

# Vejen til den elektromagnetiske feltteori

Hans Buhl, Steno Museet, Aarhus Universitet

H.C. Ørstedes opdagelse af elektromagnetismen førte til udviklingen af en lang række teorier om fænomenet i løbet af 1800-tallet. De kan overordnet deles op i to grupper: teorier, som tog udgangspunkt i det, der er og sker *inden* i ledninger og magneter, og teorier, som i stedet fokuserede på rummet *omkring* ledninger og magneter. Nogle af teorierne i sidstnævnte gruppe førte til Maxwells ligninger, som med deres feltteoretiske udtryk revolutionerede synet på naturen og lagde grunden for det 20. århundredes fysik.

“En uvejsom ørken”. Således karakteriserede den tyske fysiker og fysiolog Hermann von Helmholtz de mange elektrodynamiske teorier, der var fremkommet i løbet af 1800-tallet [1]. Ikke blot var der to fundamentalt forskellige forståelser af elektromagnetiske fænomener. Selv inden for de respektive paradigmer gav de forskellige teorier ikke altid de samme resultater. Mange af teorierne var også særdeles komplekse [2].

Udviklingen af de elektromagnetiske teorier var begyndt umiddelbart efter, at Ørsted i sommeren 1820 havde rundsendt sit latinske flyveskrift om elektricitets påvirkning af magnetnålen til et halvt hundrede lærde kolleger i Europa. Det fik en blandet modtagelse. De romantisk orienterede fysikere i Tyskland var begejstrede, hvorimod de franske fysikere, som var den tids førende, var dybt skeptiske. For Ørstedes opdagelse var i direkte modstrid med deres grundlæggende laplacienske paradigme.

## Elektromagnetiske fjernvirkningsteorier

Inspireret af den indflydelsesrige franske matematiker og fysiker Pierre-Simon Laplace, betragtede hovedparten af fysikerne Newtons gravitationsteori som det store forbillede. De forestillede sig, at materien var opbygget af en form for partikler, som påvirkede hinanden gennem øjeblikkeligt virkende centralkræfter. Altså kræfter der – ligesom tyngdekraften – virkede langs forbindelseslinjen mellem partiklerne, og hvis styrke udelukkende afhang af afstanden imellem dem. Derfor var det en stor sejr for laplacienerne, at det i 1780'erne var lykkedes den franske fysiker Charles-Augustin de Coulomb at måle, at kraften mellem ladede kugler havde samme matematiske struktur som tyngdekraften: Den var proportional med ladningerne og omvendt proportional med kvadratet på afstanden imellem dem. Siden havde man også fundet en tilsvarende variation af kraften mellem magnetpoler.

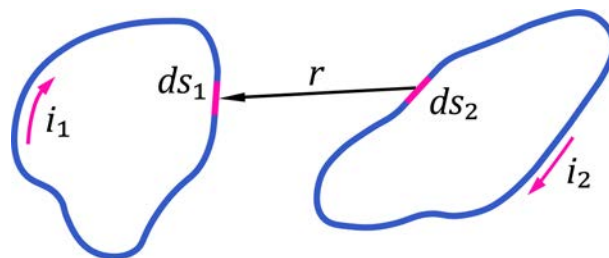
Det paradigme havde Ørsted nu sat et stort spørgsmålstegn ved. Ikke blot havde han påvist en vekselvirkning mellem elektricitet og magnetisme, som laplacienerne ellers havde afvist enhver form for forbindelse imellem. Han havde oven i købt vist, at denne virkning foregik *på tværs* af en strømførende ledning.

Der opstod hurtigt forskellige teorier om, hvad der forårsagede den elektromagnetiske effekt. Fysikerne Jean-Baptiste Biot og Félix Savart mente, at elektriciteten på en eller anden måde gjorde ledningen magnetisk, og at det var derfor, den påvirkede en

magnetnål i nærheden. Gennem en serie af målinger kunne de vise, at kraften på en magnetnål fra en lige, lodret leder var omvendt proportional med afstanden imellem dem. Biot argumenterede for, at kraften på magneten var summen af den magnetiske kraft fra infinitesimale stykker af ledningen. Han kunne vise, at det svarede til, at kraften mellem magneten og sådan et lille stykke af ledningen varierede omvendt proportional med kvadratet på afstanden. Variationen var altså i overensstemmelse med det laplacienske paradigme, men teorien kunne stadig ikke forklare kraftens retning [3].

## Ampère og kraften mellem strømme

En anden, der studerede elektromagnetismen med stor entusiasme, var matematikeren André-Marie Ampère. Som nævnt mente Biot og Savart, at fænomenet var magnetisk af natur. Men som det tidligere er blevet fint beskrevet her i bladet, argumenterede Ampère derimod for, at det grundlæggende var et elektrisk fænomen, og at al magnetisme skyldtes elektriske strømme [4]. Han antog, at der måtte løbe elektriske strømme inden i en permanent magnet. For at underbygge denne hypotese viste han, at en lang spole opførte sig som en magnet, når der løb strøm igennem den. I løbet af blot to uger lykkedes det ham også at vise, at to strømførende, parallelle ledninger påvirkede hinanden på samme måde som to magneter. Hermed havde Ampère skabt en helt ny teori om magnetisme. Til at karakterisere kraften mellem strømførende ledere opfandt han betegnelsen *elektrodynamik*.



**Figur 1.** For at finde kraften mellem to strømkredse tog Ampère udgangspunkt i centralkraften mellem infinitesimale strømelementer,  $ids$ .

Det næste skridt for Ampère var at beregne denne kraft. Ligesom Biot vidste han, at det kunne gøres ved at integrere kraften mellem infinitesimale strømelementer ( $i_1 ds_1$  og  $i_2 ds_2$ ) langs begge ledere. Som en god laplaciener antog han endvidere, at kraften mellem

strømelementerne var en centralkraft, som varierede med det inverse afstandskvadrat ligesom tyngdekraften og den elektrostatiske kraft [3, s. 73f]. Derudover var han nødt til at tage højde for de to strømelementers retning i forhold til hinanden. Det gjorde Ampères udtryk for kraften noget mere komplekst end for fx gravitationskraften:

$$d^2 F_{12} = \frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^2} (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \frac{1}{2} \cos \alpha \cos \beta)$$

hvor  $\alpha$ ,  $\beta$  og  $\gamma$  angiver vinklerne mellem strømelementerne. Men det havde stadig gode laplacienske træk, og kunne gøre rede for kraften og drejningsmomentet mellem lukkede strømkredse.

Takket være sin eminente eksperimenterkunst og skarpe matematiske analyse af fænomenet havde Ampère atter fået styr på den uorden, som Ørsteds opdagelse havde skabt i den etablerede fysiks opfattelse af, at verden består af små enheder, der påvirker hinanden med centrale kræfter.

De elektromagnetiske fænomener kunne imidlertid også forstås på en helt anden måde.

### Faraday og den elektromagnetiske induktion

På den anden side af Den Engelske Kanal hørte den selvlærte kemiker Michael Faraday også om elektromagnetismen. Men han kikkede først nærmere på fænomenet, da han i sommeren 1821 blev bedt om at skrive en oversigtsartikel over de eksperimenter og teorier, der var fremkommet siden Ørsteds opdagelse. Blandt de forskellige teorier fandt han Ampères mest overbevisende, selvom han ikke var begejstret for reduktionen af alle fænomener til centralkræfter.

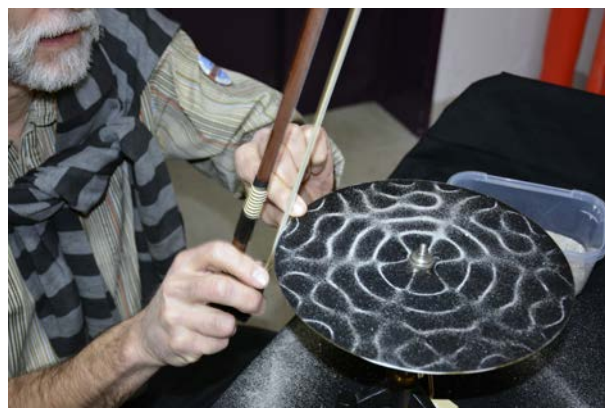


**Figur 2.** I Steno Museets samling findes der en rekonstruktion af Faradays rotationsapparat fra 1821. Til venstre ses enden af en magnet, hvis ene pol er fæstnet til bunden af et glas med kviksølv, mens den anden pol kan bevæge sig frit omkring ledningen. Til højre er det ledningen, der kan bevæge sig omkring en fast monteret magnet. Rotationsapparatet var verdens første elektromotor. Foto: Lise Balsby, AU Foto.

Han var mere tiltrukket af Ørsteds idé om, at den elektromagnetiske virkning var noget, som foregik rundt

om ledningen. Den antagelse blev kraftigt styrket, da det lykkedes ham at få den ene ende af en magnet til at rotere omkring en strømførende ledning, jf. figur 2. For dermed havde Faraday eksperimentelt vist, at der er en cirkulær kraft omkring en strømførende leder – og opfundet den første elektromotor.

I 1831 kastede Faraday sig atter over elektromagnetismen, hvilket førte til opdagelsen af den elektromagnetiske induktion. I tiden op til opdagelsen havde Faraday studeret klangplader og set, hvordan svingninger i en plade kunne få sandskorn til lægge sig i særlige mønstre. En dynamisk bølgebevægelse kunne altså skabe statiske strukturer.

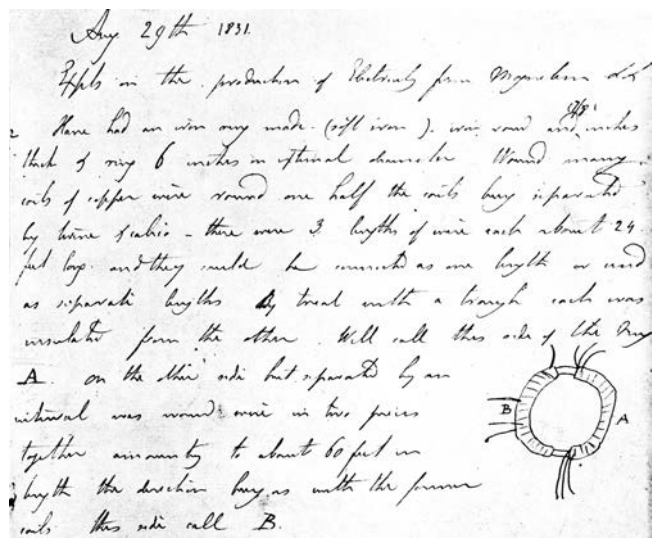


**Figur 3.** Faraday blev måske inspireret til opdagelsen af den elektromagnetiske induktion af såkaldte Chladni-mønstre svarende til det, forfatteren her har frembragt på en klangplade. Foto: Mary Marie Kromann.

Han var specielt fascineret af, at mønstre ved hjælp af resonans kunne dannes på én plade, ved at stryge på en tilsvarende plade i nærheden. Det gav ham den idé, at der måske blev dannet lignende magnetiske mønstre i en elektromagnet – og at de måske kunne påvirke en ledning i nærheden. For at undersøge det vikledede han et par ledninger rundt om modsatte sider af en jernring (se figur 4) – og konstruerede derved verdens første transformator. Hans hypotese var, at når strømmen begyndte at flyde i den ene ledning, så ville der udbrede sig en slags magnetisk bølge gennem ringen og forårsage en eller anden elektrisk effekt på den modsatte side. Og ganske rigtigt: Da han sluttede ledningen på den ene side til et batteri, kom der udslag på det galvanometer, han havde forbundet til den anden ledning. Det samme skete, når han afbrød strømmen. Derimod var der ingen virkning, når strømmen var konstant. Der var altså tale om et dynamisk fænomen [5].

Faraday fortsatte sine eksperimenter og opdagede, at der også blev dannet forbigående strømme, når han bevægede en stangmagnet ind i og ud af en spole. Det var altså *ændring* af magnetismen, som forårsagede strømmen. Til at forklare, hvorfor der på denne måde blev induceret en elektrisk strøm, indførte Faraday begrebet magnetiske kurver. Dermed hentydede han til de linjer, som bliver synlige, når man drysser jernspåner på et stykke papir oven på en magnet. Han opfattede linjerne som en slags spændingslinjer i rummet omkring magneten. På baggrund af sine eksperimenter og denne idé om magnetiske kraftlinjer kunne Faraday nu

sammenfatte sin opdagelse i den lovmæssighed, at der i en leder, som skærer en magnetisk kurve, fremkaldes en kraft på tværs af bevægelsen, som driver en strøm igennem lederen.



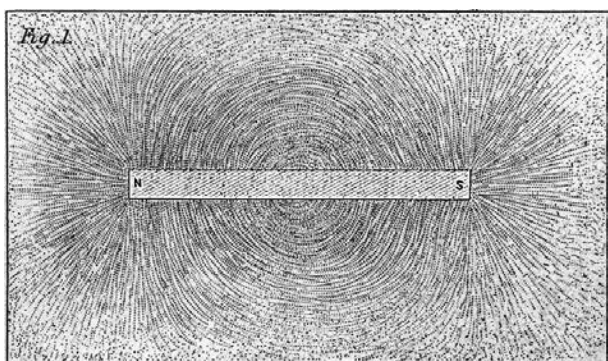
**Figur 4.** I sin dagbog beskrev Faraday grundigt den opstilling, hvormed han opdagede den elektromagnetiske induktion den 29. august 1831 [5].

Imponerende, at Faraday ikke blot opdagede induktionen, men med sine eksperimenter reelt opfandt både elektromotoren og dynamoen – og dermed i praksis lagde hovedhjørnesteinen for vores moderne gennemelektrificerede samfund.

### Feltbegrebets opståen

Med begrebet magnetisk kurve var Faraday også med til at etablere den forestilling om elektromagnetiske felter, som vi har i dag.

Oprindeligt var de magnetiske kurver nok primært et begrebsmæssigt hjælpemiddel. Men med tiden begyndte Faraday at tillægge de magnetiske kraftlinjer, som han nu kaldte dem, mere og mere fysisk realitet. Efterhånden betragtede han kraftlinjerne som en selvstændig, veldefineret fysisk tilstand i rummet omkring en magnet eller en strømførende ledning, som var lige så essentiel som magneten eller ledningen selv.



**Figur 5.** Faradays illustration af, hvordan jernspåner gør de magnetiske kraftlinjer omkring en magnet synlige. Han mente, at kraftlinjerne var lige så reelle som magneten [6].

Denne opfattelse fik han yderligere bekræftet, da han i 1845 opdagede, at en lysstråles polarisationsplan blev

drejet, når den passerede gennem et stykke glas, som var anbragt imellem polerne på en kraftig elektromagnet. Han mente, at han derved havde magnetiseret lysstrålen og fået den til at illuminere de magnetiske kraftlinjer. Fra dette tidspunkt begyndte Faraday at bruge begrebet magnetfelt [7].

For Faraday var påvisningen af en forbindelse mellem lys og elektromagnetisme en bekræftelse af hans – og Ørstedes – romantiske enhedstanke om, at alle naturkræfter er forbundne og har en fælles oprindelse. Lys kunne påvirkes af magnetisme, der kunne omdannes til elektricitet, der kunne skabe kemiske reaktioner ved hjælp af elektrolyse og så videre.

### Den elektromagnetiske induktion og fjernvirkningsteoriene

Faradays opdagelse af induktionen og ikke mindst hans rent kvalitative og billedlige forestilling om elektriske og magnetiske felter var en udfordring for de fysikere på kontinentet, som mente, at verden skulle forstås ud fra centrale fjernvirkningskræfter. Blandt dem var tyskeren Wilhelm Weber, som forsøgte at udvide Ampères teori til også at omfatte den elektromagnetiske induktion.

Weber tænkte overhovedet ikke i felter, men antog, at en elektrisk strøm består af modsat rettede strømninger af hhv. positive og negative elektriske partikler. Derfor mente han, at den kraft mellem strømelementer, som var beskrevet med Ampères kraftlov, måtte kunne udledes af den kraft, der virker mellem ladede partikler i bevægelse. Til det formål supplerede han Coulombs lov for kraften mellem ladede partikler med et led, som afhang af partiklernes indbyrdes hastighed ( $\dot{r}$ ). Derudover tilføjede han et led, som tog højde for deres indbyrdes acceleration ( $\ddot{r}$ ):

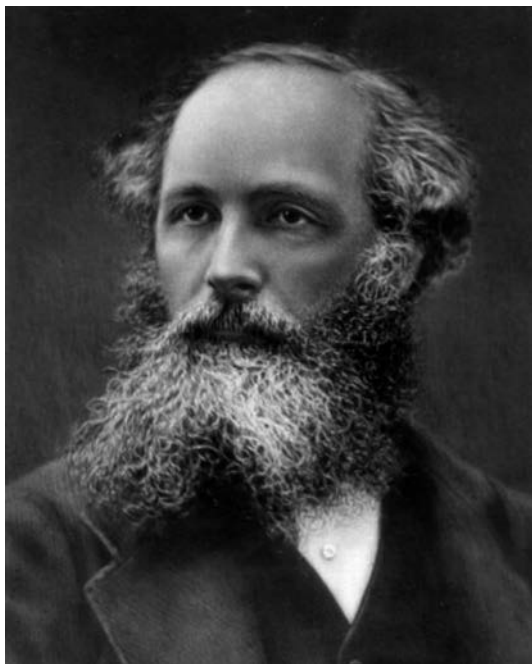
$$\mathbf{F}_{12} = \frac{q_1 q_2 \hat{\mathbf{r}}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left( 1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} + \frac{r\ddot{r}}{c^2} \right).$$

Ved hjælp af det sidste led kunne Weber også gøre rede for den elektromagnetiske induktion. På denne måde forenede han i 1846 elektrostatikken og de to grundlæggende elektrodynamiske love i en og samme kraftlov. I de følgende årtier udvidede Weber og andre tyske fysikere teorien til også at kunne forklare visse nyopdagede elektromagnetiske fænomener. Fx videreudviklede Carl Neumann i 1858 Webers kraftlov, så den også kunne forklare den magnetiske drejning af lysets polarisation, som Faraday havde opdaget.

Selvom teorierne var matematisk komplicerede, var det en stor tilfredsstillelse for mange fysikere, at Webers kraftlov med passende antagelser og tilføjelser kunne forklare alle elektriske og magnetiske fænomener, ligesom Newtons gravitationslov forklarede planeternes bevægelse.

### Maxwells elektromagnetiske lysteori

En væsentlig årsag til, at Faradays idéer om elektriske og magnetiske kraftlinjer ikke blev anerkendt, endsize brugt af fysikerne på kontinentet, er givetvis, at han aldrig havde lært matematik og derfor ikke var i stand til at fremføre sine idéer i en matematisk formulering.



**Figur 6.** James Clerk Maxwell (1831–1879) var den nok mest betydningsfulde teoretiske fysiker i det 19. århundrede. Han arbejdede bl.a. med gasteori, termodynamik, statistisk mekanik og udviklede den endegyldige teori for elektromagnetismen. På grund af dens betydning for udviklingen af relativitetsteorien mente Einstein, at Maxwells forståelse af feltbegrebet er, "det dybeste og mest frugtbare, fysikken har oplevet siden Newtons tid".

Det var der imidlertid andre britiske fysikere, som evnede. Den vigtigste var den unge skotte James Clerk Maxwell. For at kunne håndtere kraftlinjerne matematisk forestillede han sig en mekanisk analogi i form af en usammentrykkelig væske, der strømmede i et porøst medium. Så hvor Faraday havde tænkt på nogle diskrete kraftlinjer som tråde i rummet, forestillede Maxwell sig en kontinuert substans, som i ethvert punkt i rummet havde en vis strømningshastighed svarende til styrken af den elektriske eller magnetiske kraft lige der. Ud fra bevægelsesligningerne for sådanne væskestrømme, lykkedes det ham i 1855 i artiklen "On Faraday's lines of force" at udlede formler for alle statiske elektriske og magnetiske fænomener, som svarede til fjernvirkningsteoriernes udtryk. Ja, han kunne endda gøre rede for nogle effekter ved overgangen mellem forskellige materialer, som ikke kunne forklares med fjernvirkningsteoriene. På denne måde havde Maxwell transformeret Faradays uhåndgribelige kraftlinjer til et matematisk håndterbart feltbegreb, om end kun for statiske felter [8].

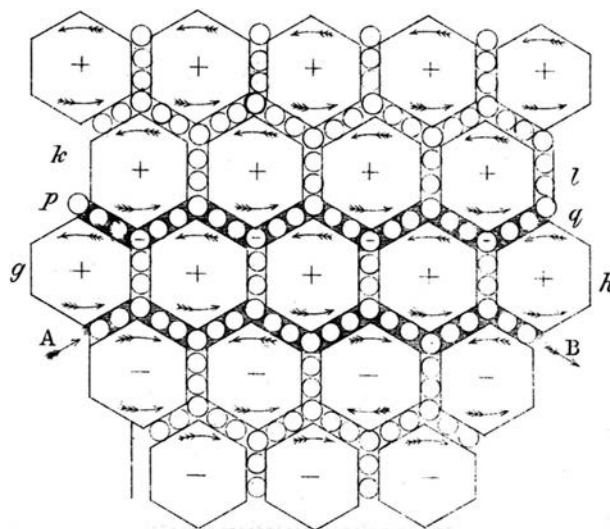
Det blev fysikeren William Thomson, den senere Lord Kelvin, som i 1856 fremsatte en idé, som gjorde det muligt for Maxwell at inkludere dynamiske fænomener, fx induktion, i sin feltteori. Thomson prøvede at forestille sig, hvordan de elektriske og magnetiske kraftlinjer manifesterede sig i den såkaldte æter, som var det hypotetiske, altgennemtrængende medium, som lys mentes at udbrede sig i. Hans idé var, at æteren bestod af nogle mikroskopiske dele, som roterede omkring de magnetiske feltlinjer. Han argumenterede derefter for, at disse hvirvler i æteren kunne påvirke lysbølger, som passerede dem. På den måde kunne han forklare den

drejning af lysets polarisationsplan, som Faraday havde observeret.

På baggrund af Thomsons hvirvelhypotese gik Maxwell i gang med at opstille en detaljeret mekanisk model for æteren, hvori felterne kunne opfattes som spændings- eller bevægelsestilstande:

Jeg foreslår nu at undersøge magnetiske fænomener fra et mekanisk synspunkt og at bestemme hvilke spændinger i eller bevægelser af et medium, der er i stand til at frembringe de observerede mekaniske fænomener. Hvis vi med denne hypotese kan forbinde magnetisk tiltrækning med elektromagnetiske fænomener såvel som inducerede strømme, vil vi have fundet en teori, som, hvis den ikke er sand, kun kan modbevises af eksperimenter, som i høj grad vil forøge vores viden om denne del af fysikken [9, Part I, 162].

Helt konkret forestillede Maxwell sig, at æteren bestod af nogle mikroskopiske celler, som kunne rotere, samt nogle endnu mindre partikler mellem cellerne, som kunne rulle (ligesom kuglerne i et kugleleje) og derved tillade naboceller at rotere samme vej. Cellernes rotation svarede til magnetfelter langs med rotationsaksen, mens partiklernes forskydning svarede til en elektrisk strøm. Tilsvarende repræsenterede cellernes massetæthed,  $\mu$ , den magnetiske permeabilitet. Han lod altså mekaniske fænomener repræsentere elektriske eller magnetiske fænomener.



**Figur 7.** Maxwells illustration af den mekaniske hvirvelmodel for æteren. [9, Part II, Pl. V].

Ved hjælp af en stringent matematisk beskrivelse af de mekaniske relationer i æteren kunne Maxwell nu simulere alle de elektriske og magnetiske fænomener, som Ørsted, Ampère og Faraday m.fl. havde opdaget.

For også at kunne gøre rede for isolatorers egenskaber fandt Maxwell på at tildele den mekaniske ætermodel elasticitet, hvilket han gjorde ved at indføre en elasticitetskonstant  $\epsilon$ . I den elektromagnetiske analogi af modellen svarede  $\epsilon$  til permittiviteten. Tilføjjelsen



af elasticitet til modellen havde overraskende konsekvenser. Hidtil havde de små partikler, som svarede til en elektrisk strøm, kun kunnet bevæge sig ved at cellerne roterede, men hvis cellerne var elastiske, kunne partiklerne også bevæges ved at deformere cellerne. Denne forskydning af partiklerne, som svarede til en strøm, gav dermed anledning til et ekstra bidrag til Ampères lov. Det er således de fysiske egenskaber ved Maxwells mekaniske ætermodel, som leder ham til den korrekte erkendelse af den såkaldte forskydningsstrøm. Med tilføjelsen af den kunne modellen forklare alle kendte elektromagnetiske fænomener.

Hvirvelmodellen rummede imidlertid en endnu større overraskelse. Fra den mekaniske fysik vidste Maxwell, at der i et elastisk medium kan udbrede sig en transversal bølge, hvis udbredelseshastighed er bestemt af mediets elasticitet og massetæthed:

$$v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon\mu}}$$

Disse to størrelser svarede som nævnt til permittiviteten og den magnetiske permeabilitet, og da begge disse størrelser for nyligt var blevet bestemt eksperimentelt, kunne han nemt beregne, hvor hurtigt en transversal bølge ville udbrede sig i æteren. Det gav en værdi, som lå meget tæt på lysets hastighed. Derfor var Maxwell nødt til at konkludere, at

Hastigheden af transversale bølgebevægelser i vort hypotetiske medium, beregnet fra d'Hr. Kohlrausch og Webers elektromagnetiske eksperimenter, stemmer så nøjagtigt overens med lysets hastighed, beregnet fra Hr. Fizeaus optiske eksperimenter, at vi næppe kan undgå den slutning, at *lyset består i transversale bølgebevægelser af det samme medium, som er årsagen til de elektriske og magnetiske fænomener* (Maxwells kursivering) [9, Part III, 22].

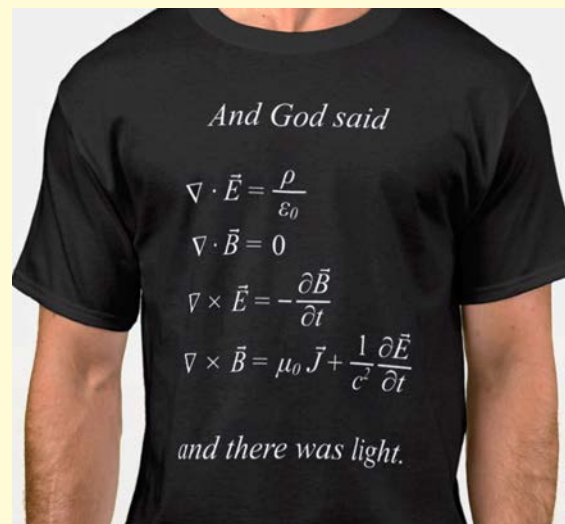
Maxwell præsenterede sin ætermodel og de deraf følgende resultater i artiklen "On Physical Lines of Force", som udkom i fire dele i 1861–62 [10]. Denne artikel regnes af mange blandt de mest betydningsfulde i fysikkens historie. Ud over erkendelsen af lys som et elektromagnetisk fænomen præsenterede artiklen også den første formulering af de relationer, som vi i dag kalder Maxwells ligninger. De var ganske vist spredt ud over artiklen, men gav ikke desto mindre Faradays billedlige feltbegreb en konsistent matematisk formulering, som indledte en helt ny æra i den klassiske elektrodynamik.

### Maxwells ligninger

Maxwell hvilede ikke på laurbærrerne, men blev ved med at forbedre sine elektromagnetiske teorier. Specielt ville han gerne undgå at gøre sig så konkrete forestillinger om, hvordan æteren var indrettet. Derfor begyndte han forfra og reformulerede hele teorien ved hjælp af Lagranges generaliserede mekanik. Det tillod ham at opstille bevægelsesligningerne for ætermodellen, uden

### Maxwells ligninger

Maxwells ligninger er ikke blot centrale for forståelsen af elektromagnetismen. De er også blandt de få ligninger, som er vidt udbredt på t-shirts og kaffekopper.



Her ses de i moderne vektornotation. Den første ligning kaldes også Gauss' lov og udtrykker sammenhængen mellem et elektrisk felt ( $\mathbf{E}$ ) og den elektriske ladning ( $\rho$ ), der skaber det. Coulombs kraftlov kan udledes af denne ligning.

Den anden ligning kaldes Gauss' lov for magnetisme. Den udtrykker, at der ikke findes magnetiske ladninger, også kaldet magnetiske monopoler.

Den tredje ligning udtrykker Faradays induktionslov, idet den viser, at et magnetfelt ( $\mathbf{B}$ ), som varierer over tid, skaber et elektrisk felt.

Den fjerde og sidste ligning viser, at et magnetfelt kan skabes på to måder: enten af en elektrisk strøm ( $\mathbf{J}$ ), som Ampère sagde, eller ved at et elektrisk felt varierer over tid, hvilket skaber den såkaldte forskydningsstrøm, som Maxwell tilføjede.

Symmetrien i de to nederste ligninger giver mulighed for elektromagnetiske bølger: et varierende magnetfelt skaber et elektrisk felt og vice versa. Disse bølger udbreder sig med lysets hastighed,  $c$ , da de elektriske og magnetiske naturkonstanter  $\epsilon_0$  og  $\mu_0$  kan kombineres til at give lyshastigheden.

at han behøvede et detaljeret kendskab til de mekaniske koblinger mellem æterens dele. Derved kunne han flytte fokus fra de mekaniske analogier til felterne i sig selv i beskrivelsen af de elektromagnetiske fænomener.

De nye resultater blev publiceret i 1865 i den lange artikel "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field", som bestod af hele syv dele [11; 12]. I tredje del, "General Equations of the Electromagnetic Field", præsenterede Maxwell teoriens 20 grundligninger i en

matematisk form, som minder om det, vi i dag kender som Maxwells ligninger.

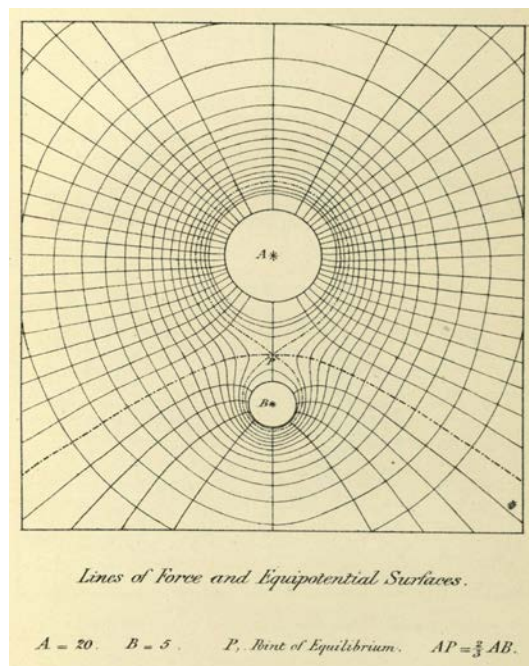
Her vil nogle læsere måske tænke, at det er alt for mange ligninger. Forklaringen på det høje antal er dels, at Maxwell havde separeret led, som i dag er integreret i én ligning, dels og især – at Maxwell ikke kendte den moderne vektornotation og derfor behandlede de tre rumlige koordinater hver for sig. Den moderne formulering af Maxwells ligninger i form af fire vektorielle differentiaalligninger blev foretaget af den engelske ingeniør og fysiker Oliver Heaviside i 1884.

Det er også i 1865-artiklen, at Maxwell bruger sin tilføjelse til Ampères kredsløbslov, forskydningsstrømmen, til at udlede den elektromagnetiske bølgeligning. Den overbeviser ham endegyldigt om, at lys er elektromagnetiske bølger, som udbreder sig i æteren med lysets hastighed:

... det ser ud til, at vi har stærk grund til at konkludere, at lys (inklusiv strålevarme og anden form for stråling, hvis den findes) er en elektromagnetisk forstyrrelse i form af bølger, der forplanter sig gennem det elektromagnetiske felt i henhold til de elektromagnetiske love [13].

Ligesom Ørsted med sin opdagelse havde forenet elektricitet og magnetisme til ét samlet fænomen, havde Maxwell med sin teori et halvt århundrede senere forenet elektrodynamikken og optikken. Det var en monumental triumf, for med identifikationen af lys som elektromagnetisk stråling, havde Maxwell givet et solidt fysisk grundlag for bølge teorien for lys, som kunne redegøre for fænomener som refleksion, brydning og polarisation. Med sin påstand om, at elektromagnetiske kræfter udbreder sig med en endelig hastighed, var Maxwells teori ydermere et stærkt argument imod fjernvirkningsteoriene med deres påstand om øjeblikkeligt virkende kræfter.

En oversigtsartikel som denne giver desværre kun plads til at skitsere udviklingens hovedlinjer. Det skal dog nævnes, at der i elektromagnetismens “uvejsomme ørken” også fremkom teorier, som ikke byggede på nogen af de ovennævnte positioner. Eksempelvis publicerede den danske fysiker Ludvig Lorenz i 1867 en elektromagnetisk lysteori, som hverken var baseret på fjernvirkningskræfter, feltbegrebet eller æteren, som han betragtede som en både uvidenskabelig og unødvendig ad hoc hypotese. I stedet tog han udgangspunkt i de elektriske og magnetiske potentialer fra hhv. ladninger og strømme. Herunder introducerede han begrebet retarderede potentialer for at tage højde for, at ændringer i potentialet bruger tid til at udbrede sig. Desuden antog han, at lysets svingninger var en form for elektriske strømme i det (næsten) tomme rum. På dette grundlag udviklede han – uden at kende Maxwells teori – en elektrodynamisk lysteori, som var matematisk ækvivalent med Maxwells, selvom dens fysiske grundlag var et helt andet. Lorenz’ teori var kendt blandt fagfolk, men vandt aldrig indpas. Den såkaldte Lorenz gauge-betingelse, som han indførte, bruges dog stadig i avanceret elektrodynamik [14].



**Figur 8.** Maxwell videreudviklede og samlede alle sine elektromagnetiske teorier i tobindsværket *A Treatise on Electricity and Magnetism* fra 1873. Heri gav han blandt meget andet eksempler på kraftlinjer og ækvipotentialflader omkring forskellige ladningskonfigurationer [15].

### Den elektromagnetiske feltteoris gennembrud

I flere årtier var de elektromagnetiske bølger blot et teoretisk postulat, og det tog ganske lang tid, inden Maxwells feltteori slog igennem. Det skyldtes bl.a., at feltbegrebet var meget fremmedartet for mange klassisk skoledede fysikere. Men i 1890’erne formåede den tyske fysiker Heinrich Hertz at påvise elektromagnetiske bølger eksperimentelt. Det bidrog til fysikernes udbredte accept af Maxwells ligninger. Påvisningen af de elektromagnetiske bølger førte også hurtigt til opfindelsen af den trådløse telegraf og senere radioen.

Det ændrede dog ikke på, at fysikerne stod med to stærke og fuldstændig forskellige teorier om elektromagnetismen: Webers teori, der indeholdt elektriske partikler, men ingen felter, og Maxwells teori, der indeholdt felter, men ingen elektriske partikler.

De kontinentale tilhængerne af Webers teori anførte, at den gav et klart billede af elektrisk ladning og strøm som hhv. ophobning og bevægelse af elektriske partikler. De britiske modstandere af teorien havde derimod svært ved at acceptere postulatet om kræfter, som virkede over afstand gennem et tomt og passivt rum. Tilsvarende havde de kontinentale fysikere svært ved at forlige sig med Maxwells udstrakte felter, der var fyldt med “elektricitet”, som oven i købet kunne forskydes gennem æteren.

Det tilsyneladende paradoks mellem de to anskueliserformer blev løst af den hollandske fysiker Hendrik A. Lorentz, der i 1890’erne udviklede en elektronteori, som han kombinerede med Maxwells feltteori. Derved blev det muligt at opfatte ladede partikler som kilder til felterne. Tilsvarende kunne felterne udøve en kraft på partiklerne. På denne måde kunne han integrere partikel- og feltperspektivet.

## Kelvins to skyer

Selvom Maxwell i udviklingen af sin elektromagnetiske feltteori bevægede sig stadig længere væk fra konkrete forestillinger om æterens beskaffenhed, forlod han aldrig idéen om, at lyset nødvendigvis måtte udbrede sig i et eller andet.

Men æteren var en ubekvem substans, som fysikerne mod slutningen af 1800-tallet fik stadig vanskeligere ved at beskrive [16]. Efterhånden som de afslørede nye aspekter af naturen, var de gang på gang nødt til at justere æterens påståede egenskaber for at lave konsistente beskrivelser. Og flere af de nødvendige egenskaber var direkte selvmodsiggende. Fx måtte æteren være en masseløs væske uden viskositet for ikke at bremse legemer, som bevægede sig i den, til eksempel Jorden og alt derpå. Samtidig vidste man, at transversale bølger, som lysbølger jo er, kun kan eksistere i faste stoffer. Ja, æteren var endda nødt til at være meget stivere end stål for at understøtte lysbølgernes høje frekvenser. Den skulle også være fuldstændig gennemsigtig, siden lyset fra selv de fjerneste stjerner ikke blev dæmpet – og sådan kunne man blive ved.

Det var endvidere en forudsætning for Maxwells ligninger, at æteren udgjorde en fast universel referenceramme. Derfor burde det være muligt at måle Jordens bevægelse igennem æteren, men det var aldrig lykkedes trods mange forsøg. Her kan specielt nævnes det berømte interferens eksperiment fra 1887, hvor Albert A. Michelson og Edward W. Morley ikke kunne måle nogen forskel i hastigheden af lysstråler som bevægede sig hhv. på tværs af og langs med Jordens bevægelse gennem æteren.

Problemet var så stort, at William Thomson – som nu var adlet til Lord Kelvin – i 1900 identificerede æteren som det ene af fysikkens to største problemer på det tidspunkt:

Skønheden og klarheden af den dynamiske teori, der betragter varme og lys som bevægelsesformer, er i øjeblikket sløret af to skyer. Den første opstod med bølge teorien for lys [...]; det involverede spørgsmålet om, hvordan Jorden kunne bevæge sig gennem et elastisk fast stof, sådan som lysæteren blev antaget at være? Den anden er Maxwell-Boltzmann-doktrinen om fordelingen af energi [17].

Efter at have diskuteret forskellige utilstrækkelige løsninger på æterproblemet konkluderede Kelvin tørt, at “Jeg er bange for, at vi fremdeles må betragte den første sky som meget tæt.”

## Einstein “afskaffer” æteren

Skyen blev først opløst i 1905, da Albert Einstein udgav sin epokegørende artikel “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, hvori han fremsatte den specielle relativitetsteori [18]. Ud over æterproblemet tog han, som titlen antyder, udgangspunkt i det forhold, at Maxwells feltteori førte til utilfredsstillende asymmetriske beskrivelser i forbindelse med bevægede legemer. Han nævner

således, at den detaljerede fysiske beskrivelse af, hvad der sker, når en ledning og en magnet bevæges i forhold til hinanden, afhænger af, om den ene eller den anden er i hvile, selvom den observerede virkning udelukkende afhænger af deres relative bevægelse.

Men Einstein var af den dybe overbevisning, at de fysiske love måtte have samme form i ethvert bevægelsessystem. Derudover antog han, at lyset i det tomme rum altid udbreder sig med en ganske bestemt hastighed uanset lyskildens hastighed. Uden at komme nærmere ind på hans argumentation her, førte disse antagelser til en erkendelse af, at lysæteren slet ikke var nødvendig for at konstruere en enkel og konsistent elektrodynamisk teori for bevægelige legemer på grundlag af den Maxwellske teori for legemer i hvile.

Populært sagt “afskaffede” Einstein altså den æter, som var udgangspunktet for Maxwells elektrodynamiske feltteori. Det varede dog længe, før den forsvandt fra fysikken. Men han afskaffede på ingen måde det feltteoretiske begrebsapparat. Tværtimod blev det en helt nødvendig forudsætning for hans bestræbelser i de følgende år på at inkludere gravitationen i relativitetsteorien. Det førte i 1915 til den generelle relativitetsteori, hvor Einstein også “afskaffede” tyngdekraften som en fjernvirkningskraft, der på besynderlig vis kan virke gennem et passivt rum. I stedet skabte han en feltteori, hvori en masse krummer rumtiden omkring sig og derved skaber et gravitationsfelt, som vekselvirker med enhver anden masse, som befinder sig i det.

Einstein var meget bevidst om sin inspiration og lagde ikke skjul på, at han stod mere i gæld til Maxwell end til nogen anden, ganske enkelt fordi han med sin feltteori ændrede fysikkens syn på verden. Indtil da, havde man ikke kunnet forestille sig andet end mekaniske forklaringer på alle fænomener.

Så kom den store forandring, som til alle tider vil være forbundet med navnene Faraday, Maxwell og Hertz. Men hovedæren for denne revolution tilfaldt Maxwell. Han viste, at alt det, man dengang vidste om lys og elektromagnetiske fænomener, kom til udtryk i hans velkendte dobbeltsystem af differentilligninger, hvor de elektriske og magnetiske felter optræder som de afhængige variable. Maxwell forsøgte faktisk at forklare eller retfærdiggøre disse ligninger med intellektuelle konstruktioner. Men [...] ligningerne i sig selv fremstod som det væsentlige og felternes styrke som de basale størrelser, der ikke kan reduceres til noget andet [19].

Denne udvikling betød, at laplacianernes forestilling om, at verden består af partikler, som på uforklarlig vis påvirker hinanden på afstand, ikke kunne opretholdes. I stedet indførte Maxwell med sine feltteorier idéen om, at verdens fysiske realitet kan repræsenteres af kontinuerte felter, som ikke kan forklares mekanisk, men beskrives fuldstændigt med partielle differentilligninger. En idé som siden har vist sig uhyre effektiv til at beskrive materien og kræfterne i verden.



## Litteratur

- [1] Han brugte udtrykket “unwegsamen Wüste” jf. H. Helmholtz (1894) “Vorwort” i H. Hertz, *Prinzipien der Mechanik*, Barth.
- [2] En god oversigt kan findes i O. Knudsen (1987) *Elektromagnetisme 1820–1900*, Steno Museets Venner.
- [3] A. Assis og J.P. Chaib (2015) *Ampère’s Electrodynamics*, Apeiron.
- [4] A. Skaar Jacobsen (2019) “Den første udforskning af elektromagnetismen: Ørsted og Ampère”, *Kvant*, bind 30, nr. 4, side 20–25.
- [5] L. Pearce Williams (1965) *Michael Faraday. A Biography*, Chapman and Hall.
- [6] M. Faraday (1852) “Experimental Researches in Electricity. – Twenty-Ninth Series”, *Philosophical Transactions*, bind 142, Plate IX.
- [7] L. Pearce Williams (1966) *The Origins of Field Theory*, Random House.
- [8] B. Mahon (2003) *The Man Who Changed Everything: The Life of James Clerk Maxwell*, Wiley.
- [9] J.C. Maxwell (1861–62) “On Physical Lines of Force”, *Philosophical Magazine*, bind 21 og 23.
- [10] Artiklen kan ses på [https://en.wikisource.org/w/index.php?title=On\\_Physical\\_Lines\\_of\\_Force&oldid=2412587](https://en.wikisource.org/w/index.php?title=On_Physical_Lines_of_Force&oldid=2412587).
- [11] M. Longair (2015) “... a paper ... I hold to be great guns’: a commentary on Maxwell (1865) ‘A dynamical theory of the electromagnetic field’ ”, *Philosophical Transactions*, bind A 373, side 20140473.
- [12] Artiklen kan ses på [https://en.wikisource.org/w/index.php?title=A\\_Dynamical\\_Theory\\_of\\_the\\_Electromagnetic\\_Field&oldid=11356624](https://en.wikisource.org/w/index.php?title=A_Dynamical_Theory_of_the_Electromagnetic_Field&oldid=11356624).
- [13] J.C. Maxwell (1865) “A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field”, *Philosophical Transactions*, bind 155, side 466.
- [14] H. Kragh (2018) “Ludvig Lorenz and His Non-Maxwellian Electrical Theory of Light”, *Phys. Perspect.*, bind 20, side 221–253.
- [15] J.C. Maxwell (1873) *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Clarendon Press.
- [16] B.G. Doran (1975) “Origins and Consolidation of Field Theory in Nineteenth-Century Britain: From the Mechanical to the Electromagnetic View of Nature”, *Historical Studies in the Physical Sciences*, bind 6, side 133–260.
- [17] O. Passon (2021) “Kelvin’s clouds”, *American Journal of Physics*, bind 89, side 1037.
- [18] A. Einstein (1905) “Zur Elektrodynamik bewegter Körper”, *Annalen der Physik*, bind 17, side 891–921.
- [19] Albert Einstein (1934) “Clerk Maxwell’s Influence on the Evolution of the Idea of Physical Reality”, *Essays in Science*, Philosophical Library, side 43.



Hans Buhl er cand.scient. i musik og fysik samt ph.d. i teknologihistorie. Han arbejder som museumsinspektør for videnskabshistorie ved Steno Museet, som er en del af Science Museerne ved Aarhus Universitet.

**PFEIFFER VACUUM**

**Nyhed**

**Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m<sup>3</sup>/t)  
Ekstrem lyd- og vibrationssvag  
pumpe med kompakt design**



Tlf. 3166 8708

Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk  
[www.pfeiffer-vacuum.com](http://www.pfeiffer-vacuum.com)

## Nyt fra Astronomisk Selskab



Den årlige generalforsamling i Astronomisk Selskab afholdes lørdag den 2. april 2022 kl. 11.00 i Niels Bohr Bygningen, Rådmandsgade 60, 2200 København.

Program:

Kl. 11.00-11.45: Foredrag om *Altings Endeligt* ved Jophiel Wiis

Kl. 11.45-12.30: Frokost (Sandwich)

Kl. 12.30-13.30: Generalforsamling

Tilmelding:

Alle medlemmer kan deltage i generalforsamlingen, men man bedes tilmelde sig senest fredag den 1. april 2022 inden kl. 12 via mail til Christina Toldbo på [christina.toldbo@astronomisk.dk](mailto:christina.toldbo@astronomisk.dk) med “GF 2022” i emnefeltet. Har man allergier/ønsker i forbindelse med sandwich bedes dette oplyst i samme omgang.