

ELEKTRO- MAGNETISMEN

- opdagelse og udforskning

Om forfatteren



Hans Buhl er samlingsleder og museumsinspektør for videnskabshistorie på Steno Museet/Science Museerne ved Aarhus Universitet. hans.buhl@sm.au.dk

I Steno Museets udstilling *Det nysgerrige menneske* kan man se en rekonstruktion af Ørstedes berømte forsøg. Bag ledningen ses afhandlingen "Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam" ("Forsøg over den elektriske Vexelkamps Indvirkning paa Magnetnaalen"), hvori Ørsted den 21. juli 1820 offentliggjorde opdagelsen af elektromagnetismen.

Foto: Hans Buhl.

Elektromagnetismen blev opdaget af den danske videnskabsmand H.C. Ørsted i foråret 1820. Opdagelsen åbnede et helt nyt felt inden for fysikken, som blev udforsket både eksperimentelt og teoretisk. Der gik over et halvt århundrede, inden fysikerne for alvor forstod fænomenet.

Da Ørsted gjorde sin store opdagelse, havde naturforskere studeret elektriske og magnetiske fænomener i et par hundrede år. Så man havde efterhånden en god fornemmelse af, hvordan kompasser og magneter opførte sig. Der var også opfundet både elektrisermaskiner og batterier, som gjorde det muligt at undersøge korte, kraftige udladninger af statisk elektricitet såvel som effekten af vedvarende strømme.

I 1780'erne var det endda lykkedes den franske fysiker Charles-Augustin de Coulomb at måle, at kraften mellem ladede kugler var proportional med kvadratet på afstanden imellem dem. De elektriske kræfter fulgte altså den samme matematiske lovmæssighed, som Newton havde fundet for tyngdekraften.

Bortset fra nogle fællestræk med hensyn til frastødning og tiltrækning

samt den erfaring, at lynnedslag kunne påvirke magnetnåle i nærheden, var der ikke noget, der tydede på nogen forbindelse mellem elektricitet og magnetisme. Derfor var de franske fysikere, som var tidens førende, overbeviste om, at de to fænomener intet havde med hinanden at gøre. H.C. Ørsted delte imidlertid ikke denne opfattelse. Så meget desto mere var opdagelsen af elektromagnetismen en stor triumf for ham.



H.C. Ørsted

Hans Christian Ørsted (1777-1851) var en dansk fysiker, kemiker, farmaceut og naturfilosof. Han voksede op i Rudkøbing på Langeland, hvor hans far var apoteker. Dette gav Ørsted interesse for kemi, og i 1797 blev han selv farmaceut. Han besvarede desuden to prisopgaver: en om æstetik og en om kemi. I 1799 blev han doktor på en afhandling om Immanuel Kants naturfilosofi.

Efter en studierejse til Tyskland og Frankrig i 1801-03 underviste han i fysik ved Københavns Universitet, fra 1806 som professor. I flere perioder virkede han endvidere som rektor for universitetet. I 1808 blev Ørsted medlem af Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, hvori han fra 1815 til sin død var sekretær. I 1829 oprettede Ørsted Den Polytekniske Lærestanstalt for at styrke forbindelsen mellem videnskaben og det praktiske liv.

Flere af Ørsteds mange forskningsområder fremgår af Eckersbergs maleri: Ud over batteriet i baggrunden og kompasnålen på bordet ses til højre hans piezometer til måling af væskers sammentrykkelighed. Messingpladen i hånden brugte han til at lave klangfigurer ved hjælp af violinbuen. Herudover isolerede han grundstoffet aluminium i 1825.



Oliemaleri af C.W. Eckersberg, 1822. Foto: Wikimedia/Teknisk Museum/SNU.

Ørsted var stærkt optaget af at skabe almen interesse for naturvidenskaben, og derfor stiftede han i 1824 Selskabet for Naturlærens Udbredelse, som stadig bedriver naturvidenskabelig folkeoplysning. Han opfandt også cirka 2.000 nye

ord. Nogle var videnskabelige, eksempelvis ilt, brint, rumfang, vægtfylde, skæringspunkt og klangbund. Andre var mere almene som sammendrag, autoritetstro, mindretal, billedkunst, ildsjæl, og drømmeverden.

Rationalisme vs. naturromantik

Som fysiker og kemiker var Ørsted stærkt præget af den naturromantiske verdensanskuelse, som med inspiration fra den tyske filosof Immanuel Kant spredte sig i Nordeuropa i begyndelsen af 1800-tallet.

Naturromantikken var en antimaterialistisk og holistisk modstrømning til den etablerede, rationalistiske fysik. De traditionelle fysikere baserede sig på nøjagtige måleresultater og betragtede dybest set verden som en samling af materielle atomer, der påvirkede hinanden med centrale kræfter, som kunne beskri-

ves matematisk. Derfor opfattede naturromantikerne disse fysikere som ensporede og åndløse atomister, der manglede blik for de store sammenhænge i naturen.

Naturromantikerne mente derimod, at alt omkring os skulle forstås ud fra to modsatrettede grundkræfter: en frastødende og en tiltrækkende. Materien og de vidt forskellige naturfænomener var således bare forskellige fremtrædelsesformer af disse fundamentale kræfter. Naturforskernes opgave bestod følgelig i at afdække denne grundlæggende enhed

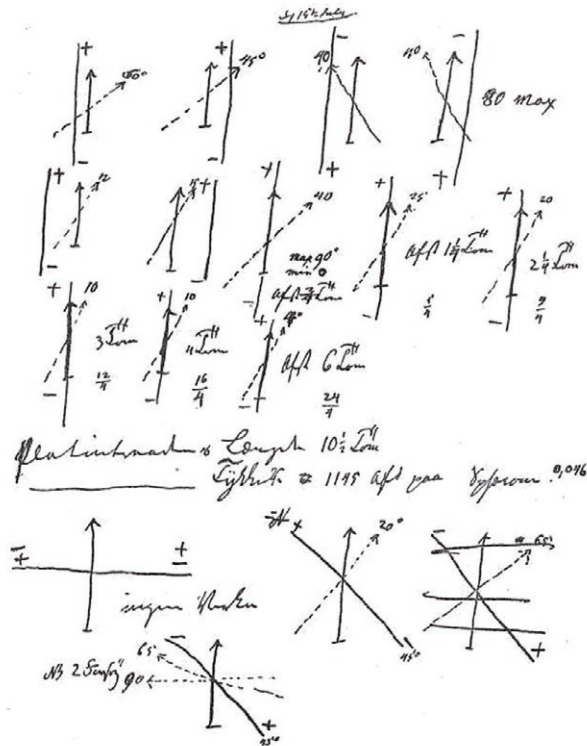
i naturen, der i sidste ende var af guddommelig oprindelse.

En både forventet og overraskende opdagelse

På den baggrund var det helt naturligt for Ørsted at filosofere over en sammenhæng mellem de elektriske og magnetiske kræfter. Allerede i 1812 havde han skrevet om, at den elektriske strøm kunne have en magnetisk virkning, men ikke undersøgt det nærmere.

I begyndelsen af 1820 fik han den ide, at en eventuel magnetisk virkning måtte stråle ud til alle sider fra

Ørsted var ikke bare en spekulativ naturromantiker, men også en omhyggelig og erfaren eksperimentator. Hans laboratorieoptegnelser viser, hvordan han for eksempel undersøgte magnetnåleens udslag som funktion af ledningens afstand til nålen. Når afstanden vokser fra $\frac{3}{4}$ " til 6" formindskes udslaget fra 40° til 4° . Kilde: H.C. Ørsted, *Naturvidenskabelige Skrifter*.



en ledning, ligesom ledningen udsårlede lys og varme, når den blev gennemløbet af så kraftig en strøm, at den blev rødglødende.

Under en forelæsning i foråret 1820 så Ørsted faktisk også en svag bevægelse af en kompasnål, da han førte en strømførende platintråd hen over den. Det gjorde dog ikke større indtryk på tilhørerne. På grund af travlhed med undervisning, opgaveretning og administration var det først i juli, han fik lejlighed til at gentage forsøget. Denne gang med et meget kraftigere batteri – og i overværelse af troværdige vidner.

Nu var der ingen tvivl: Magnetnålen slog kraftigt ud til siden, når der løb strøm i en ledning over eller under den. Ørsted havde opdaget elektromagnetismen.

Han undersøgte fænomenet grundigt og offentliggjorde resultaterne i et firesiders, latinsk flyveskrift, som udkom den 21. juli 1820. Heri konkluderede han, »at den elektriske Vexelkamp ikke indesluttes i Lederen, men [...] udbreder sig i det omliggende Rum«, samt »at denne Virkning skeer i Kredsen om Lederen«.

Ud over selve forbindelsen mellem elektricitet og magnetisme var det mest overraskende ved opdagelsen, at de magnetiske kræfter stod vinkelret på ledningen. Ørsted havde altså opdaget en helt ny form for naturkraft, som tilsyneladende var i direkte modstrid med de franske fysikers forestilling om, at naturkræfter altid virker langs med forbindelseslinjen mellem de objekter, der påvirker hinanden.

En blandet modtagelse

Ørsted sendte straks sin afhandling til et halvt hundrede lærde kolleger i Europa. I Tyskland blev afhandlingen ikke overraskende godt modtaget, hvorimod de franske fysikere var skeptiske. Det var måske ikke så underligt, for de mente jo ikke, at det påståede fænomen kunne eksistere. Velkendte med Ørsteds naturromantiske forestillinger betragtede de det som endnu et tysk drømmeri.

Men så snart de havde eftergjort forsøget, måtte de erkende, at den var god nok, og i løbet af kort tid satte Ørsteds opdagelse gang i en intens udforskning af elektromagnetismen.

Ampère og elektrodynamikken

André-Marie Ampère var en af de forskere, som kastede sig over opgaven med størst ildhu. Blot to uger efter han havde hørt om Ørsteds eksperiment, opdagede han, at to strømførende ledninger kunne påvirke hinanden uden medvirken af en magnet. For at afprøve en ide havde han konstrueret et apparat med to parallelle ledere, hvoraf den ene var monteret, så den frit kunne bevæge sig. Det viste sig, at de to ledere tiltrak hinanden, når strømmen løb samme vej i dem, mens de frastødte hinanden, når strømmene var modsatrettede. De to strømførende ledere opførte sig altså ligesom to magneter ville gøre. Inden længe fremsatte Ampère den dristige antagelse, at al magnetisme har sin oprindelse i elektriske strømme.

I de følgende år udviklede han en matematisk lov for kraften mellem to infinitesimale (dvs. uendeligt små) strømelementer. Kraften viste sig at aftage med kvadratet på afstanden mellem strømelementerne. Den havde altså samme struktur som tyngdekraften og de elektriske kræfter. Gennem sin matematiske analyse af fænomenet var det lykkedes Ampère at genoprette den uorden, som Ørsteds opdagelse havde skabt i den etablerede fysiks opfattelse af, at verden består af partikler, som påvirker hinanden med centrale kræfter.

Ampères ideer blev videreudviklet af en række fysikere, ikke mindst tyskeren Wilhelm Weber, som antog, at elektrisk strøm består af ladede partikler i bevægelse. Ad denne vej lykkedes det ham midt i 1800-tallet at forene Coulombs lov og de elektrodynamiske love i en og samme kraftlov. Mange fandt det tilfredsstillende, at Webers kraftlov nu kunne forklare alle elektriske og magnetiske fænomener, ligesom Newtons gravitationslov forklarede planeternes bevægelse.

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 fulgte den selv lærte kemiker Michael Faraday interesseret med i udforskningen af elektromagnetismen. Han var – ligesom Ørsted – ikke begejstret for reduktionen af alle fænomener til centralkræfter.

Han var mere tiltrukket af Ørsteds ide om, at den elektromagnetiske virkning hovedsageligt var noget, som foregik rundt om ledningen. Antagelsen blev styrket af, at han i 1821 formåede at lave et apparat, hvor en magnet roterede omkring en strømførende leder. Dette princip er videreudviklet til vor tids allestedsnærværende elektromotorer, som står for omkring halvdelen af det globale elforbrug.

Af endnu større betydning var det, at Faraday i 1831 opdagede, at der bliver skabt en elektrisk strøm, når man ændrer magnetfeltet i en spole. Så hvor Ørsted havde vist, at strøm kan bevæge en magnet, havde Faraday vist det omvendte: at bevægelse af en magnet kan skabe strøm. Elektromagnetisk induktion står i dag for over 90 % af al strøm, som produceres på Jorden.

Elektromagnetiske felter

Faraday formulerede induktionsfænomenet således, at der i en ledning, som skærer en "magnetisk kurve", fremkaldes en kraft, som



I Steno Museets samling findes der en rekonstruktion af Faradays rotationsapparat fra 1821. Til venstre bevæger magneten i glasset med kvik sølv sig rundt om ledningen, når der løber strøm igennem den. Til højre er det ledningen, der bevæger sig. Rotationsapparatet var verdens første elektromotor. Foto: Lise Balsby, AU Foto.

driver en strøm igennem ledningen. Med begrebet magnetisk kurve var han med til at etablere den forestilling om elektromagnetiske felter, som vi har i dag.

For Faraday var feltlinjerne i rummet omkring en magnet eller en strømførende ledning lige så reelle som magneten eller ledningen selv. Det sås blandt andet ved, at feltlinjerne kunne synliggøres med jernfilspåner på et stykke papir.

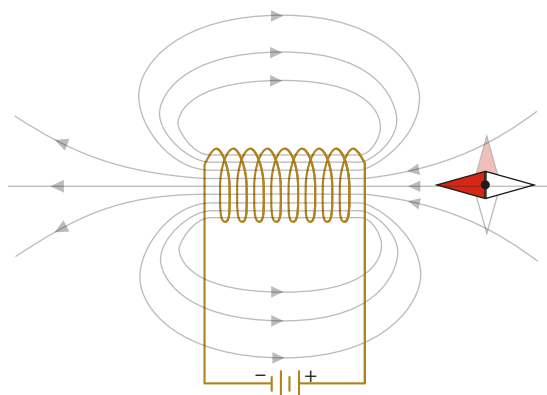
Ligesom Ørsted var Faraday ikke

særlig god til matematik, så hans teori var rent billedlig. Men fra midten af 1800-tallet forsøgte flere britiske fysikere at udtrykke den matematisk. Ikke mindst skotten James Clerk Maxwell fik i løbet af et par årtier udviklet en sammenhængende feltteori for elektromagnetiske fænomener.

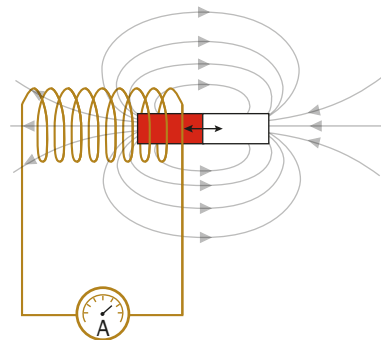
Maxwells ligninger og lysbølgerne

Maxwell tog udgangspunkt i den såkaldte æter, som var det hypotetiske, altgennemtrængende medium, alle kræfter mentes

Udstilling: Jubilæumsudstillingen "H.C. Ørsted på ny-skønheden i naturen", som er arrangeret af Selskabet for Naturlærens Udbredelse, kan ses i Rundetårn indtil 27. september 2020. Derefter vises den i efteråret på Syddansk Universitet. I foråret 2021 kan udstillingen ses på Steno Museet i Aarhus.



Ørsted



Faraday

Elektromagnetismen er et smukt eksempel på naturens mange symmetrier. Figuren til venstre er et eksempel på Ørsteds opdagelse af, at en elektrisk strøm kan bevæge en magnet. Figuren til højre illustrerer tilsvarende Faradays opdagelse af, at bevægelse af en magnet kan skabe en elektrisk strøm i en ledning i nærheden. Symmetrien ses i Maxwells ligninger og understreges i praksis af, at visse elektromotorer også kan bruges som generatorer og omvendt

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.

Opindeligt opstillede Maxwell tyve ligninger, da han behandlede de tre rumlige koordinater hver for sig. Men i 1884 reducerede den engelske ingeniør og fysiker Oliver Heaviside ligningerne til de nu kendte fire differentiallyigninger ved brug af vektornotation. Disse fire ligninger beskriver den relation, som elektriske ladninger i hvile og bevægelse har til elektriske og magnetiske felter.

Den første ligning kaldes også Gauss' lov og udtrykker sammenhængen mellem et elektrisk felt (E) og den elektriske ladning (ρ), der skaber det. Coulombs kraftlov kan udledes af denne ligning.

Den anden ligning kaldes Gauss' lov for magnetisme. Den udtryk-

ker, at der ikke findes magnetiske ladninger, også kaldet magnetiske monopoler. Det betyder, at magnetfeltlinjer altid er lukkede kurver.

Den tredje ligning udtrykker Faradays induktionslov, idet den viser, at et magnetfelt (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 (J), som Ampère hævdede, eller ved at et elektrisk felt varierer over tid.

Det sidste led, som Maxwell tilføjede, er vigtigt, da det i kombination med tredje ligning giver mulighed for elektromagnetiske bølger: Et varierende magnetfelt skaber et elektrisk felt og vice versa. Disse bølger udbreder sig med lysets hastighed, da de elektriske og magnetiske naturkonstanter ϵ_0 og μ_0 kan kombineres til at give lyshastigheden, c .

De elektromagnetiske bølger blev eksperimentelt påvist af den tyske fysiker Heinrich Hertz i 1890'erne. 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.

konkluderede han, at lys er bølgebevægelser i det samme medium, som er årsagen til de elektriske og magnetiske fænomener. Så ligesom Ørsted med sin opdagelse havde forenet elektricitet og magnetisme til ét samlet fænomen, havde Maxwell et halvt århundrede senere forenet elektrodynamikken og optikken.

En lykkelig syntese

Denne bedrift ændrede dog ikke på, at fysikerne stod med to stærke og fuldstændig forskellige teorier for det fænomen, som Ørsted havde opdaget i 1820: Webers teori, der indeholdt elektriske partikler, men ingen felter, og Maxwells teori, der indeholdt felter, men ingen elektriske partikler.

Dette tilsyneladende paradoks blev løst af den hollandske fysiker Hendrik A. Lorentz, der i 1890'erne udviklede en elektron-teori, som han kombinerede med Maxwells teori. 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.

Takket være denne tilføjelse står Maxwells ligninger – der som nævnt var baseret på en mekanisk model af en "æter", som vi siden har forladt ideen om, da den ikke kan påvises – stadig som den bedste teori for alskens elektromagnetiske fænomener. ■

Videre læsning:
Ole Knudsen, *Elektromagnetisme 1820-1900*, Steno Museets Venner 2015.

Anja Skaar Jacobsen og Svend Larsen (red.), *H.C. Ørsteds Selvbiografi*, Steno Museets Venner 2002.

Dan Ch. Christensen, *Naturens tankelæser - En biografi om Hans Christian Ørsted*, Museum Tusulanums Forlag 2009.

Kvant, Temanummer om H.C. Ørsted og 200-året for elektromagnetismen, December 2019.

at udbrede sig i Æ teren blev tillagt nogle mekaniske egenskaber, som Maxwell oversatte til egenskaber for de elektriske og magnetiske felter. Ud fra denne mekaniske model kunne han matematisk beskrive de elektriske og magnetiske fænomener, som Ørsted, Faraday og andre havde opdaget.

For at kunne gøre rede for isolators egenskaber var Maxwell nødt til at forestille sig, at æteren var elastisk. Det havde imidlertid den konsekvens, at der måtte kunne udbrede sig bølger igennem den. Når han indsatte de kendte elektromagnetiske konstanter i teorien, kom han til det overraskende resultat, at disse æterbølger udbredte sig med lysets hastighed. Derfor