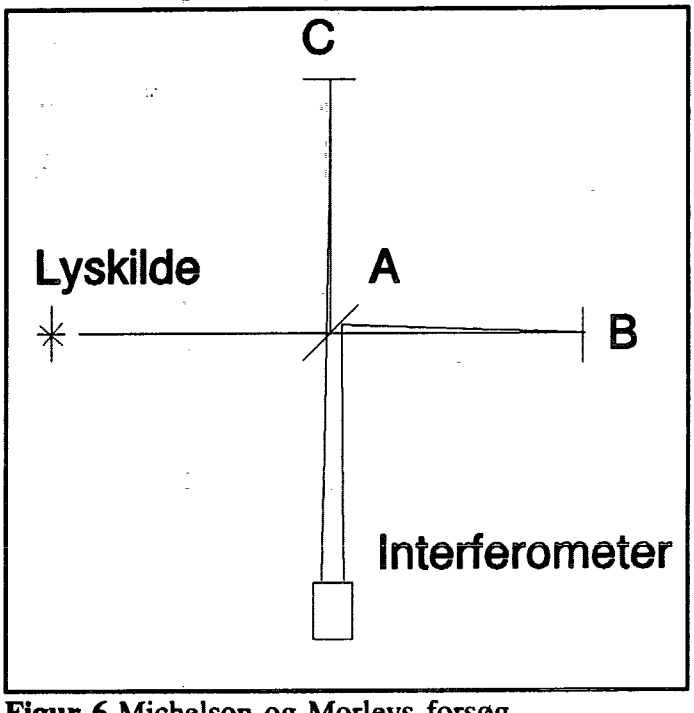


Figur 4 Stjernelysets aberration ifølge Fresnel.

Stokes forklaring gik ud på, at jorden trækker æteren med sig, således at æteren krummer sig om jorden og derved ændrer lysets indfaldsvinkel. Figur 5, som angivet hos Berkson [1 s.264], ser dog ud til at illustrere, at jorden skubber æteren til side. Men da lyset udbreder sig i rette linier gennem æteren, er problemet: hvordan ændrer lyset retning. På tegningen vises, hvordan lysets bølgefront ændrer retning, men udbredelsesretningen er tilsyneladende uændret.

Lorentz påpegede den mangel ved Stokes teori, at hvis man skal opfatte æteren som en usammentrykkelig væske, så vil der nødvendigvis opstå hvirvler, og det vil helt ødelægge Stokes teori, for så skal stjernehimlen opføre sig helt kaotisk med alle mulige forskellige sigtelinjer på grund af hvirvler i æteren. Lorentz foreslog i stedet, at man skal forestille sig, at æteren er sammentrykkelig, og at den bliver til-trukket af jordens tyngdekraft. Problemet med denne forklaring er, at med en sammenpresset æter nær jorden, skal man forvente, at lysets hastighed derved bliver ændret, da der vil være mere æter, som lysbølgen skal passere. Dette passede ikke sammen med forklaringen af aberration.

Michelson og Morleys forsøg.

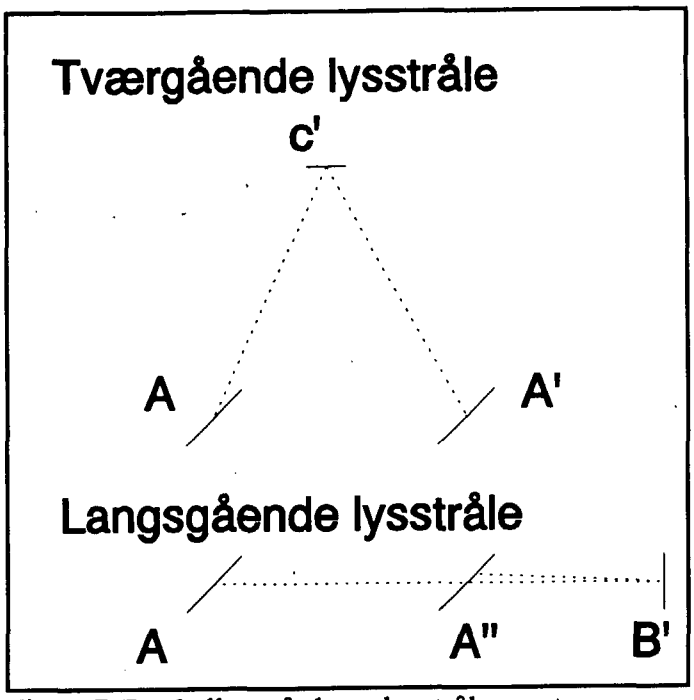


Figur 6 Michelson og Morleys forsøg.

For at afgøre hvilken af de to æteteorier, der er korrekt, forsøgte Albert Abraham Michelson (amerikansk fysiker, 1852–1931) og Edward Williams Morley (1838–1923) i 1887 at finde en målelig hastighedsforskel på to vinkelrette lysstråler (Michelson havde tidligere arbejdet med dette problem alene uden at opnå tilfredsstillende resultater). Derved ville de finde æterens hastighed i forhold til jorden (forsøgsopstillingen). Hvis æteren har en hastighed i forhold til jorden, så må man antage, at æteren er absolut, hvis ikke må den være medført. Man regnede med, at hvis æteren er absolut, så skal jordens hastighed i forhold til den nok svare til jordens hastighed om-kring solen (ca. 30 km/s). I forsøget er det dog ikke de direkte hastigheder, der måles på, men derimod et interferensmønster mellem de to lysstråler. Dette interferensmønster skal så ved en hastighedsforskel ændres.

Fra en lyskilde sendes en lysstråle mod et spejl A, der er vinklet 45 grader på lysstrålens retning. Spejlet er halvt gennemsigtigt, så halvdelen af lyset går gennem det, og den anden halvdel bliver spejlet 90 grader. Efter omtrent lige lange strækninger på den anden side af spejlet, reflekteres lysstrålerne. Spejlene B og C står dog ikke helt vinkelret på hinanden. Netop dette gør, at lysstrålerne senere kan interferere. Lysstrålerne reflekteres så tilbage til spejlet A, hvor lysstrålen, der før blev reflekteret, nu går igennem og lysstrålen, der før gik igennem nu reflekteres, således at de igen har næsten samme retning. Den lille forskel i retningen af lysstrålerne gør, at der dannes et interferensmønster. Strålerne går ind i et interferometer, hvor man måler interferensen. Dernæst drejer man hele forsøgsopstillingen 90 grader, mens man hele tiden holder øje med interferensmønstret og ser, hvor meget det ændres. Grunden til, at interferensmønstret skal ændres ved drejning er, at når lysets hastighed er konstant i forhold

til æteren, så vil en bølgefront fra den ene lysstråle nå interferometeret hurtigere end den anden, hvis jorden har en hastighed gennem æteren. Når man så drejer forsøgsopstillingen, skal en bølgefront fra den anden lysstråle bruge mindre tid på at nå interferometeret, mens en lysstråle fra den første bruger mere. Derved vil interferensmønstret skifte, så det bliver spejlvendt ved en drejning af opstillingen på 90 grader. Alt dette er under forudsætning af, at æteren er absolut, og jorden bevæger sig igennem den. Hvis æteren er medført, vil man ikke kunne måle nogen ændringer.



Figur 7 Forskellen på de to lysstrålers rute.

Den forventede ændring udeblev. Dette tog Michelson, som et bevis for at æteren var medført, altså at jorden trækker æteren med sig, når man ikke kunne påvise nogen relativ hastighed mellem jorden og æteren.

Lorentz mente derimod at resultatet skulle forklares ved hjælp af en kombination af Fresnel og Stokes teorier, således at hvis ætervinden[4] nær jordens overflade er på halvdelen af jordens hastighed, så vil forskydningen af interferensmønstret være umåleligt i Michelson og Morleys forsøg.

Som følge af dette lavede Michelson i 1887 et forsøg, hvor han prøvede at finde ud af, om den relative hastighed mellem æter og jord varierer med højden over jordoverfladen. Således at æteren, som Lorentz foreslog, kan være delvis medført. Det var ikke muligt at finde en forskel i lyshastigheden, som afhænger af afstanden fra jordens centrum. Ud fra dette konkluderede Michelson, at hvis man skal vælge mellem Fresnels og Stokes' teorier, måtte man vælge den sidste (Stokes'), og antage at jordens påvirkning af æteren rækker mange tusinde kilometer ud i rummet.

[4] Fartvinden fra æteren.

Lorentz ønskede dog at holde fast ved den ubevægede (absolutte) æter, for ikke at skulle opgive tanken om et absolut rum. Teorien om den ubevægede æter havde dog et væsentligt problem. Det passede ikke sammen med Michelson og Morleys forsøg på at finde jordens hastighed i forhold til æteren. For at imødegå dette problem, blev det i 1892 foreslået, af blandt andre George Francis Fitzgerald (1851–1901), at materielle legemers størrelsesforhold ændredes, når de bevæger sig i forhold til æteren (de bliver presset lidt sammen i bevægelsesretningen af trykket af "fartvinden" fra æteren). Man antog, at det, der giver legemer deres størrelse og form, er de intermolekylære kræfter, skønt man på det tidspunkt ikke vidste, hvad disse kræfter består i. Det ville så være sandsynligt, at de formidles gennem æteren på samme måde som elektromagnetiske kræfter. Hvis dette skal være forklaringen på, at Michelson og Morley ikke kunne påvise nogen bevægelse i forhold til æteren, så må legemer sammentrækkes med en faktor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Denne faktor svarer netop, til den forventede tidsforskel mellem de to lysstråler.

I 1892 kom Lorentz med en ny teori om elektroner. Den handlede om, at alle elektrodynamiske fænomener blev tilskrevet påvirkninger af bevægede elektriske ladninger. Elektriske ladninger forventes at blive udsat for kræfter, der er proportionale med deres hastighed, når de bevæger sig i et magnetfelt og at videre-give den påvirkning til den "tunge masse", som de er tilknyttet. Forskellen mellem denne teori og tidligere teorier er, at i tid-ligere teorier tillagde man elektriske ladninger evnen til at påvirke på afstand med kræfter afhængig af ladning, afstand og hastighed. Den nye teori derimod forudsætter, at påvirkningerne sker gennem det medium, som ladningerne befinder sig i. Dette medium skal have de egenskaber, som Maxwell tillagde æteren. På ét punkt skulle den dog afvige fra Maxwells teori, nemlig ved, at en bevæget tung masse ikke kan påvirke æteren i eller omkring den bortset fra, at den skal kunne udsende elektromagnetiske kræfter igennem den. Det vil sige, at ingen del af æteren kan opnå en hastighed i forhold til andre dele af æteren,

Lorentz' idé var at reducere alle indviklede tilfælde af elektromagnetiske påvirkninger til et fundamentalt tilfælde, i hvilket et område i rummet kun indeholde æter og elektriske ladninger spredt i æteren.

Lorentz tilførte elektrodynamikken nye dimensioner, ved at formulere Lorentz-kraften, som beskriver, hvorledes en ladet partikel bliver påvirket i et elektrisk og magnetisk felt. Når en ladning q, med hastigheden **v**, bevæger sig gennem et magnetisk felt **B** og et elektrisk felt **E** påvirkes den af kraften **F** som givet ved formlen:

$$\boldsymbol{F} = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B})$$

Lorentz sammenkædede på denne måde æterteorierne for elekromagnetisme som fremført af Maxwell, med de "kontinentale" forestillinger om at elektricitet består af individuelle ladninger, som fremført af Weber. Således at elektricitet består af ladninger, der bevægede sig i en absolut Fresnel æter.

5.3 Albert Einstein.

Einsteins (tysk fysiker, 1879–1955) udgangspunkt var, at naturlovene skal være ens for enhver iagttager. Derfor satte han selve iagttagelssituationen i centrum i sine teorier. Einstein var i høj grad inspireret af Ernst Mach (østrigsk fysiker, 1838–1916), som havde kritiseret Newtons forestillinger om et absolut rum og mente, at alle fysiske begreber skal beskrives i henhold til den måde, man observerer dem på [1 s.294].

I et bevæget system med ladninger vil der være magnetiske kraftlinjer tilstede, som påvirker måden, hvorpå bevægede legemer i systemet vekselvirker med hinanden. Men ifølge relativitetsprincippet må vekselvirkning mellem ladninger i det bevægede system være den samme, som i det hvilende system. Transformationerne må derfor transformere beskrivelsen på en sådan måde, at det kan fjerne det magnetiske felt, der dannes ved bevægelse af systemet. En sådan transformation er kun mulig ved transformationer som Lorentz' med dens nye tids og afstandsvariable [1 s.297]. For at have de færrest mulige antagelser, og for at sikre sig mod eventuelle fejl i den etablerede elektrodynamik (elektromagnetisme), tog Einstein sit udgangspunkt i antagelsen om lyshastighedens konstans. Man havde jo i utallige forsøg målt lyshastigheden til det samme.

Einsteins afvisning af æteren.

Einsteins teorier gik ud fra, at både det system observatøren er i hvile i, og det, som bevæger

sig, opfører sig som systemer i en fresnel-æter. Einstein tog sit udgangspunkt i feltteorierne for lys og elektromagnetisme [1 s.299]. Han mente, at den eneste måde, hvorpå man kunne opretholde, at lysets hastighed er c i begge systemer, er ved transformationer som lorentz-transformationen, hvor hastighed er defineret som tilbagelagt strækning pr tidsenhed [1 s.300]. Einsteins problem var, hvorledes man kan udlede transformationer, som er i overensstemmelse med lyshastighedens konstans, uden at skulle tage årsagsbestemte (kausale) fysiske påvirkninger fra en æter i betragtning. Einstein fandt på at ændre hele opfattelsen af tid og rum som absolutte størrelser ved at erstatte de abstrakte begreber med deres fysiske repræsentanter nemlig ure og målestokke, for derved at fremkomme med en forståelig måde at opfatte transformationerne på. Det er lettere at forstå, at målestænger og legemer i det hele taget kan trække sig sammen, og at ure kan gå forskelligt, end at forestille sig at selve rummet og tiden ændrer sig. Det vil således være muligt at eftervise hans teorier eksperimentelt.

Den direkte årsag til at Einstein nødvendigvis måtte forkaste æteren var, at selv om Lorentz' idè om bevægede legemers sammentrækning på grund af "ætervinden" var korrekt, så vil man netop på grund af sammentrækningen aldrig kunne afgøre, hvad der bevæger sig i forhold til æteren, og hvad der er i hvile. Når denne hastighed således er umulig at iagttage, måtte Einstein, som var enig med Mach i, at lovmæssigheder skal udtrykkkes ud fra iagttagelige størrelser, derfor afvise æteren, da den derefter kun vil have hypotetisk interesse.

Einsteins to postulater.

1) Ethvert inertialsystem er ligeværdigt ved beskrivelse af de fysiske love, dvs. de fysiske love er ens i ethvert inertialsystem.
2) Lysets hastighed er den samme i enhver retning i et inertialsystem, og den har den samme størrelse i ethvert inertialsystem.

Udelukkende ud fra disse to postulater udledte han Lorentz-transformationen, men på et helt andet grundlag end Lorentz gjorde. Lorentz opererede nemlig med virkelige og tilsyneladende længder og tider. Med virkelige længder menes de længder en ting har, når den er i hvile i æteren, mens legemer, der bevæger sig i æteren har tilsyneladende længder. Einstein fastslog, at alle målinger er lige virkelige for dem, der udfører dem. Der findes altså ikke ikke nogen målinger, der er tilsyneladende, hvilket jo også skulle henføre til, at der er et absolut system, hvori de sande målinger kan foretages. Derimod er alle målinger relative i forhold til

hinanden. Einstein måtte forkaste æteren, da han ikke mente, at der er et absolut rum, hvori sande målinger kan foretages. Ifølge Lorentz besidder æteren netop egenskab som et absolut rum.

Einstein ville dog ikke helt afvise en æter, den kan bare ikke have de egenskaber som Lorentz tillægger den. Einstein sagde selv:

> "I hovedtræk kan vi sige at i henhold til den generelle relativitetsteori er rummet udstyret med fysiske egenskaber; i den forstand, eksisterer der derfor en æter. I overensstemmelse med den generelle relativitetsteori er rum uden æter utænkelig; for i sådan et rum vil det ikke alene være umuligt for lys at udbrede sig, men der vil heller ikke være mulighed for rum og tid (målestænger og ure), derfor ejheller nogen rumtids intervaller i fysisk forstand. Men denne æter må ikke tænkes på som udstyret med kvaliteter, der er karakteristiske for vejelige medier, som består af dele, der kan spores gennem tid. Ideen om bevægelse må ikke bruges på denne (æteren)." [1 s.312 v.o.].

Grundlaget, for at Einstein forkastede den mekaniske æter, er, at den ikke er mulig at observere, og fordi han mente, at den ikke er nødvendig i beskrivelsen af elektromagnetiske bølger. Ved indførelsen af relativitetstesorien satte Einstein sig ud over det klassiske årsagsbegreb, da man ikke kanangive nogen årsag til Lorentz–transformationerne, når man afviser den mekaniske æter. Einstein sagde om æterens mekaniske egenskaber:

> "Med hensyn til den mekaniske natur af den Lorentzianske æter, kan man sige om den i en spøgefuld tone, at ubevægelighed er den eneste mekaniske egenskab, den ikke er blevet frataget af H.A.Lorentz. Det kan tilføjes at hele ændringen i opfattelsen af æteren, som den specielle relativitetsteori frembragte, bestod i at fjerne æterens sidste mekaniske kvalitet nemlig dens ubevægelighed." [1 s.312 v.o.].

Opsummering.

Hertz' forsøg viste, at elektromagnetiske kræfter ikke kan være fjernvirkningskræfter, da elektromagnetiske bølger har en endelig hastighed. Derfor konkluderede han, at de må

udbredes gennem æteren. Lorentz havde store problemer med at finde ud af, hvilke egenskaber æteren har. Han kom frem til, at æteren udover at virke som medium for elektromagnetiske bølger, ikke må kunne påvirkes af materie. Derimod skal den selv kunne påvirke legemer, der bevæger sig gennem æteren, således at de bliver trykket sammen af ætervinden i henhold til Lorentz-transformationen. Einstein indså, at hvis legemer bliver påvirket af æteren, som angivet i Lorentz-transformationen, vil det ikke være muligt at afgøre, hvad der er i hvile, og hvad der bevæger sig i forhold til æteren. Dette er grunden til, at han forkastede æteren.

Opsamling og konklusion.

I dette afsnit vil vi drage de ting frem, som vi finder vigtige for at kunne besvare det spørgsmål, vi stillede os i starten af projektet: hvilken rolle har æterteorier haft i udviklingen af elektrodynamikken. Vi vil så vidt muligt inddrage de personer i denne opsamling, som vi finder har haft en vigtig rolle i forbindelse med udvikling af nærvirkningsteorier inden for elektrodynamikken. Disse personer er, som vi har beskrevet i kapitel 3, 4 og 5, Faraday, Thomson, Maxwell, Hertz, Lorentz og Einstein. Vores svar på problemformuleringen indeholder tre punkter:

1) Æterteorierne har tjent et formål som et grundlæggende natursyn.

De to grundlæggende forskellige natursyn, som fandtes inden for elektricitets- og magnetismeområdet i det nittende århundrede, fjernvirknings- og nærvirkningsteorierne, forklarede på forskellig måde, hvordan kræfter (elektriske og magnetiske) formidles. I fjernvirkningsteorierne var kraftformidling ikke betinget af et mellemliggende medium, mens kraftformidling i nærvirkningsteorierne krævede et medium. Dette medium var æteren. Der var ikke noget afgørende bevis, som godtgjorde, at den ene overbevisning skulle være mere rigtig end den anden; de må betragtes som grundlæggende overbevisninger, som videnskabsmændene arbejdede på grundlag af.

Ætertilhængerne opererede med et æterbegreb, fordi de ønskede at forklare, hvordan virkning kan ske gennem rummet. Hvordan kan for eksempel to magneter trække i hinanden, når de ikke er i direkte berøring? Æterteoretikerne måtte simpelthen have en beskrivelse for, hvordan dette kan ske. Det var f.eks. ikke nok for dem at vide, med hvor stor kraft, de trækker i hinanden.

Æterbegrebet kendtes helt tilbage i antikken og blev videreført i renæssancen af især Descartes. Han mente, at vekselvirkning mellem legemer kun kan finde sted, hvis legemerne er i direkte forbindelse, hvorfor der må findes et eller andet medium som er skyld i denne vekselvirkning. Til dette formål genindførte Descartes æteren. Æteren må være et meget fint stof, som kan gennemtrænge alt, og hvori virkningen kan ske ved nærvirkning.

Denne teori blev taget op og videreudviklet i 1800-tallets England af bl.a. Faraday, Thomson og Maxwell. Disse englænderne havde flere forskellige måder at forklare nærvirkningen på. Faraday var den eneste, som ikke direkte brugte et æterbegreb til at beskrive nærvirkning med.

Faraday, som med sin kraftlinieteori og tanker om nærvirkning kom til at påvirke Thomson og Maxwell i deres æterteorier, havde en grundlæggende skepsis mod fjernvirkning. Dette ansporede ham til at udtænke forsøg, der skulle vise, at virkning sker ved nærvirkning. Kraftliniebegrebet var et resultat af hans natursyn. Det kan være svært at forestille sig, hvordan Faraday tænkte sig, at en påvirkning skal ske via kraftlinierne. Udbredelsen kan eksempelvis være en vibration i kraftlinierne. Faraday mente, at en virkning udbreder sig med en endelig hastighed via kraftlinierne.

Thomson og Maxwell videreførte Faradays natursyn. De overtog kraftliniebegrebet, men tilførte hertil en æter. Begge havde de også svært ved at forlige sig med tanken om, at kræfter kan formidles af ingenting. Deres grundlæggende idé, om hvordan den fysiske verden ser ud, krævede som hos Faraday en "kraftformidler". Og da tanken om en æter ikke var dem fremmed, tog de begge denne idé op. Måske fandt de Faradays kraftliniebegreb for svært at forstå. I stedet opstillede de begge mekaniske modeller for æteren, for på den måde at få en større forståelse for dele af naturen.

Mange fysikere opererede i deres natursyn med en eller anden form for æter. Efter Maxwell havde man en del problemer med at forstå dens natur, men dette problem løste Einstein. Han løsning var tilmed den mest enkle. Han foreslog, at man helt så bort fra æteren. Da den ikke vil være mulig at observere, er der ingen grund til at tale om den. Endvidere var en af konsekvenserne ved en æter, at den vil have egenskab som et absolut rum, i forhold til hvilket sande målinger kan foretages. Med Einstein forkastedes æteren og det absolutte rum, hvilket vil sige at æterteorierne blev afløst af et nyt natursyn, der byggede på iagttagelse. Således er alle iagttagelser lige rigtige for den, der gør iagttagelsen.

2) Æterteorierne blev brugt til en alternativ beskrivelse af elektriske og magnetiske fænomener i forhold til fjernvirkningsteorierne.

Ved at bruge et æterbegreb satte de førnævnte englændere sig i opposition til i første omgang den franske skole, senere den tyske. Disse skoler stod meget stærkt i det videnskabelige samfund, da deres teorier byggede på et matematisk stærkt fundament og var veludbyggede. Ikke mindst stemte deres teorier godt overens med Newtons mekanik, hvilket havde en stor betydning, da den var forbilledet for mange. For at teorien skulle være levedygtig over for laplacianernes, måtte den på samme måde være matematisk konsistent.

Faraday gik imod fjernvirkning og den franske skoles fysik. Han grundlagde en helt ny teori for elektrisk og magnetisk vekselvirkning. Da den ikke var beskrevet matematisk, blev den ikke taget alvorligt af mange. Thomson byggede videre på Faradays teorier og satte matematik på. Han gik videre end Faraday, idet han prøvede at forklare Faradays teorier med en ætermodel.

Dette betød efterhånden, at der opstod en alternativ teori i forhold til de kontentinale skoler. Ligesom Thomson konstruerede Maxwell en ætermodel på baggrund af Faradays kraftlinieteori. I forbindelse med at Maxwell opstillede sin hvirvelmodel, skriver han bl.a., som vi så i afsnit 4.1, at et af formålene med teorien var at styrke nærvirkningstilhængernes tro på rigtigheden af deres teorier. Maxwell kommer altså med et reelt alternativ til fjernvirkningsteorien.

Det viser sig endvidere, at hans teori er så stærk, at den ikke alene indeholder de allerede kendte elektriske og magnetiske relationer, den indeholder også nye endnu ikke efterviste. Det grundlag Maxwell bl.a. brugte i udledningen af sin teori var, som nævnt i kapitel 4, den newtonske mekanik (nærmere betegnet elasticitetsteori). Newton var jo det store forbillede for fjernvirkningstilhængerne, og man kan således sige, at Maxwell slår disse med deres eget våben. Newtons mekanik tvivlede de jo ikke på.

Dette alternativ blev endnu stærkere, da Hertz påviste elektromagnetiske bølger. Hermed mente ætertilhængerne, at æteren var eksperimentelt bevist. Det kan synes pudsigt, at det netop var Hertz, som kom til at spille denne rolle. Han kom fra Tyskland og var dermed opdraget i den tyske tradition.

"Kampen" mellem de to retninger varede, indtil Lorentz forenede feltbegrebet med idéen om bevægede elektriske partikler (henholdsvis Maxwells og Webers teorier) til én samlet elektrodynamisk teori, som byggede på beskrivelsen af bevægede elektriske partikler og kraftfelter.

Der var et modspil mellem de to traditioner, som i sidste ende førte frem til en samlet teori. Det har måske været befordrende for udviklingen af elektrodynamikken, at der har været to grundlæggende forskellige opfattelser af, hvordan virkning foregår.

3) Æterteorierne havde en funktion som foreløbige arbejdshypoteser, der har hjulpet til af give en bedre forståelse af magnetisme og elektricitet.

Opsamling og konklusion.

Faraday kraftlinieteori skulle vise sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme. I starten benyttede han linierne som illustration for, hvordan feltet ser ud omkring en magnet. Men da han opdagede elektromagnetisk induktion, tillagde han dem en udvidet (fysisk) betydning, idet de kan give en bedre forklaring af fænomenet. Hans første hypotese viste sig at være nyttig, hvorfor han videreudviklede den.

Maxwell og Thomson opstillede begge modeller for æteren, som havde den funktion at være analogimodeller. De skulle give et grundlag for deres videre forskning. I forbindelse med modeller af æteren, var det Maxwells, som var den mest udviklede.

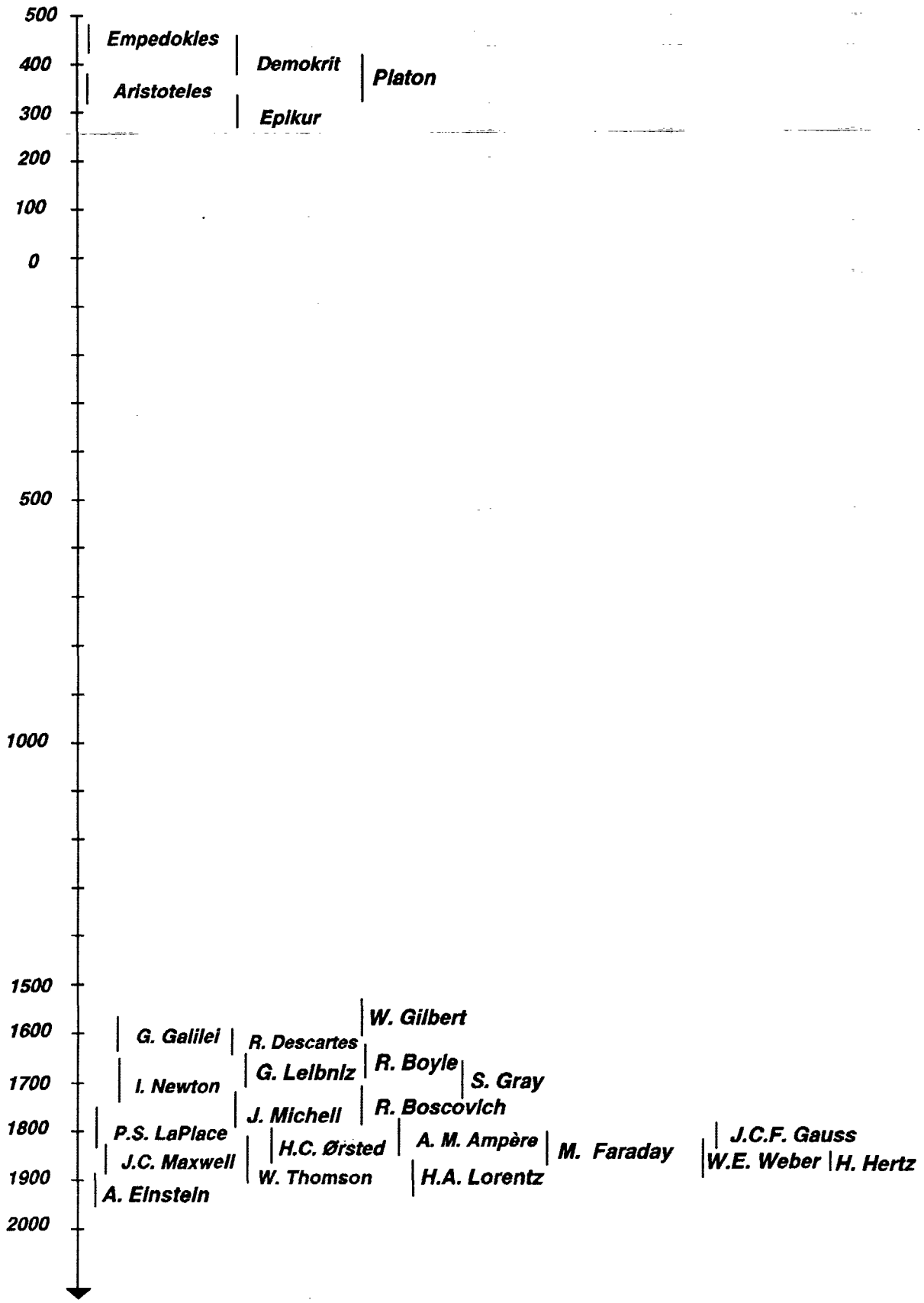
Før Maxwell opstillede sin ætermodel, var der for ham ikke en tilfredsstillende samlet matematisk teori, der omfattede områderne elektrostatik, elektrodynamik og elektromagnetisk induktion, skønt Faraday tidligere havde fremkommet med en del mere eller mindre konkrete teorier for sammenhænge mellem elektricitet og magnetisme. Ligeledes havde Weber opstillet sin elektromagnetiske teori, som byggede på fjernvirkning mellem elektriske partikler i bevægelse. Da Maxwell ikke kunne gennemskue, hvordan disse teorier hang sammen, opstillede han en mekanisk model for æteren, hvori hver del repræsenterede kendte mekaniske sammenhænge. Hans grund til at opstille en mekanisk model var, at han havde et meget grundigt kendskab til mekanik, mens hans ikke havde samme fornemmelse af, hvad sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme var. Dette overblik håbede han at få, når han i en model erstattede de elektriske og magnetiske fænomener med mekaniske (som tidligere nævnt var det især den del af mekanikken, der omhandler elasticitet).

Ét af de krav han stillede til sin model var, at den skulle omfatte alle tidligere kendte sammenhænge: Coulombs lov for virkningen mellem to ladede partikler, Ørsteds opdagelse af sammenhæng mellem magnetisme og elektricitet, Ampères lov for kraften mellem to strømførende ledninger, Faradays opdagelse af elektromagnetisk rotation og elektromagnetisk induktion, påvisning af sammenhæng mellem magnetisme og lys og en del andre større eller mindre opdagelser og teorier. Så det var noget af en opgave Maxwell havde stillet sig. Hans formål var på grundlag af den mekaniske model at lave en matematisk teori, hvilket som bekendt også lykkedes. Når han brugte de mekaniske begreber som analogier for de elektriske og magnetiske fænomener, havde han ved hjælp af den matematiske teori en samlet teori for elektricitet og magnetisme og deres indbyrdes vekselvirkning. En teori som vi den dag i dag anser for den rigtige.

Ved fremkomsten af teorien var Maxwell ikke mere sikker på dens rigtighed, end at han sagde, at selvom den blev forkastet, så havde man nået et langt skridt videre i forståelsen af den fysiske verden (se kapitel 4). Han accepterede altså muligheden for at hans teori kunne forkastes, men han håbede, at eksperimenter ville bekræfte den. Ca. 15 år efter at Maxwell havde tilføjet det sidste led, viste Hertz, at tilføjelsen af dette led var berettiget.

Man kan undre sig over, at det var muligt at få en model for æteren til at sige noget fornuftigt om så komplicerede fænomener som elektricitet og magnetisme og deres indbyrdes interaktion. Det, der nok er mest imponerende, er, at en analogimodel, som er bygget på grundlag af mekanik, kunne vise disse sammenhænge. Den kunne endda vise nogle sammenhænge, der kan bruges i dag, hvilket jo er tilfældet med Maxwells ligninger.

Tidstabel


500
400
300
200
100
0
500
1000
1500
1600
1700
1800
1900
2000
Empedokles
Aristoteles
Demokrit
Epikur
Platon
W. Gilbert
G. Galilei
R. Descartes
G. Leibniz
R. Boyle
S. Gray
I. Newton
J. Michell
R. Boscovich
P.S. LaPlace
H.C. Ørsted
A. M. Ampère
M. Faraday
J.C.F. Gauss
J.C. Maxwell
W. Thomson
H.A. Lorentz
W.E. Weber
H. Hertz
A. Einstein

Tidstabel

	Coulombs lov
90	
1800	
10	
20	Ørsted opdager elektromagnetismen
	Faraday opdager elektromagnetisk rotation
	Ampères kraftlov
30	Faraday opdager elektromagnetisk induktion
40	
	Webers kraftlov
50	
60	Maxwell opstiller sin ætermodel
70	
80	Michelson og Morleys forsøg
	Hertz påviste elektromagnetiske bølger
	Michelsons højdeforsøg
90	Lorentz formulerer sin elektronteori
1900	
	Einstein afviser æteren

Litteraturliste.

[1] Berkson, William:
Fields of force. The development of a world view from Faraday to Einstein.
Routlodge and Keyan Paul, London, 1974.

[2] Christianson, Gale E.:
In the presence of the creator. Isaac Newton and his times.
The Free Press, New York 1984.

[3] Edwards, Paul (Editor in Chief):
Encyclopedia of Philosophy.
The Macmillan Company & The Free Press, New York.
Collier-Macmillan Publishers, London, 1972.

[4] Epstein, Lewis C.:
Relativity visualized.
Insight Press, San Francisco, 1983.

[5] Foldberg, Niels Erik:
Nogle erfaringer med tematiseret undervisning.
Direktoratet for Gymnasieskolerne og Hf, Aalborg 1989.

[6] Fysik. Bekendtgørelse og vejledende retningslinjer
Undervisningsministeriet, Direktoratet for Gymnasieskolerne og Hf, 1988.

[7] Goldman, Martin:
The Demon in the Aether. The story of James Clerk Maxwell.
Paul Harris Publising, Edingburgh, 1983.

[8] Gooding, David & Frank Jones:
Faraday redicovered. Esssays of the life and work of Michael Faraday, 1791-1867.
Stockton Press, 1985.

[9] Hesse, Mary B.:
Forces and Fields. Concept of action at a distance and history of physics.
Greenwood Press, 1970.

[10] Ole Knudsen:
Artikel om forsydningsstrøm.
Videnskabshistorie, Skriftserie for videnskabsteori ved Aalborg universitetscenter nr 3
Institut for sprog, kommunikation og kulturhistorie, Aalborg, 1977.

[11] Knudsen, Ole:
Eletromagnetismens historie 1820–1831 og Faraday opdagelse af induktionen.
Gyldendal, 1980.

[12] Knudsen, Ole:
Studier i elektromagnetismens historie.
Afhandling, Århus, 1989.

[13] Knudsen, Ole:
Træk af elektrodynamikkens historie fra Ampère til Maxwell, Forelæsningsnoter, Fysik 3.
Institut for de eksakte naturvidenskabers historie, Århus, 1975.

[14] Kragh, Helge og Stig Andur Pedersen:
Videnskab – Teori – Samfund. En introduktion til materialistiske videnskabsopfattelser.
IMFUFA-tekst nr 42, Roskilde Universitetscenter, 1981.

[15] Lloyd, G.E.R:
Ancient culture and society, Early greek science: Thales to Aristotle.
Chatto & Windus, London, 1970.

[16] Lloyd, G.E.R:
Ancient culture and society, Greek science after Aristotle.
Chatto & Windus, London, 1973.

[17] Lübcke, Poul (red.):
Politikens filosofi leksikon.
Politikens Forlag, København, 1983.

[18] Næss, Arne:
Filosofiens Historie 1–3
Vintens Forlag, København, 1967.

[19] O'Hara, J.G. and Pricha, W:
Hertz and the Maxwellians.
Peter Peregrinus LTD, London, 1987.

[20] Roller, Duane H.D.:
The De Magnete of William Gilbert.
Menno Hertzberger, Amsterdam, 1959.

[21] Roller, Duane og Duane H.D. Roller:
The Development of the Concept of Electric Charge.
Harvard Case Histories in Experimental Science, Case 8,
Volume 2.
Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1970.

[22] Sambursky, Shmuel:
Physical Thought.
Hutchinson of London, London, 1974.

[23] Sambursky, S.:
Physics of the Stoics.
Routledge and Kegan Paul, London, 1959.

[24] Taton, René:
Science in the nineteenth Century.
Basic Books inc, New York, 1961.

[25] Whittaker, Sir Edmund:
The history of modern physics 1800–1950, volume 7
A history of the theories of Aether and electricity I + II
Thomas Publishers & American Institute of Physics U.S.A, 1987.

Øvrig anvendt litteratur:

Aepinus:
Aepinus' essay on the theory of electricity and magnetism.
Princeton University Press, New Jersey, 1979.

Alonso, Marcelo og E.J. Finn.
Fundamental University Physics, 2nd edition.
Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1983.

Elvekjær, Finn og Børge Degn Nielsen:
Fysikkens Verden 3.
Gjellerup & Gad, København, 1990.

Hoyle/Narlikar:
Action at a distance in physics and cosmology.
W.H Freemann and company, San Francisco, 1974.

Jensen, Jens Højgaard og Søren Kjørup:
Om fysik 1, Fysikken i historisk og samfundsmæssig belysning. En introduktionsbog.
Hans Reitzels Forlag, København, 1983.

Solomon, Joan:
The structure of space.
David & Charles : Newton Abbort, 1973.

Staffansson, Eve, bengt Andersson og Karl-Erik Johansson:
Fysik i Grundtræk, 2B Ellære.
Munksgaard, København, 1973.

Teaching history of science and technology.
Teachers handboook.
The association for sience education

Litteraturliste.

Williams, L. Pearce:
Why Ampère did not discover electromagnetic induction.
American Journal of Physics, 54 (4), april 1986

Wussing, Hans:
Isaac Newton.
BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft 1978.

Når der i en kildehenvisning står v.o., betyder det, at det er vores egen oversættelse.

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 Kræmmer 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 Vinariom". 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 Ckristiansen.

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 af 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-FORMÅL 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 AF EARLY WAVE MECHANICS - with special emphasis on the role af realitivity". Af: Helge Kragh.

24/80 a+b "MATEMATIKOPFATTELSER HOS 2.G'ERE". 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 AF SCIENCE IN PAUL DIRAC's PHYSICS". Af: Helge Kragh.

28/80 "DIELEKTRISK 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 differentialligningsmodeller". 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 MÆNGDELÆRE". 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 MÖSSBAUEREFFEKTMÅLINGER". 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 AF WIND ENERGY UTILIZATION". ENERGY SERIES NO. I. 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 HISTORIETEORI OM NATURERKENDELSE, TEKNOLOGI OG SAMFUND".
Projektrapport af: Erik Gade, Hans Hedal, Henrik Lau og Finn Physant.
Vejledere: Stig Andur Pedersen, Helge Kragh og Ib Thiersen.
Nr. 38 er p.t. udgået.

39/81 "TIL KRITIKKEN AF VÆKSTØKONOMIEN".
Af: Jens Højgaard Jensen.

40/81 "TELEKOMMUNIKATION I DANMARK - oplæg til en teknologivurdering".
Projektrapport 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".
Projektrapport af: Niels Thor Nielsen.
Vejleder: Bent C. Jørgensen.

45/82 Er aldrig udkommet.

46/82 "EKSEMPLARISK UNDERVISNING OG FYSISK ERKENDESE-
1+11 ILLUSTRERET VED TO EKSEMPLER".
Projektrapport 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".
Projektrapport af: Lis Eilertzen, Jørgen Karrebæk, Troels Lange, Preben Nørregaard, Lissi Pedesen, Laust Rishøj, Lill Røn og Isac Showiki.
Vejleder: Mogens Niss.

49/82 "ANALYSE AF MULTISPEKTRALE SATELLITBILLEDER".
Projektrapport 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 ?"
Projektrapport af: Lis Eilertzen, 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 Philorophical 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 Høyrup.

Vedr. tekst nr. 55/82 se også tekst nr. 62/83.

56/82 "EN - TO - MANGE" -
En undersøgelse af matematisk økologi.
Projektrapport af: Troels Lange.
Vejleder: Anders Madsen.

57/83 "ASPECT EKSPERIMENTET"-
Skjulte variable i kvantemekanikken?
Projektrapport af: Tom Juul Andersen.
Vejleder: Peder Voetmann Christiansen.
Nr. 57 er udgået.

58/83 "MATEMATISKE VANDRINGER" - Modelbetragtninger over spredning af dyr mellem småbiotoper i agerlandet.
Projektrapport 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.
Projektrapport 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".
Projektrapport af: Annette Post Nielsen.
Vejledere: Jens Høyrup, Jens Højgaard Jensen og Jørgen Vogelius.

62/83 "MATEMATISKE MODELLER" - Litteratur på Roskilde Universitetsbibliotek.
En biografi 2. rev. udgave.
Af: Else Høyrup.

63/83 "GREATING 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: Berhelm Booss og Jens Høyrup.

65/83 "ANVENDT MATEMATIK - TEORI ELLER PRAKSIS".
Projektrapport 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".
Projektrapport 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?"
Projektrapport af: Lone Biilmann og Lars Boye.
Vejleder: Mogens Brun Heefelt.

68/83 "STOKASTISKE MODELLER I POPULATIONSGENETIK"
- til kritikken af teoriladede modeller.
Projektrapport af: Lise Odgård Gade, Susanne Hansen, Michael Hviid og Frank Mølgård Olsen.
Vejleder: Jørgen Larsen.

69/83 "ELEVFORUDSÆTNINGER I FYSIK"
- en test i 1.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 Szkotak Jensen.
Vejledere: Jens Højgaard Jensen og Bent C. Jørgensen.

75/84 "MATEMATIKUNDERVISNINGEN I FREMTIDENS GYMNASIUM"
- Case: Lineær programmering.
Projektrapport af: Morten Blomhøj, Klavs Frisdahl og Frank Mølgaard Olsen.
Vejledere: Mogens Brun Heefelt og Jens Bjørneboe.

76/84 "KERNEKRAFT I DANMARK?" - Et høringssvar 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 GITTERSTRUKTUT 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 Coster, Mikael Wennerberg Johansen, Povl Kattler, Birgitte Lydholm og Morten Overgaard Nielsen.
Vejleder: Bernhelm Booss.

80/84 "KURSUSMATERIALE TIL MATEMATIK B".
Af: Mogens Brun Heefelt.

81/84 "FREKVENSAFHÆNGIG LEDNINGSEVNE I AMORFT GERMANIUM".
Specialerapport 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".
Specialerapport af: Per Hedegård Andersen, Carsten Holst-Jensen, Else 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 1.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 Lilletorup.
Vejleder: Bent Sørensen.

97/85 "ON THE PHYSICS OF A.C. HOPPING CONDUCTIVITY".
Af: Jeppe C. Dyre.

98/85 "VALGMULIGHEDER I INFORMATIONSALDEREN".
Af: Bent Sørensen.

99/85 "Der er langt fra Q til R".
Projektrapport af: Niels Jørgensen og Mikael Klintorp.
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 KØERS FODEROPTAGELSE OG - OMSÆTNING".
Projektrapport af: Lis Eilertzen, 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 Jæger.

105/85 "THE FREQUENCY DEPENDENCE OF THE SPECIFIC HEAT AF THE GLASS REANSITION".
Af: Tage Christensen.

"A SIMPLE MODEL AF 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, CarstenHolst Jensen, Else Marie Pedersen og Erling Møller Pedersen.
Vejleder: Jesper Larsen.

108/85 "APPLICATIONS AND MODELLING IN THE MATEMATICS CUR - RICULUM" - 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 Katler 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 11".
Af: Bernhelm Booss og Krzysztof Wojciechowski.

114/85 "ANVENDELSE AF GRAFISKE METODER TIL ANALYSE AF KONTIGENSTABELLER".
Projektrapport af: Lone Biilmann, Ole R. Jensen og Arne-Lise von Moos.
Vejleder: Jørgen Larsen.

115/85 "MATEMATIKKENS UDVIKLING OP TIL RENÆSSANCEN".
Af: Mogens Niss.

116/85 "A PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR THE MEYER-NELDEL RULE".
Af: Jeppe C. Dyre.

117/85 "KRAFT & FJERNVARMEOPTIMERING"
Af: Jacob Mørch Pedersen.
Vejleder: Bent Sørensen

118/85 "TILFÆLDIGHEDEN OG NØDVENDIGHEDEN IFØLGE PEIRCE OG FYSIKKEN".
Af: 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.

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, IMFUFA, RUC.

124/86 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK".
Samtlige opgaver stillet i tiden 1974-jan. 1986.

125/86 "UVBY,β - systemet - en effektiv fotometrisk spektralklassifikation af B-,A- og F-stjerner".
Projektrapport af: Birger Lundgren.

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 "SMÅKRYB" - om 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/historieprojekt 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"
MASTEMATIKSPECIALE: 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.

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 Viščor

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 Viščor

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

by: Petr Viščor

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 KRÆFTER"

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
Technikfolgenabschätzung"

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 Sandsynligheds-. regningen"

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 tidsskriftet "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 MAXIUM 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 "ELEVHÆFTE: 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 "MATEMATICAL 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 varmefylde 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 Andreasen

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 konditionaler 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 Viščor, Ole Bakander

202/90 "TEGN OG KVANTER"
Foredrag og artikler, 1971-90.

af: Peder Voetmann Christiansen

203/90 "OPGAVESAMLING I MATEMATIK" 1974-1990

afløser tekst 170/88

204/91 "ERKENDELSE OG KVANTEMEKANIK"

et Breddemodul Fysik Projekt

af: Thomas Jessen

Vejleder: Petr Viščor

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 Viščor

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 Gjerrild, 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