

December 29, 2021

Anteckningar Teknikhistoria 2022: Paradigmskiften inom elektrotekniken under 1800- talet

Dessa anteckningar behandlar elektroteknik under perioden 1786–1905, med fokus på upptäckter och uppfinningar som var viktiga för utvecklingen av trådbunden och trådlös kommunikation. De är mer utförliga än det stoff som gicks igenom på föreläsningen *Paradigmskiften inom elektrotekniken under 1800-talet* i kursen Teknikhistoria år 2020.

1 Paradigmskifte

Begreppet paradigmskifte betecknar ett byte av vetenskapliga tankemönster och förebilder. Det infördes av Thomas Kuhn 1962 i skriften *De vetenskapliga revolutionernas struktur (The Structure of Scientific Revolutions)*.

De paradigmskiften som skedde inom elektromagnetism och elektroteknik under perioden 1787–1900 innebar stora kliv i mänsklighetens utveckling. Voltas upptäckt av det kemiska batteriet, Ørsteds upptäckt att ström ger magnetfält, Faradays upptäckt av induktion, Maxwells ekvationer och de experimentella bevisen att elektromagnetiska vågor existerar innebar omvälvande paradigmskiften för fysiken. På detta följde en teknikutveckling. Batteriet, elektromagneten, telegrafin, generatoren, elmotorn, telefonen, högtalaren, radiosändare och radiomottagare, elektrifiering av samhällen och glödlampan är exempel på ny teknik som utvecklades under 1800-talet och var och en av dessa innovationer innebar ett paradigmskifte.

2 Fysik innan 1786

Det finns fyra typer av växelverkan, mellan partiklar: gravitationen, den elektromagnetiska växelverkan, den svaga växelverkan och den starka växelverkan. Man kan likna utvecklingen av teorierna för dessa växelverkan vid att lägga ett pussel. Den första pusselbiten är Newtons gravitationslag, som presenterades i arbetet *Principia* 1687. Newtons teori för gravitation modifierades 1916 av Albert Einstein som gav en fullständig beskrivning av gravitationen i sin allmänna relativitetsteori. Under perioden 1786–1864 utvecklades teorin för den elektromagnetiska växelverkan. Som vi skall se består den av fyra pusselbitar, där den första kom på plats år 1786 och de tre andra år 1820, 1831 och 1864.

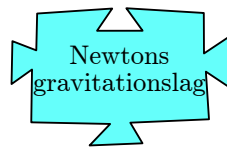


Figure 1: Under perioden 1687-1784 är Newtons gravitationslag den enda kända lagen för växelverkan mellan partiklar.

3 Elektroteknik innan 1786

Statisk elektricitet är något man stöter på i stort sett varje dag och som människan naturligtvis varit medveten om under många tusen år. Det dröjde dock till mitten av 1600-talet innan man började göra experiment som kom att öka förståelsen för detta mystiska vardagsfenomen. De första experimentella apparaterna var handdrivna elektrostatiska maskiner som genom friktion kunde skapa strömpulser. Sådana maskiner började dyka upp i mitten av 1600-talet. Hundra år senare fann man ett effektivt sätt att lagra de laddningar strömpulserna förde med sig. De lagrades i det vi idag kallar kondensatorer.

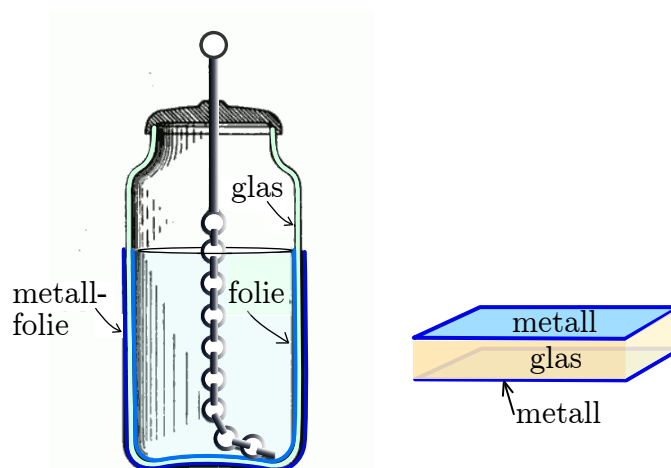


Figure 2: Leidenflaska och Franklins kvadrat. Metallkedjan leder laddningar till insidans metallfolie. På utsidans metallfolie hamnar lika mycket laddning, men med motsatt tecken. Franklins kvadrat har lika mycket laddning på ovansidan som på undersidan, men med olika tecken.

En kondensator kan upprätthålla en konstant spänning (likspänning) under lång tid. En av de första kondensatorer som utvecklades var Leidenflaskan, som är en glasflaska med metalliserad insida och utsida. När den laddas upp hamnar de positiva laddningarna på utsidan och de negativa på insidan, eller vice versa. Då den laddas ur flyter en kort, men stark, strömpuls mellan ut- och insidan, d.v.s. från plus- till minuspolen. Den amerikanske fysikern och statsmannen Benjamin Franklin

uppfann en enklare typ av kondensator, Franklins kvadrat, som var mer praktisk än Leydenflaskan. Franklins kvadrat består av två kvadratiska metallplattor separerade av en glasskiva och är ett exempel på vad vi idag kallar plattkondensator.

3.1 Coulombs lag

Om man kopplar insidan av en Leydenflaska till en elektrostatisk maskin så laddas insidan upp och samtidigt laddas utsidan upp med en lika stor laddning med motsatt tecken¹ Det gjorde att man redan i mitten av 1700-talet kunde sluta sig till att det finns positiva och negativa laddningar.² Man fann också att laddningar med olika tecken attraherar varandra och laddningar med samma tecken repellerar varandra. När man visste detta föll det sig naturligt att undersöka hur kraften mellan två laddade partiklar beror av avståndet mellan partiklarna. Den brittiske fysikern Henry Cavendish gjorde redan 1770 ett sinnrikt experiment som visade att denna kraft avtar som ett genom kvadraten på avståndet mellan laddningarna. Halveras avståndet mellan två laddningar blir kraften mellan dem fyra gånger större. Cavendish publicerade aldrig sina resultat och det var i stället den franske fysikern Charles-Augustin de Coulomb som kom att få äran av att ha upptäckt den elektrostatiska kraftlagen. Han fann lagen genom ett noggrant utfört experiment år 1784. Resultatet publicerades och lagen om kraftverkan mellan två stillastående laddningar fick namnet Coulombs lag.

Coulombs lag är den andra pusselbiten i teorin för växelverkan mellan partiklar. Det dröjer ändå till 1820 innan man hittar den tredje pusselbiten, den som visar sambandet mellan ström och magnetfält.

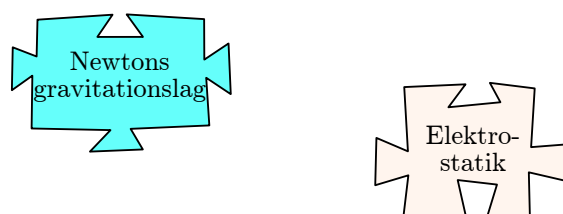


Figure 3: År 1784 tillkom Coulombs lag som en pusselbit. Den ger en fullständig beskrivning av elektrostatiken.

Strömpulser från elektrostatiska maskiner och kondensatorer är alltför kortvariga för att kunna påvisa det elektromagnetiska fenomen som leder till den tredje pusselbiten. Det som krävs är tillgång till likström, vilket är en ström som kan flyta under

¹Utsidans laddning sugts upp från jord.

²Begreppen positiva och negativa laddningar myntades av den amerikanske fysikern och statsmannen Benjamin Franklin i slutet av 1740-talet. Franklin ansåg att laddning var en fluid. Ett positivt laddat objekt hade ett överskott av fluiden och ett negativt laddat ett underskott. Hade Franklin bytt tecken på sina laddningar hade han nästan haft rätt. Det är elektroner som flyter omkring i ledningarna och motsvarar Franklins fluid. Ett underskott på elektroner ger en positiv laddning och ett överskott en negativ laddning.

lång tid utan att mattas. Det var italienarna Luigi Galvani och Alessandro Volta som kom att visa hur man kan skapa sådana strömmar.

3.2 Matematisk beskrivning av elektrostatik

Från Coulombs lag går det att härleda den matematiska teorin för elektrostatiken. Idag använder vi vektoranalys för att skriva ekvationerna som beskriver elektrostatiken. Ekvationerna lyder

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{0} \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0},\end{aligned}\tag{3.1}$$

där \mathbf{E} är det elektriska fältet, ρ laddningstätheten och ε_0 en naturkonstant som kallas permittiviteten för vakuum. Kraften på en laddning q i en punkt \mathbf{r} ges av $\mathbf{F} = q\mathbf{E}(\mathbf{r})$, där $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ är det elektriska fältet i punkten \mathbf{r} .

Den del av matematiken som används för att lösa ekvationerna i (3.1) kallas potentialteori. Grunderna till potentialteorin utvecklades av de franska matematikerna Pierre-Simon Laplace och Siméon Denis Poisson under slutet av 1700-talet och början av 1800-talet. De använde ursprungligen teorin för att lösa problem inom Newtons gravitationsteori. En viktig ingrediens i teorin är den skalära potentialen V . Poisson insåg att de grundläggande ekvationerna i Newtons gravitationsteori är desamma som ekvationerna för elektrostatiken och han införde därför en skalär elektrisk potential V . År 1812 publicerade han den ekvation som relaterar V till en laddningsfördelningen ρ . Ekvationen kallas idag Poissons ekvation och lyder

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon_0}\tag{3.2}$$

Potentialteorin visar hur man kan lösa denna ekvation³. När man väl bestämt potentialen V kan man få fram det elektriska fältet ur sambandet $\mathbf{E} = -\nabla V$.

4 Animal elektricitet och galvanism

Luigi Galvani (1737–1798) var verksam vid universitetet i Bologna. Han var ursprungligen kirurg men övergick 1780 till att studera samband mellan elektricitet, nerver och muskelrörelse. Hans resultat om hur nerver fungerar utgör grunden för den moderna elektrofysiologin, se [2]. Perioden 1780–1790 var Galvanis glansperiod. Det var då han gjorde de experiment som skulle bli fundamentala för utvecklingen av elektrofysiologi, elektrokemi och elektroteknik. Hans hustru Lucia Galvani, som assisterade honom vid hans experiment, gick bort 1790 och efter det avtog Galvanis produktivitet. Den elektrofysiologiska forskningen grundades på upptäckten, gjord av Galvani 1780, att en grodas lårmuskel dras samman då en strömpuls drivs

³Poisson gav lösningen till (3.2) i sin artikel. Lösningen är relativ enkel att skriva upp men om man dessutom lägger till randvillkor blir det betydligt svårare att lösa Poissons ekvation. Även då kan man analysera problemet med potentialteori

genom den nerv som är kopplad till muskeln. Det finns flera skrönor om hur Galvani gjorde sin upptäckt. Den mest troliga är att en assistent till Galvani med en skalpell vidrörde en nerv som Galvani frigjort i grodlåret. På samma sätt som det kan gå en liten gnista av elektriska laddningar när man tar i ett dörrhandtag gick det en gnista mellan skalpellen och nerven, varpå grodlåret rörde sig.

Galvani hade ett tydligt mål med sin forskning, han ville förstå de fysiologiska mekanismerna bakom liv. Vad får muskler att röra sig, hur styr vi deras rörelse och vad är det som gör att vi kan tänka? För att få svar utförde han experiment och i dessa användes grodlår som mätinstrument. Hans tidiga experiment visade tydligt att mekanisk elektricitet, vilken var skapad genom friktion, kan påverka musklerna. Det fanns en annan typ av elektricitet, kallad atmosfärisk elektricitet, som också intresserade Galvani. Den atmosfäriska elektriciteten ansågs bestå av elektriska fluider i atmosfären och dessa fluider kunde ge upphov till blixnar⁴. Frågan var hur grodlåret skulle reagera på atmosfärisk elektricitet. För att få svar genomförde Galvani experiment och det var då han gjorde det som jag anser vara en av mänsklighetens viktigaste upptäckter. I september 1786 hade han satt upp ett experimentet där den atmosfäriska elektricitet, via en lång järntråd, skulle ledas ner till en nerv i ett grodlår. Järntråden var fastsatt i grodan och för att leda in elektriciteten till grodlårets nerv använde han en koppartråd. Han satte fast koppartråden i järntråden men när koppartrådens andra ände vidrörde nerven drog muskeln ihop sig. Galvani kunde utsluta att orsaken var den atmosfäriska elektriciteten. Hans förklaring var att det måste finnas elektriska fluider upplagrade i nerverna. Musklerna dras samman när fluiderna flyter genom muskelnerven men det krävs en sluten krets för att de skall flyta. Koppartråden, järntråden och grodan bildade just en sådan krets. Han gav den här elektriciteten namnet animalisk elektricitet. Upptäckten blev en viktig injektion till Galvanis strävan att finna förklaringen av liv. Han och hans hustru fortsatte med experiment om animalisk elektricitet fram till 1790 och året efter publicerade Galvani resultaten av de experiment de genomfört under perioden 1780-1790. Ända till sin död 1798 höll han fast vid sin teori om animalisk elektricitet. Hade han tänkt i nya banor kunde han fått fira fler vetenskapliga triumfer. Nu blev det i stället hans landsman Alessandro Volta som skördade den bästa frukten av Galvanis experiment. Under sina sista levnadsår blev Galvani motarbetad och fråntagen sina forskningsresurser. En orsak till detta var att han motsatte sig Frankrikes ockupation av norra Italien som inleddes 1795. Han dog fattig och marginaliserad 1798.

4.1 Skicklighet, hårt arbete och tur

Sannolikheten att någon under 1700-talet skall bilda en sluten krets bestående av en järntråd, en groda och en koppartråd får anses vara väldigt liten. Genom en kombination av skicklighet, hårt arbete och tur lyckades ändå Galvani med denna osannolika bedrift. Han jobbade i 10 år med sina experiment och det fanns ändå

⁴1752 lyckades den amerikanske fysikern och statsmannen Benjamin Franklin under ett åskoväder leda ned laddningar från luften till en Leydenflaska. Leydenflaskan blev uppladdad, vilket han, med all rätt, ansåg visa att blixnar är av elektrisk natur.

viss chans att han någon gång under denna tid skulle råka bilda den slutna kretsen. Galvani hade trots detta tur då det inte är givet att den svaga ström som bildas i den slutna kretsen räcker för att grodlåret skall dras ihop. Nu gjorde den det och utvecklingen av elektrotekniken kunde starta. Galvani hade satte en boll i rullning, en boll som idag är gigantisk och rullar fram med svindlande hastighet.

5 Voltastapeln, det första batteriet

Den italienske fysikern och kemisten Alessandro Volta (1745–1827) var verksam vid universitetet i Pavia, i norra Italien. Hans forskning inom fysik var inriktad mot elektrostatiska fenomen och hade bland annat utvecklat elektrostatiska maskiner och elektroskop, vilket är mätinstrument som kan mäta laddning. Sedan mitten av 1770-talet var han en auktoritet inom elektrostatik. När han satt sig in i Galvanis forskningsresultat om animalisk elektricitet gjorde han om försöket där ett grodlår kan fås att dras samman när det vidrörs av två olika metalltrådar. Försöket gick att reproducera, men Volta ansåg att Galvanis förklaring av fenomenet var felaktig. För att visa detta bytte han ut grodlåret mot en saltlösning. Då han stoppade ner två olika metallbitar (elektroder) i lösningen uppstod en detekterbar spänning⁵ mellan metallbitarna. Den ström som uppkommer i en sluten krets bestående av en groda och två olika metalltrådar är alltså av kemisk natur och inte orsakad av animalisk elektricitet. Volta använde begreppet galvanism för fenomenet. Han mätte spänningen för olika par av metaller nedstuckna i saltlösningen och störst spänning fick han med bitar av silver och zink. Han kunde uppnå ännu högre spänningar genom att bilda staplar (Voltastaplar) av omväxlande zink- och silverplattor⁶, separerade med tyg indränkt i saltlösning. Med andra ord så seriekopplade han galvaniska element för att bilda Voltastapeln. Tomgångsspänningen är då proportionell mot antalet element i Voltastapeln. Den första av Voltas publikationer om galvanism kom 1799.

Genom att mäta spänningen för olika typer av metaller kunde han tilldela varje metall en elektropotential och ordna metallerna i en serie baserad på dessa potentialer. Serien kallas idag den elektrokemiska serien. Spänningen mellan två elektroder med olika metaller är skillnaden i metallernas elektropotentialer, ett samband som fått namnet Voltas lag.

Voltastapeln var opraktisk så Volta uppfann en bättre typ av batteri, det så kallade Voltabatteriet, där zink och kopparrplattorna är nedsänkta i kärl med elektrolyter. Med ett batteri kan man skapa likström, d.v.s. en ström som är konstant i tiden och med likström kan man påvisa kemiska och fysikaliska fenomen. Det banade vägen för utvecklingen av elektrokemin och elektrotekniken. Utvecklingen av elektrokemin tog fart direkt efter att Volta publicerat sina resultat, medan det skulle dröja till 1820 innan elektrotekniken tog nästa stora steg i sin utveckling.

Under tiden 1796–1814 var norra Italien ockuperat av Frankrike. Till skillnad

⁵Spänningen kunde detekteras med ett elektroskop, vilket består av två tunna metallblad som repellerar varandra när de är uppladdade.

⁶senare användes oftast zink- och kopparrplattor

från Galvani var Volta positiv till ockupationen och det kom att gagna hans forskning. I början av ockupationen var Napoleon överbefälhavare för den franska armén i Italien. Han hade ett genuint intresse för naturvetenskap och matematik, och ansåg att satsningar på vetenskap var viktiga för Frankrikes utveckling. Voltas forskning imponerade på Napoleon och han gav Volta det ekonomiska stöd denne behövde. År 1810 gav Napoleon ytterligare prov på sin uppskattning av Voltas verksamhet genom att ge Volta titeln greve.

5.1 Voltas syn på Galvani

Volta och Galvani hade förvisso olika förklaringar till de fenomen Galvani påvisat, men de hade stor respekt för varandra och var aldrig ovänner. Volta skrev att Galvanis arbeten innehåller en av de mest vackra och häpnadsväckande upptäckterna, och syftade då på upptäckten att grodlåret drogs samman då det vidrördes av två olika metallbitar. Volta markerade Galvanis betydelse genom att införa termen galvanism för fenomenet att en spänning uppstår mellan två elektroder i en elektrolyt⁷. Man kan tycka att Galvanis teorier om animaliska elektricitet var felaktiga. Han hade dock delvis rätt eftersom strömmarna som flyter genom nerver är av en annan karaktär än de strömmar som flyter i ledare av metall. I nerven är strömmen ett flöde av positiva och negativa joner medan strömmen i en metall är ett flöde av elektroner. Vår förmåga att röra oss, känna, se, höra och även att tänka baseras på elektriska strömmar av joner. Dessa jonströmmar är en förutsättning för liv och de kan, i enlighet med Galvanis teorier, flyta utan att yttre spänningskällor är kopplade till kroppen.

5.2 Från Voltastabatteriet till torrbatteriet

Jämfört med dagens batterier har Voltabatteriet stora brister: det bildas vätgas vid den positiva elektroden, vilket kan leda till explosioner, batteriet laddas ur relativt fort och det har en hög inre resistans. Trots detta var Voltabatteriet under lång tid den dominerande spänningskällan. Först år 1836 uppfann den brittiske kemisten John Frederic Daniell ett betydligt bättre batteri. Daniell lät zinkelektroden vara nedsänkt i saltsyra och kopparelektroden i kopparsulfat. Det gav ett batteri som höll spänningen betydligt längre än Voltabatteriet. Daniells batteri kom att bli standardbatteri för telegrafi under 1800-talet. Det dröjde till slutet av 1800-talet innan torrbatterier, där de flytande elektrolyterna ersatts med en fast elektrolytpasta, uppfanns.

6 Den elektrolytiska telegrafan

Redan på 1700-talet hade man försökt att med elektricitet skicka meddelanden via ledningar. Sändaren var en elektrostatisk maskin eller kondensator och denna gener-

⁷en elektrolyt är en lösning med fria joner, t.ex. en saltlösning

erade en kort strömpuls som leddes via två långa ledningar till mottagaren. Där gav strömpulsen upphov till en gnista.

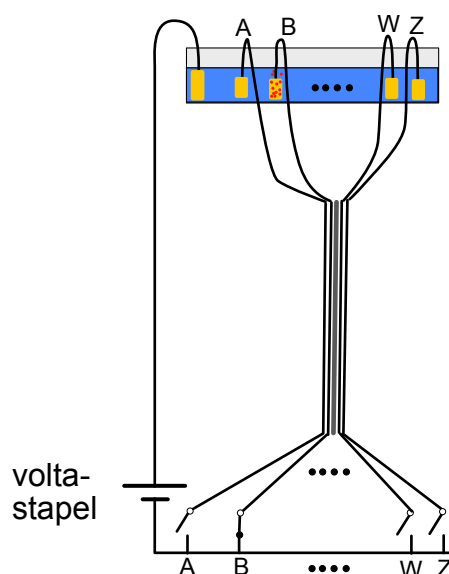


Figure 4: von Sömmerings elektrolytiska telegraf. I detta läge sänds bokstaven B.

Voltas upptäckt av batteriet öppnade upp för andra konstruktioner och en av dessa använde elektrolytiska mottagare. Den elektrolytiska mottagaren baseras på fenomenet att när en spänning läggs över två metallbitar som är nedsänkta i vatten bildas gasbubblor vid den negativt laddade metallbiten (katoden). Den första väl fungerande elektrolytiska telegrafen var konstruerad av tysken Samuel Thomas von Sömmering och byggdes 1809, se Figur 4. Som mottagare användes katoder av guld nedsänkta i en glasbehållare fylld med vatten. Till varje bokstav och varje siffra hörde en guldkatod. Dessutom fanns ytterligare en guldelektrod som fungerade som anod. För att skicka en bokstav la man en spänning mellan anoden och den katod som motsvarade bokstaven. Den som läste meddelandet fick då snabbt försöka registrera vilken katod som fick bubblor. Von Sömmerings telegraf kunde skicka 25 olika bokstäver och 10 siffror. Inkluderad ledningen till anoden behövdes således 36 ledningar mellan sändare och mottagare. Von Sömmerings lyckades skicka meddelanden över flera kilometer men hans system blev ingen kommersiell succé. Tanken på trådbunden kommunikation var född tekniken behövde bli enklare och snabbare för att slå igenom.

7 Magnetostatik, den tredje pusselbiten

Efter att Voltabatteri presenterats 1799 var förutsättningarna goda för att den tredje pusselbiten i växelverkanspusslet skulle hittas, men det tog förvånansvärt lång tid innan biten var på plats. Under en föreläsning på Köpenhamns universitet den 21 april 1820 upptäckte den danske fysikern Hans Christian Ørsted (1777–1851)

att en kompassnål ställer in sig i en viss riktning då den placeras i närheten av en strömförande ledning och det kan bara förklaras med att strömmen i ledningen skapar ett magnetfält. För att vidare undersöka fenomenet införskaffade Ørsted ett kraftigt Voltabatteri som kunde ge stora strömstyrkor. Genom fortsatta experiment kunde han visa att magnetfältet bildar cirklar kring en lång rak strömförande ledare, att fältets styrka avtar som ett genom avståndet från ledaren och att fenomenet inte påverkas av om plattor av glas, metall eller trä fördes in mellan ledaren och kompassen. Han publicerade sina resultat i en blott fyra sidor lång artikel den 21 juli 1820. Artikeln var skriven på latin, men översattes snart till andra språk, den engelska titeln är *Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle*, se [3].

Ørsteds resultat spreds mycket snabbt över Europa och blev startskottet för en intensiv forskningsperiod i flera länder. Redan på hösten 1820 kunde de franska fysikerna Jean Baptiste Biot och Félix Savart påvisa en magnetisk kraft mellan strömförande ledningar. Baserat på Ørsteds, Biots och Savarts resultat, samt egna experiment, utvecklade fransmannen André-Marie Ampère den matematiska teorin för sambandet mellan likströmmar och magnetiska krafter. Hans fullständiga teorier publicerades 1827 och är vad vi idag kallar teorin för magnetostatik.

Det var ingen slump att just Ørsted fann sambandet mellan strömmar och magnetfält. Ända sedan Voltas upptäckt av batteriet hade Ørsted intresserat sig för elektricitet och magnetism. Idén om att det fanns ett samband mellan elektricitet och magnetism hade han fått från den tyske fysikern Johann Wilhelm Ritter under en vistelse i Tyskland år 1801 .

7.1 Matematisk beskrivning av magnetostatik

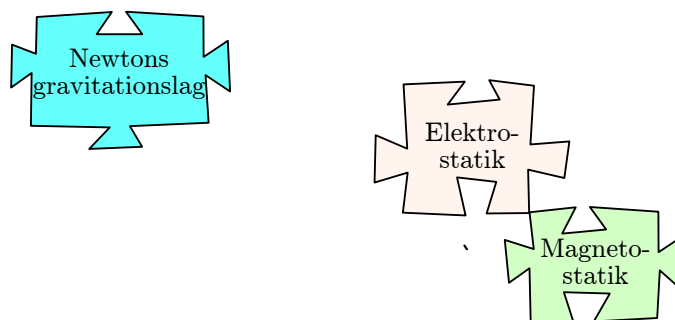


Figure 5: År 1820 tillkommer magnetostatiken som en pusselbit. Notera att magnetostatiken och elektrostatiken inte är sammankopplade.

Från Ampères teorier följer att det går att införa ett magnetiskt fält, kallat magnetisk flödestäthet och betecknat \mathbf{B} . Flödestätheten satisfierar följande ekvationer:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J}, & (\text{Ampères lag}) \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0,\end{aligned}\tag{7.1}$$

där \mathbf{J} är strömtätheten och μ_0 permeabiliteten för vakuum. Tillsammans med Newtons gravitationslag och de elektrostatiska ekvationerna i (3.1) sammanfattar dessa ekvationer den kända teorierna för växelverkan mellan partiklar under perioden 1827–1831.

Reflektion: Ampère var 49 år, Volta 54 år och Ørsted 43 år när de gjorde sina upptäckter. De flesta upptäckter inom fysiken har gjorts av unga forskare, men även äldre förmågor har uppenbarligen en chans om de kommer in i rätt skede. Ørsted valdes in som utländsk medlem av Kungliga Svenska Vetenskapsakademien 1822 och André-Marie Ampère valdes in 1827.

7.2 Framsteg under perioden 1820-1835

De fysikaliska framsteg som gjordes av Ørsted, Biot, Savart och Ampère ledde snart till innovationer inom elektrotekniken. Här är några av de viktigaste under perioden 1820-1835:

- Elektriska motorn 1821. Michael Faraday konstruerade den första elektriska motorn. Den var ineffektiv, men påvisade att man kunde överföra elektrisk energi till rörelseenergi. Principen är att en strömförande ledning som befinner sig i ett magnetfält utsätts för en kraft och denna kraft ger upphov till mekanisk rörelse. Den första elektriska motorn som var tillräckligt kraftfull för att vara användbar konstruerades av den amerikanske ingenjören Thomas Davenport 1834. Utvecklingen av elektriska motorer är intressant, men ligger utanför området som behandlas i denna text.
- Galvanometern 1821. Galvanometern gjorde det möjligt att mäta svaga spänningar och strömmar. Den bidrog också till att man kunde definiera enheten för ström⁸. Liksom den elektriska motorn bygger galvanometern på den magnetiska kraft en ström utsätts för när den flyter genom ett magnetfält. Kraften vrider en visare och vridningsvinkeln är proportionell mot strömmen.
- Elektromagneten 1825. Elektromagneten uppfanns av engelsmannen William Sturgeon. En förbättrad elektromagnet uppfanns 1828 av den amerikanske fysikern Joseph Henry. Henrys magnet bestod av en spole med isolerade trådar lindad på en järnkärna.
- Reläet 1835. Ett relä är en strömbrytare som styrs av en yttre styrström. Den yttre strömmen går i en spole och skapar ett magnetfält som kan sluta, eller öppna en kontakt. Reläet uppfanns av Joseph Henry och Edward Davy 1835 och är än idag en viktig elektronikkomponent. Den gjorde det möjligt att förstärka signaler längs telegrafledningar och att förbättra mottagningen av signalerna.

⁸Enligt den ursprungliga definitionen är 1 ampere den ström som när den passerar genom två raka och parallella ledare i vakuum med oändlig längd, försumbart tvärsnitt och på en meters avstånd från varandra, ger upphov till en kraft på $2 \cdot 10^{-7}$ newton per meter (N/m) på var och en av ledarna. Definitionen gällde ända fram till 20 maj 2019 då en ny definition, baserad på att elementarladdningen ges ett exakt värde, infördes.

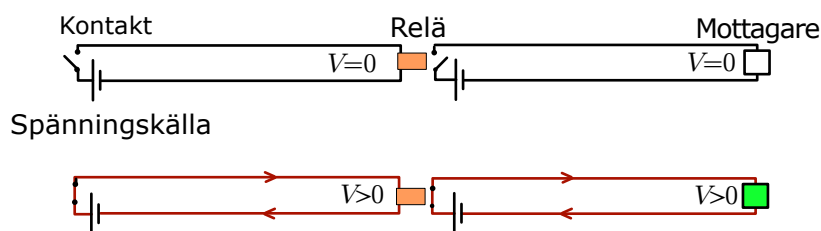


Figure 6: Förstärkning av signal i telegrafledning med hjälp av ett relä. När kontakten sluts vid sändaren går det en ström genom reläet. Magnetfältet som bildas i reläet sluter kontakten i den högra slingan. Då flyter en ström även i högra slingan och denna ström ger utslag i mottagaren.

8 Ohms lag

1827 formulerade George Ohm (1789–1854) sin berömda lag $V = RI$, där R är resistansen, V är spänningen över resistansen och I är strömmen som flyter genom resistansen. Med den tidens mätinstrument och spänningskällor var det inte helt enkelt att verifiera lagen experimentellt och det skulle ta flera år innan den var allmänt accepterad. Ohms lag var det första bidraget till kretsteorin, d.v.s. den matematiska teorin för kretsar. En systematisk teori publicerades först 1845 av den tyske fysikern Gustav Kirchhoff.

9 Induktion, den fjärde pusselbiten

Elva år efter att Ørsted funnit den tredje pusselbiten i fysikpusslet finner den engelske kemisten och fysikern Michael Faraday (1791–1867) den fjärde biten. Pusselbiten visar att ett magnetfält som varierar i tiden inducerar ett elektriskt fält, ett fenomen som kallas induktion. Faraday använde två spolar som var lindade på samma järnkärna och skapade magnetfältet genom att driva en ström genom en av spolarna. När strömmen bröts förändrades det magnetiska flödet i den andra spolen och en detekterbar ström inducerades då i denna. Oberoende av Faraday upptäckte även amerikanen Joseph Henry induktionen, men det gäller att vara först så upptäckten av induction tillskrivs Faraday. Både generatoren och transformatorn bygger på induktion och därmed är induktion en förutsättning för samhällets elförsörjning. Induktion utnyttjas också i all elektronik för kommunikation med radiovågor, men det dröjde till slutet av 1800-talet innan den tekniken började utvecklas.

Faraday var utpräglad experimentalist och i hans samlade skrifter finns inga formler. Han gjorde många viktiga upptäckter inom elektromagnetismen men var också en auktoritet inom elektrokemin och bidrog starkt till den snabba utvecklingen av kemin under första halvan av 1800-talet.

9.1 Matematisk beskrivning av induktion

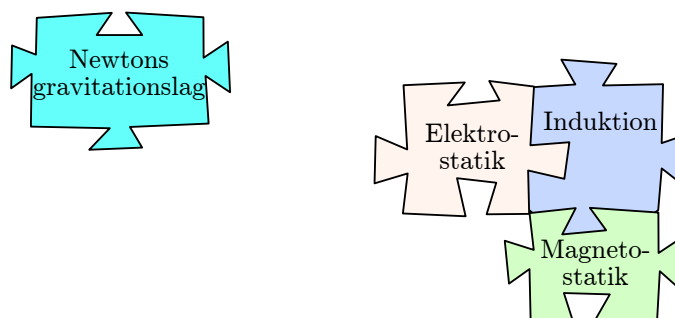


Figure 7: År 1831 la man den fjärde pusslbiten. Induktionen ger en koppling mellan de elektriska och magnetiska fälten.

Den matematiska beskrivningen av elektrostatiken gäller inte när strömmar och laddningar varierar i tiden. Teorin korrigerades av, bland andra, den tyske fysikern Wilhelm Weber och kan, med modern matematisk notation, sammanfattas i de två ekvationerna:

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, & (\text{Faradays lag}) \\ \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0}, & (\text{Gauss lag})\end{aligned}\tag{9.1}$$

Dessa ekvationer generaliserar ekvationerna i (3.1). Under perioden 1831–1864 är det dessa ekvationer som tillsammans med Newtons gravitationslag och de magneto-statiska ekvationerna i (7.1) utgör den kända teorin för växelverkan mellan partiklar.

10 Utveckling av telegrafen under perioden 1830–1867

Ørsteds upptäckt ledde till nya innovationer som skulle få stor betydelse för trådbunden kommunikation. Galvanometern, se avsnitt 7.2, var en av dessa. Ampère föreslog ett system för trådbunden kommunikation där mottagarna utgörs av galvanometrar. Det ger en betydligt högre överföringshastighet än vad system med elektrolytiska mottagare kan ge. I början av 1830-talet testades Ampères system på flera ställen i Europa och USA. Det var dock i St Petersburg där det första riktigt användbara telegrafsystemet installerades. Systemet utvecklades av baron Pavel Shilling. Den 21 Oktober 1832 hade han installerat en fungerande telegraf i sin lägenhet, där den användes för att sända meddelanden mellan olika rum. Han vidareutvecklade sin telegraf för kommunikation över längre avstånd och den kom att installeras på ett antal platser i St Petersburg. Hans system använde sex kablar kopplade till 36 galvanometrar, motsvarande 26 bokstäver och 10 siffror. Varje bokstav och siffra var kodad och genom att skicka ström i vissa av ledningarna gav en

av galvanometrarna utslag. Trots de framgångar von Shilling fick i St Petersburg slog hans system inte igenom globalt.

Ett annat system, där mottagaren utnyttjade induktion, installerades år 1833 av matematikern Carl Friedrich Gauss och fysikern Wilhelm Weber i Göttingen, Tyskland. I rent forskningssyfte drog de en 1200-meter lång telegrafledning mellan observatoriet och fysikinstitutionen i Göttingen, Tyskland. De var intresserade av fysiken bakom telegrafi. En intressant fråga för dem var hur snabbt signalerna färdas. Svaret är att signalerna färdas med ljushastigheten, men Gauss och Webers kabel var alltför kort för att de skulle lyckas mäta upp denna hastighet. Det skulle dröja till 1857 innan Gustaf Kirchhoff, se [4] och [5], teoretiskt lyckas visa att signalerna i en resistanslös ledning färdas med ljushastigheten. Resultatet är extra intressant med tanke på att det är först 1864 som Maxwell lägger fram den fullständiga teorin för de elektromagnetiska fälten och där visar att elektromagnetiska vågor utbreder sig med ljushastigheten.

Under perioden 1830-1850 utvecklades ett sextiotal olika system för telegrafi, se [7, sid. 68]. Den stora aktiviteten inom området kan förklaras med att många såg att det fanns en ekonomisk potential i telegrafsystem. Som vi skall se blev det i slutändan en klar segrare bland alla tävlande system.

Den första kommersiella elektriska telegrafen, Cooke och Wheatstone telegrafen, utvecklades av William Fothergill Cooke och Charles Wheatstone och patenterades 1837. Deras telegraf var mer användarvänlig än baron Shillings telegraf. Mottagaren hade fem nålar som med hjälp av elektriska spolar kunde vridas för att peka på bokstäverna i alfabetet, se figur (8). Det krävdes fem ledningar för att driva systemet⁹. Cooke och Wheatstone telegrafen installerades längs järnvägar i England och några av systemen var i drift ända fram till 1930-talet.

Så här beskrivs det första testet av Cooke och Wheatstone telegrafen (från *Telegraphic Reform – The Post Office and the Electric Telegraph. The Post Office (1867)*):

”AFTER repeated experiments and numerous accessory discoveries of scientific men, both in this country and abroad, the famous invention of electric telegraphy was at length brought to the test of a fair and satisfactory trial on the night of the 25th June, 1837, or just thirty years ago. For the purposes of this experiment, a mile and a quarter of telegraphic wire had been laid down between the two stations of Euston Square and Camden Town, of what was then the new London and Birmingham Railway. Professor Wheatstone seated in a small ill-lit room at Euston Station, and surrounded by several men since known to fame, and notably by Robert Stephenson, held anxiously the one end of the mystic wire, whilst his co-adjutor, Mr. Fothergill Cooke, attended at the other extremity in Camden Town. We all know the result. The old inquiry: ‘Canst thou send lightnings that they may go and say unto thee, Here we are’ had often been asked, and sometimes half-answered; now, however, a positive reply was made possible; ‘Never did I feel,’ says Professor Wheatstone, ‘such a tumultuous sensation before, as when in that still room I heard the needles click; and as I spelled out the words, I felt all the magnitude of the invention now proved

⁹Det klarade sig med fem ledningar eftersom spolarna alltid strömsattes i par.

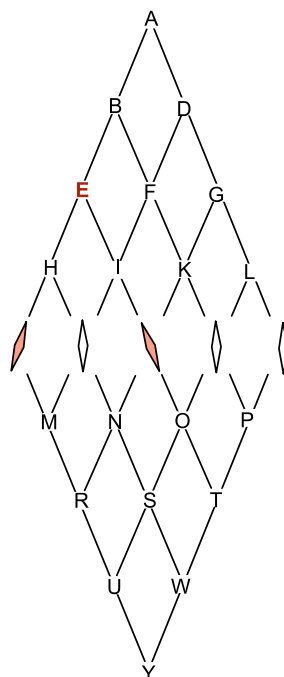


Figure 8: Cooke och Wheatstones mottagarsystem med fem nålar. I detta läget visar mottagaren bokstaven E. Notera att system endast täcker 20 bokstäver.

to be practicable beyond cavil or dispute.’ Wheatstone and all concerned might well exult in this triumph! The telegraph has, from this humble beginning, and within the short space of thirty years, become an indispensable agent of civilized society.”

Det fanns en anledning till att Cooke och Wheatstone telegrafen först installerades längs en järnvägslinje. Den första järnvägen för ånglok invigdes redan 1825 i England och efter det skedde en snabb utbyggnad av järnvägslinjer i flera europeiska länder och i USA. För att effektivt kunna utnyttja rälsen var järnvägsbolagen i akut behov av ett snabbt sätt att skicka meddelanden mellan järnvägsstationer. Telegrafi blev den perfekta lösningen på deras problem. I Sverige startade utbyggnaden av stambanan 1856 och man var förutseende nog att då lägga ut telegrafledningar samtidigt med rälsen.

Cooke och Wheatstones telegraf var bra, men två detaljer behövde förbättras. Den första var att reducera antalet ledningar mellan mottagare och sändare. Den andra var att telegrafen inte fungerade över långa avstånd. Resistansen i ledningarna gör att den elektriska signalen dämpas då den färdas från sändare till mottagare och med den tidens ledningar och mottagare var signalen inte detekterbar redan efter någon mil.

Lösningen på det senare problemet var att använda reläer, se figur 6 på sidan 11. Kommunikation med hjälp av reläer utvecklades först av Joseph Henry 1836. Han kunde få en klocka att ringa på ett mycket stort avstånd från sändaren genom att använda flera långa ledningar och ha ett relä och ett batteri vid varje punkt där ledningar var sammankopplade. När telegrafen utvecklats hade man relästationer

ungefär var fjärde mil [7, sid. 79 och 84]. Avståndet mellan relästationer kunde ökas genom att använda högre spänning, grövre kablar och känsligare mottagare. Det andra problemet, att reducera antalet kablar, skulle lösas av Samuel Morse.

10.1 Morsetelegraf

Vid 1837 fanns ett antal olika system för telegrafi. Von Sömmerings och Ampéres var klumpiga eftersom de krävde en ledning per bokstav. Baron Shillings telegraf och Cooke och Wheatstones telegraf var betydligt bättre eftersom de nöjde sig med sex respektive fem ledningar. Gick det att ytterligare reducera antalet ledningar? Cooke och Wheatstone förbättrade sin telegraf och lyckades reducera antalet nålar till två, genom att koda bokstäverna. Det skulle dock komma en enklare och mer elegant teknik, utvecklad av Samuel Morse (1791–1872), som konkurrerade ut alla andra system. Morse var egentligen konstnär men hade ett stort teknikintresse. Hans lösning på problemet var att koda bokstäverna och skicka koden sekventiellt i tiden. Då räcker det med en kabel, om man använde jord för återledning.

År 1837 utvecklade Morse sitt morsealfabet där bokstäverna är kodade med hjälp av långa och korta enheter. Koden baserades på en frekvensanalys av bokstäver i det engelska språket. De mest frekventa bokstäverna har en enkel kod. Exempel:

- A=kort lång
- B=lång kort kort kort
- E=kort
- O=lång lång lång
- S= kort kort kort
- T=lång

Lång är exakt två gånger så lång som kort. Det är kort paus mellan tecken, lång paus mellan bokstäver och extralång paus mellan ord.

Morse utvecklade en egen telegraf, baserad på reläer, för kommunikation över stora avstånd. I sitt arbete hade han stor hjälp av två av sina vänner, Leonard Gale och Alfred Vail. Morse kämpade hårt i ett antal år för att få någon att satsa pengar på telegraf, se den utmärkta beskrivningen i [12, kapitel 3]. Han presenterade telegraf för Kongressen redan 1838 utan att det ledde till något ekonomiskt stöd. Fyra år senare gjorde han ett nytt försök och efter en omröstning beslutades, med siffrorna 89-83, att Morse skulle få 30.000 dollar för att dra telegrafledning mellan Washington DC och Baltimore. När den invigdes 1844 skickade Morse meddelandet *What hath God wrought?* (Vad har Gud gjort?).

Morses ursprungliga telegraf hade en mottagare med en elektromagnet som kunde föra en penna upp och ner. Pennan ritade ner de morsekodade meddelandena som en lång räcka med streck på ett papper som vevades förbi pennan, se [7, sid. 79]. I senare varianter av systemet användes också mottagare som gav ifrån sig ljud. Då kunde telegrafisterna höra meddelandena och samtidigt skriva ner dem i klartext.

10.2 Världen krymper

Redan innan telegrafin uppfunnits kunde man skicka meddelanden snabbt över långa avstånd. Man använde sig då av tavlor med vridbara plattor som kunde avläsas på långt håll. Genom att ha en serie av tavlor mellan två orter och en operatör vid varje tavla kunde meddelanden snabbt skickas mellan orterna. De landbaserade optiska systemen försvann till stor del när telegrafin byggdes ut.

Ganska snart efter Morses första kabel dragits började man se fördelarna med telegrafi. En grupp som tidigt utnyttjade kablarna var de som sysslade med aktiehandel. De insåg att det gick att tjäna pengar på att telegrafera information. Behovet av nya telegraflinjer blev stor och snart hade man byggt ut omfattande nät i flera länder. Redan 1848 fanns ungefär 300 mil telegrafkablar i USA och två år senare 2.000 mil, se [12, kapitel 3]. Enligt [7, sid 214–215] fanns det år 1859 mer än 8.000 mil telegrafkablar i USA och 6.000 mil i England.

Sveriges första telegrafkabeln drogs mellan Stockholm och Uppsala och det första meddelandet skickades 16 juli 1853. Ett år senare fanns det telegrafi mellan Stockholm och Göteborg och ytterligare ett halv år senare mellan Stockholm och Malmö. Samma år, 1854, la man tre telegrafkablar mellan Sverige och Danmark. År 1859 fanns det drygt 200 mil telegrafkablar i Sverige.

10.3 Atlantkablarna 1858 och 1865

Efter de lyckade installationerna av landbaserade telegrafsystem runt om i världen började man även dra telegrafledning under vatten, där den ultimata utmaningen var trådbunden kommunikation mellan USA och Europa. De ekonomiska intressena var tillräckligt stora för att ge sig på detta dyra och svåra projekt. År 1857 lades den första atlantkabeln och första meddelandet sändes 1858. Kostnaden för kabeln var \$1,263,250.00 enligt [7, sid. 184], en enorm summa på den tiden. Tyvärr valde man en ganska dålig mottagare och aningen för klen kabel, vilket gjorde att det tog mycket lång tid att skicka meddelanden. Ett sätt att höja överföringshastigheten är att öka spänningen på sändarsidan. Ökad spänning leder till ökad ström, vilket ökar värmeutvecklingen i kabeln och därigenom kan det uppstå skador på kabeln. Trots riskerna frestades man till att gradvis höja spänningen och det bar sig inte bättre än att man höjde såpass mycket att kabeln förstördes. Under de knappa tre veckor som kabeln fungerade hann man sända 129 meddelanden från ön Valentia i Irland till New Foundland och 271 meddelanden från New Foundland till Valentia. Samtliga meddelanden finns dokumenterade i [7, sid. 185-205]. Misslyckandet med kabeln ledde till konspirationsteorier om att kabeln aldrig fungerat och till och med att den aldrig lagts ut, se [7, sid. 208].

Först 1865 kunde man lägga ut en ny kabel. Man hade då dubblat kabelns diameter och ökat mottagarens känslighet, vilket gav en hygglig överföringshastighet. Man klarade av 6-8 ord per minut jämfört med ett par ord i timman för 1858 års kabel. Hastigheten var dock betydligt lägre än i de landbaserade systemen eftersom man inte kunde förstärka signalen längs kabeln¹⁰. Som jämförelse kan nämnas att

¹⁰Det dröjde till 1930-talet innan man lyckades utveckla undervattenskablar med förstärkare,

en ny optisk kabel som Google nyligen lagt mellan USA och Frankrike kan skicka 250 Terabit/s. Det motsvarar att hela innehållet i USA:s kongressbibliotek, som innehåller över 38 miljoner böcker och många miljoner inspelningar, foton, kartor och annat, kan skickas från USA till Frankrike på 0.3 sekunder.

Orsaken till den långsamma överföringen i de första atlantkablarna finner man om man studerar de ekvationer som styr spänning och ström i telegrafkablar. I kablar som är korta far signalen fram som en våg med ljusets hastighet. Ekvationen som styr vågutbredningen är vågekvationen. Vågen dämpas exponentiellt längs ledningen och redan efter några kilometer är signalen såpass svag att den inte kan detekteras. I de landbaserade systemen var inte detta ett problem eftersom signalen förstärktes innan den blev för svag. Det gick däremot inte att skicka vågor längs de första atlantkablarna eftersom de inte var utrustade med förstärkare. Fysiken och matematiken säger att man ändå kan överföra morsesignaler i kablarna, inte genom vågutbredning, men genom att omväxlande ladda upp och ur kabeln. Det kan liknas vid att ladda upp och ur en kondensator. Läger man en spänning över kabeln i ena ändan börjar spänningen i den andra ändan långsamt stiga och efter viss tid når den upp till en detekterbar nivå. Matematiskt sett är det diffusionsekvationen som styr hur snabbt spänningen stiger på mottagarsidan. Det är samma ekvation som bestämmer hur värme utbreder sig.

Det var inte lätt att konstruera kabeln på den tiden eftersom det inte fanns några fullständiga teorier för hur signalerna utbreder sig. Det var först när Maxwell lade fram sina ekvationer för de elektromagnetiska fälten som en korrekt matematisk analys kunde göras. Här är ett avsnitt ur [7] som beskriver att även en såpass duktig fysiker som Michael Faraday kunde tänka fel: *Faraday had stated: "The larger the wire, the more electricity was required to charge it; and the greater was the retardation of that electric impulse which should be occupied in sending that charge forward." Thus it will be seen that although Faraday laid the foundations of a large proportion of the electrical engineering of to-day, his views in this instance did not prove to be correct. The theoretical resemblance of a cable to a Leyden jar in reference to the effect of charging either seems to have been prominently in mind, without proper regard to the resistance offered by the wire to the electric current, a resistance which becomes less the greater the bulk of the wire. Besides the engineer being overridden in this matter, the word of the electrical adviser on the Board (Professor Thomson) regarding the carrying capacity or working speed that would be obtained with such a core as that decided on, in view of the length involved, was also unavailing.* Faraday tänkte sig kabeln som en kondensator och om kondensatorn har liten yta är dess kapacitans liten och den laddas snabbt upp av en ström. Felet i Faradays resonemang är att kondensatorn är väldigt lång och strömmen som skall ladda upp kabeln måste färdas en lång sträcka. Då har kabelns resistans mycket stor betydelse och det är därför bättre att öka radien på ledaren. Kapacitansen är nämligen proportionell mot radien på ledaren medan resistansen är omvänt proportionell mot kvadraten på ledaren. Tidskonstanten vid uppladdning av en kondensator är produkten av resistansen och kapacitansen. Det gör att upp-

se [9, sid. 45]

laddningstiden är omvänt proportionell mot radien. Fördubblar man kabelns radie kan man fördubbla överföringshastigheten. En som förstod hur kabeln laddades upp var William Thomson. Han ansvarade för konstruktionen av kabeln som lades 1865 och konstruerade även mottagaren, som var en s.k. spegelgalvanometer. För sina insatser blev han adlad till Sir William Thomson av drottning Viktoria år 1866¹¹.

Thomsons upptäckt att tidskonstanten är proportionell mot produkten av kapacitans och resistans blev den rådande tumregeln fram till slutet av 1880-talet, då fysikern Oliver Heaviside utvecklade den fullständiga teorin för vågutbredning längs kablar. Heaviside visade att dämpningen förvisso var viktig, men att ett annat fenomen, dispersionen, var än viktigare för överföringshastigheten. För att minska dispersionen måste kabelns induktans öka. Mer om detta i avsnitt 16.

11 Maxwells elektromagnetiska teori

Den femte pusselbiten i växelverkanspusslet gör den matematiska beskrivningen av de elektromagnetiska fälten fullständig. Biten saknades ända fram till 1864 och den var inte lätt att hitta eftersom det inte fanns några experimentella resultat som indikerade att den skulle finnas. Det var James Clerk Maxwell (1831–1879) som fann biten genom att inse att Ampères lag, se ekvation (7.1), stred mot kontinuitetsekvationen¹². Han korrigerade lagen genom att lägga till en term i högerledet, se ekvation (11.4) nedan. Med denna pusselbit blir den matematiska beskrivningen av elektromagnetismen fullständig, se ekvationerna (11.1)–(11.4) nedan. Från sina ekvationer fann Maxwell att de elektromagnetiska fälten utbreddes sig med ljushastigheten och kunde därmed sluta sig till att ljus är elektromagnetiska vågor. Maxwells ekvationer publicerades 1865 i artikeln *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. I boken *A Treatise on Electricity and Magnetism* (två volymer), publicerad 1873, sammanfattar Maxwell den elektromagnetiska teorin.

Maxwell förstod att han hade hittat rätt ekvationer. Så här skrev han i ett brev till en vän år 1865:

”I have a paper afloat, with an electromagnetic theory of light, which, till I am convinced to the contrary, I hold to be great guns.”

James Clerk Maxwell får räknas som den störste fysikern under 1800-talet. Han föddes 1831 i Skottland och utbildade sig i Edinburg. År 1850 flyttade han till Cambridge i England och var där fram till 1860 då han fick en tjänst på King’s College i London. År 1871 återvände Maxwell till Cambridge där han utnämndes till Cavendish Professor of Physics och 1874 blev han föreståndare för Cavendish-laboratoriet¹³.

¹¹1892 fick Thomson titeln Baron Kelvin of Largs. I vetenskaplig litteratur benämns han ofta Lord Kelvin.

¹²Kontinuitetsekvationen säger att totala laddningen i ett slutet system är konserverad

¹³Cavendishlaboratoriet är avdelningen för fysik vid Universitetet i Cambridge och ingår i School of Physical Sciences. Laboratoriet öppnades 1874 som ett laboratorium för experimentell fysik och är uppkallad efter den brittiska kemisten och fysikern Henry Cavendish. Laboratoriet har haft ett stort inflytande på forskning inom fysik och biologi.

11.1 Matematisk beskrivning av Maxwells teorier

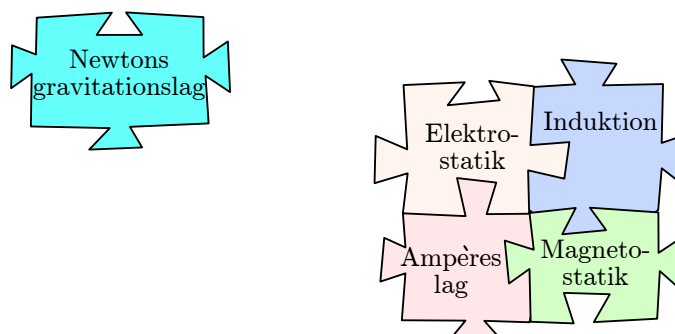


Figure 9: År 1864 läggs den sista pusselbiten till elektromagnetismen. Därmed är den delen av pusslet fullständigt.

De fullständiga ekvationerna för elektromagnetism (Maxwells ekvationer) beskriver hur de elektriska och magnetiska fälten varierar i rum och tid och hur de genereras av strömmar och laddningar. I Maxwells ursprungliga artiklar är ekvationerna komplicerade och svårtolkade. Maxwell skrev sina ekvationer i termer av den magnetiska vektorpotentialen och den skalära elektriska potentialen och det dolde fysiken. Det dröjde till 1885 innan Oliver Heaviside, se avsnitt 16 nedan, skrev om ekvationerna på den form vi använder i dag. Han skrev dem med vektoranalys och uttryckte ekvationerna i termer av de elektriska och magnetiska fälten. Heavisides version av ekvationerna ges av

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (11.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (11.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (11.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (11.4)$$

Maxwells bidrag motsvarar termen $\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ i högerledet av (11.4). Tillsammans med Newtons gravitationslag utgör ekvationerna den teori för växelverkan mellan partiklar som var känd fram till 1905. Einstein visade 1916, i sin allmänna relativitetsteori, att Newtons gravitationslag inte är exakt utan behöver korrigeras för objekt med stor massa. Däremot har Maxwells ekvationer visat sig vara exakta och korrekta. Även om man inte är insatt i matematiken och fysiken och förstår Maxwells ekvationer kan man nog ändå förundras över att så mycket kan beskrivas av fyra korta rader.

11.2 Några konsekvenser av Maxwells ekvationer

- Ljus är elektromagnetiska vågor.

- Det finns elektromagnetiska vågor av alla frekvenser.
- Elektromagnetiska vågor kan alstras av tidsberoende strömmar.
- Trådlös kommunikation (radiokommunikation) är möjlig.

År 1887 kunde den tyske fysikern Heinrich Hertz, se avsnitt 17 nedan, verifiera ekvationerna experimentellt.

12 Multiplex

Telegrafi var en revolutionerande teknik för mänskligheten. Efter succéerna med Cooke och Wheatstones telegraf 1837 och Morse system 1844 installerades det i rask takt nya telegrafsystemen runt om i världen. Det skedde också en teknikutveckling som ökade överföringshastigheten. Ett sätt att öka kapaciteten är att samtidigt sända och ta emot meddelanden på samma ledning. Man kallade tvåvägs-kommunikationen för duplex, ett ord vi använder än idag.

Det första systemet med duplex konstruerades av den amerikanske ingenjören Joseph Stearns. Systemet använde en låg spänning åt ena hållet och en hög spänning åt det andra. Det gav en fördubbling av hastigheten. Ett bättre system (kvadruplex) utvecklades av Thomas Alva Edison. Även det systemet använde en låg och en hög spänning, men utnyttjade dessutom att spänningen kan vara positiv eller negativ. Det gav fyra varianter och därmed fyra gånger så hög kapacitet.

Ett annat sätt att öka kapaciteten i en telegrafledning är att använda sig av det vi idag kallar frekvensuppdelad multiplexing, på engelska frequency division multiplexing (FDM)¹⁴. När man började utveckla FDM på 1870-talet kallade man det harmonisk telegrafi (harmonic telegraphy). Man använde då mottagare som bestod av elektromagneter kombinerade med stämgaflar. Konceptet var före sin tid och det dröjde till 1910 innan det första användbara systemet utvecklats, se [10, sid 26], men harmonisk telegrafi visade sig ha stor betydelse för att telefonen uppfanns.

13 Telefonen

Telefonen uppfanns av Alexander Graham Bell (1847–1922) år 1876. Bell framgångsrecept var att kombinera målmedvetenhet med envishet och entusiasm. All forskning som så småningom ledde fram till telefonen gjorde han på sin fritid. Till professionen var Bell lärare för dövstumma och 1871 utnämndes han till professor i undervisningsteknik för dövstumma vid universitetet i Boston. Han växte upp i Skottland men flyttade vid 24 års ålder till Kanada. Där började han experimentera med harmonisk telegrafi. I mottagaren för harmonisk telegrafi ingår ett membran som sätts i rörelse av en elektromagnet. Bell noterade att det går att se vibrationerna i membranet och han var därför ett tag inne på att använda detta för att kommunicera med döva. Det dröjde dock inte länge förrän han satte upp ett ännu högre

¹⁴I kommunikation med optiska fibrer används också FDM, men där kallas det wavelength division multiplexing (WDM)

mål, att kunna skicka mänskligt tal via en telegrafledning. För att lyckas behövde han en sändare som kan överföra ljud till en ström som varierar i takt med ljudet och en mottagare som kan överföra ström till ljud som varierar i takt med strömmen. Strömmen mellan sändare och mottagare förmedlas av en telegrafledning. Bell och hans assistent Watson använde en så kallad vattenmikrofon som sändare. Den ger upphov till en resistans som varierar i takt med ljudet. Som mottagare använde de en elektromagnet och en tunn metallskiva.

Det var genom ett misstag som Bell och hans assistent Watson fick en första indikation på att de var på rätt spår. Watson råkade stöta till ett metallblad som tillhörde sändaren och då hörde Bell ett metalliskt pling i mottagaren. Efter fyrtio veckors experimenterande lyckades de till slut överföra tal. Så här beskrivs händelsen, se [8, sid. 17]:

For forty weeks-long exasperating weeks- the telephone could do no more than gasp and make strange inarticulate noises. Its educators had not learned how to manage it. Then, on March 10, 1876, IT TALKED. It said distinctly- "MR. WATSON, COME HERE, I WANT YOU." Watson, who was at the lower end of the wire, in the basement, dropped the receiver and rushed with wild joy up three flights of stairs to tell the glad tidings to Bell. "I can hear you!" he shouted breathlessly. "I can hear the WORDS."

Telefonen var därmed uppfunnen. Bell tog patent på sin telefon och det bildades ett bolag, Bell Telephone Company, som utvecklade och sålde telefoner och telefonväxlar. Bolaget är grunden för AT&T som idag är världens största bolag inom telekommunikation. Bell tog patent i en mängd länder, men av någon anledning inte i de nordiska länderna, något som skulle ha stor betydelse för Sverige.

14 LM Ericsson

Lars Magnus Ericsson (1846–1926) föddes och växte upp i den lilla byn Vegerbol i Värmland. Då han var tolv år avled fadern och den unge Lars Magnus var tvungen att börja arbeta. Han kom att arbeta som rallare och gruvarbetare, både i Sverige och Norge. År 1867 flyttade han och hans familj till Stockholm och han tog anställning vid Öller&Co, som huvudsakligen tillverkade telegrafutrustning. Där visade Lars Magnus framfötterna, och efter sex år, 1873, fick han, tack vare sina färdigheter, ett stipendium för att utbilda sig utomlands. Han åkte till Schweiz och Tyskland och arbetade kortare perioder hos Siemens och Halsk. Han tillägnade sig såpass kunskaper att han kunde konstruera telefoner och telefonutrustning. Eftersom Bell inte hade patenterat sin telefon i de nordiska länderna såg Lars Magnus en möjlighet att slå sig in på telefonmarknaden. Han startade ett företag, sedermera LM Ericsson och idag Ericsson, som utvecklade och sålde telefoner. Det stora genombrottet kom 1884 då företaget lanserade en telefon där mikrofon och högtalare satt i samma enhet. Telefonen var ursprungligen avsedd för växeltelefonister, det var praktiskt att de kunde ha luren i ena handen och koppla upp samtal med den andra. År 1892 började man sälja en motsvarande typ av telefon, av gemene man kallad taxen, till allmänheten.

15 Hur mottogs Maxwells ekvationer?

Michael Pupin (1858–1935) var en ingenjör som utvecklade utrustning som möjliggjorde telefoni över långa sträckor. Det är dock av en annan anledning som Michael Pupin tas upp här. Han skrev en självbiografi *From immigrant to inventor*, se [6], som publicerades 1923 och fick ett Pulitzerpris 1925. Där finns beskrivet hur Maxwells teorier togs emot i England, USA och Tyskland.

Pupin kom i kontakt med Maxwells teorier under sina studier på Columbia College i USA. Han ville sätta sig in i teorin men det fanns ett problem, inga lärare på något universitet i USA hade tillräckliga kunskaper i Maxwells teorier för att undervisa i elektrodynamik. Pupin fann dock en lösning på problemet. Genom ett stipendium fick han år 1883 möjlighet att resa till England för studier vid Cambridge, universitetet där Maxwell 12 år tidigare blivit professor. När Pupin reser tar han med sig en fråga, ”Vad är ljus?”, ämnad för Maxwell. Väl framme i Cambridge får han reda på att Maxwell dött redan 1879. Pupin förväntar sig då att någon av Cambridges framstående fysiker och matematiker under studietiden skall ge svaret på frågan. Pupin får visserligen lära sig tillräckligt med matematik för att kunna läsa Maxwells arbeten, men någon förklaring av fysiken i Maxwells teorier får han inte. För att få svar på sin fråga om ljus flyttar Pupin till Berlin där fysikern Hermann von Helmholtz är professor. Helmholtz hade startat upp laborativ verksamhet inom elektrodynamik och var dessutom relativt förtrogen med Maxwells arbeten.

Pupin var god vän med fysikern John Tyndall¹⁵, föreståndare för the Royal Institution i London, och Tyndall gav följande kritiska syn på laborativ verksamhet inom elektrodynamik i England och USA: *You will find in the Berlin laboratory the very things which my American and British friends and I should like to see in operation in all college and university laboratories in America and in the British Empire. In this respect the Germans have been leading the world for over forty years, and they have been splendid leaders.*”

Det var inte alla fysiker i Berlin som anammat Maxwells teorier, något som tydligt framgår av Pupins beskrivning av en kurs i elektromagnetism som Pupin tog under sin tid i Berlin. Kursen gavs av fysikern Gustav Kirchhoff som sedan 1875 var professor i Berlin. Kirchhoff företrädde den tyska fysikskolan som hade sin grund i de teorier som utvecklats av framförallt Wilhelm Weber och Kirchhoff själv. Så här beskrivs Kirchhoffs kurs i Pupins bok:

I attended the course and waited and waited, but waited in vain to hear Kirchhoff's interpretation of Faraday and Maxwell. At the close of the semester the course ended and the electromagnetic theory of Faraday and Maxwell was referred to on two pages only, out of two hundred; and the part so honored was not, even according to my opinion at that time, the essential part of the theory.

Pupin fick alltså inget svar på sin fråga om ljus av Kirchhoff, utan förklaringen av de elektromagnetiska vågorna gavs av Hermann von Helmholtz.

¹⁵Tyndall publicerade redan 1859 banbrytande resultat om koldioxidens förmåga att absorbera infraröda elektromagnetiska vågor. Han visade därmed att koncentrationen av koldioxid i atmosfären är mycket viktig för jordens temperatur. Den svenske kemisten Svante Arrhenius vidareutvecklade sedermera Tyndalls teorier.

Det tog över 20 år innan Maxells teorier slog igenom på allvar. Det finns flera förklaringar till detta. En är att det saknades experimentella bevis av Maxwells ekvationer. En annan är att matematiken i Maxwells arbeten är komplicerad och gör fysiken svårtillgänglig. Tolkningen av ekvationerna försvårades ytterligare av den tidens uppfattning att ljus utbreddes sig i en eter. Etern var en geléliknande substans och ljus ansågs vara vibrationer som fortplantade sig i denna gelé. För att beskriva vibrationerna användes komplicerade mekaniska modeller. Det är två forskare, Heinrich Hertz och Oliver Heaviside, som gör att Maxwells teorier så småningom slår igenom på bred front. Heinrich Hertz visar experimentellt existensen av de elektromagnetiska vågorna och Oliver Heaviside förenklar och vidareutvecklar Maxwells teorier, se [1].

16 Oliver Heaviside (1850–1925)

Heaviside började läsa Maxwells bok *A treatise on electricity and magnetism* 1873 för att få ökad förståelse för vågutbredning längs telegrafledningar. Han hade då under flera år arbetat med undervattenskablar för telegrafi och byggt upp en fysikalisk känsla för de spänningar och strömmar som utbreder sig längs ledningarna. Nu ville han även få en teoretisk förståelse. Ganska snart stötte han på sten i sitt läsande eftersom boken visade sig kräva betydligt mer kunskaper i matematik än vad Heaviside hade. Först efter ett par år av självstudier i matematik hade han tillräckliga kunskaper för att förstå Maxwells teorier. Den fysikaliska känsla han tillägnat sig genom sitt arbete med undervattenskablar i kombination med en teoretisk begåvning gjorde att Heaviside snart blev expert på Maxwells teorier. Teorierna var komplicerade men Heaviside såg att de gick att förenkla. Maxwell uttryckte ekvationerna i termer av elektriska och magnetiska fält, och i elektriska och magnetiska potentialer. Heaviside såg att det gick att eliminera potentialerna och bara uttrycka ekvationerna i fälten. Han förenklade också notationen genom att använda vektoranalys, en matematisk teknik som Heaviside utvecklade samtidigt med, men oberoende av, den amerikanske fysikern Josiah Willard Gibbs. De ursprungliga 20 ekvationerna med 20 obekanta i Maxwells teorier kunde därigenom reduceras till två vektorvärda ekvationer med två obekanta vektorfält, det elektriska fältet \mathbf{E} och det magnetiska fältet \mathbf{B} . Heavisides version av Maxwells ekvationer är de som ges i (11.1)–(11.4) ovan.

Heaviside gjorde också en stor insats för telefonins utveckling. När telefonen började användas hade man stora problem med dispersion¹⁶. Heaviside gav en korrekt formulering av teorin för vågutbredning längs telefonledningar och från denna följer att dispersion kan undvikas om $R/L = G/C$, där R är ledningens resistans per längdenhet, L dess induktans per längdenhet, G dess konduktans per längdenhet och C dess kapacitans per längdenhet. Konduktansen G är väldigt liten för de flesta

¹⁶Dispersion i transmissionsledningar innebär att signaler med olika frekvenser rör sig med olika hastighet längs ledningen. Eftersom mänskligt tal innehåller ett brett spektrum av frekvenser leder dispersion till att tal som skickas som elektriska signaler längs ledningar redan efter en kort sträcka blir grötigt och omöjligt att förstå.

ledningarna och Heaviside insåg att L därför måste öka för att minska dispersionen. Det gick stick i stäv med vad telefonbolagens experter på telefonledningar ansåg och Heavisides idéer förkastades av bolagen. Först när ett av telefonbolagen anställt två duktiga experter som förstod Heavisides analys insåg man att Heaviside hade rätt. Det var Michael Pupin, se avsnitt 15 på sidan 22, som visade hur man i praktiken kan öka induktansen. Hans metod var att koppla in spolarna ekvidistant längs telefonledningen. Man kallar detta att pupiniserar telefonledningen och spolarna kallas pupinspolarna. Michael Pupin patenterade sitt system 1899 och det har blivit standard inom trådbunden telefoni ända till våra dagar. Pupins metod möjliggjorde telefonsamtal över mycket långa sträckor.

17 Hermann von Helmholtz (1821–1894) och Heinrich Hertz (1857–1894)

Den tyske fysikern Hermann von Helmholtz var på professor i fysik vid universitetet i Berlin. Här hade man, till skillnad från universitetet i England och USA, i slutet av 1870-talet experimentell verksamhet inom elektromagnetism. Trots att det var Webers och Kirchhoffs teorier för elektromagnetism som var de som gällde i Tyskland hade Helmholtz blivit intresserad av Maxwells teorier. År 1879 rekryterade han en duktig doktorand vid namn Heinrich Hertz och presenterade ett fantastiskt doktorandprojekt för honom, ett projekt som var svårt, men inte omöjligt, och som om det lyckades skulle innebära ett stort paradigmskifte inom fysiken. Projektet var att experimentellt visa att det finns elektromagnetiska vågor¹⁷. Det skulle dröja till 1887 innan Hertz gav sig på den av Helmholtz föreslagna uppgiften. Då var Hertz redan doktor och hade även hunnit få en professur vid universitetet i Karlsruhe. I sitt experiment använde Hertz en halvstångsantenn som sändare och en lopantenn som mottagare. Om man analyserar Hertz utrustning kan man sluta sig till att kommunikationen från sändare till mottagare skedde med vågor i ett frekvensintervall kring 100 MHz, vilket i stort sett är samma frekvenser som vi idag använder för FM-radio.

Från [6, sid. 263-264]: *Referring to Doctor Heinrich Hertz, a former pupil of his and at that time professor of physics at the Technical High School in Karlsruhe, Helmholtz solemnly announced that he would describe some remarkable experimental results which Hertz had obtained by means of very rapid electrical oscillations. He then described in his inimitable way a preliminary report which Hertz had sent him, pointing out, in a most lucid manner, the bearing of these experiments upon the Faraday-Maxwell electromagnetic theory, and affirming that these experiments furnished a complete experimental verification of that remarkable theory. Everybody present was thrilled, particularly when Helmholtz closed with a eulogy of his beloved pupil, Hertz, and with a congratulation to German science upon the good fortune of adding another "beautiful leaf to its laurel wreath." That thrill soon reached the*

¹⁷Helmholtz utlovade också ett pris till den som kunde påvisa existensen av elektromagnetiska vågor.

physicists in every physical laboratory in the world; and for a number of years after that memorable announcement most investigators in physics were busy repeating the beautiful Hertzian experiments. The radio of to-day is an offshoot of those experiments.

Vi vet idag att Hertz resultat blev otroligt viktiga för utvecklingen av fysiken och elektrotekniken. Men Hertz var en ödmjuk man. Så här beskrev han nyttan med de vågor han detekterat:

De är inte av någon nytta. De visar bara att mästern Maxwell hade rätt. Vi har dessa mystiska elektromagnetiska vågor som vi inte kan se med blotta ögat. Men de finns där.

På frågan om det fanns några tillämpningar på hans upptäckt svarade Hertz:

Ingen tror jag.

Det hade varit roligt att då kunna flytta Hertz fram i tiden och visa honom vad hans vågor används till idag.

17.1 Hertz försök

Figur 10 visar den utrustning Hertz använde för att detektera elektromagnetiska vågor.

1. Spänningskällan 1 ger en konstant spänning V .
2. Kondensatorn 2 laddas upp av strömmen från spänningskällan.
3. När kondensatorn är uppladdad blir det en såpass stor elektrisk kraft på kontakten 3 att denna sluts.
4. När kontakten 3 sluts blir kondensatorn kortsluten vilket gör att spänningen V hamnar över den vänstra spolen i transformatorn 4. Den högra spolen i transformatorn har betydligt fler lindningsvarv än den vänstra. Det gör att det blir en mycket hög spänning över den högra spolen i transformatorn.
5. Spänningen över den högra spolen är stor nog för att skapa en gnista mellan de två kloten 5.
6. Gnistan är en strömpuls och denna exciterar antennen 6. Antennen består av de två rektangulära plattorna och ledningarna som går ner till kloten 5. Excitationen gör att antennen sänder ut en kraftig elektromagnetisk våg vars våglängd motsvarar halva antennens längd. Antennens längd är ungefär 1.5 meter vilket gör att vågen har frekvensen 100 MHz.
7. Vågen träffar den cirkulära mottagarantennen. Vågens magnetfält är vinkelrät mot cirkeln och det gör att det induceras en spänning mellan de två kloten 7. Spänningen är såpass stor att det blir fullt synbara gnistor mellan kloten.
8. Allt upprepas i ett cykliskt förlopp vars tidsperioden bestäms av hur snabbt kondensatorn 2 laddas upp.

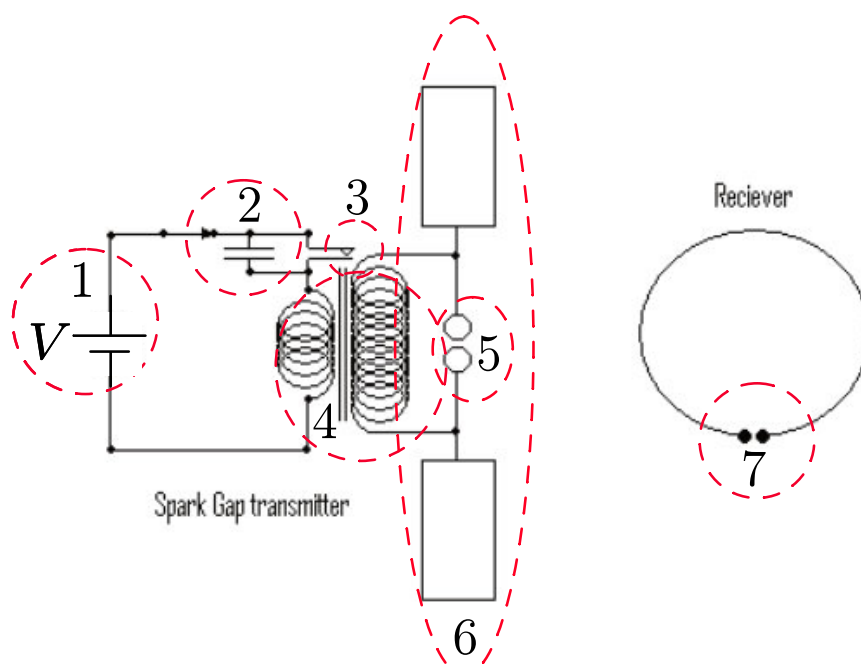


Figure 10: Hertz utrustning för att detektera elektromagnetiska vågor.

18 Guglielmo Marconi (1874–1937)

I september 1786 upptäckte Luigi Galvani galvanismen, en upptäckt som blev starten för elektrotekniken. Upptäckten gjordes i Galvanis hemstad Bologna. Etthundra år senare är det i samma trakt av Italien som ett annat stort elektrotekniskt paradigmskifte startar, den trådlösa kommunikationen.

Guglielmo Marconi föddes i Bologna 25 April 1874 och tillhörde en rik familj¹⁸. Under studietiden kom han i kontakt med en lärare på universitetet i Bologna som var insatt i Hertz experiment. När Marconi hörde läraren berätta om experimenten fick han en vision om trådlös telegrafi och han började strax att göra sina egna experiment. Marconi var då endast 20 år.

Marconi utvecklade ett system som till att börja med klarade av att skicka en signal 3.2 kilometer. Upprymd över sina resultat skrev han ett brev till det italienska ministeriet för post och telegrafi för att få ekonomiskt stöd för sitt projekt. Så här beskrivs brevet och dess mottagande: *”Marconi wrote to the Ministry of Post and Telegraphs, then under the direction of the honorable Pietro Lacava, explaining his wireless telegraph machine and asking for funding. He never received a response to his letter which was eventually dismissed by the Minister who wrote ”to the Longara” on the document, referring to the insane asylum on Via della Lungara in Rome.”*

Den italienska regeringens ointresse ledde till att Marconi, då 21 år gammal,

¹⁸Så här beskrivs hans föräldrar: The second son of Giuseppe Marconi, an Italian aristocratic landowner from Porretta Terme, and of his Irish/Scots wife, Annie Jameson (daughter of Andrew Jameson of Daphne Castle in County Wexford, Ireland and granddaughter of John Jameson, founder of whiskey distillers Jameson&Sons).

flyttade till England 1896. Där fick han stort stöd för sin forskning och han kunde ganska snart bilda ett bolag för att vidareutveckla tekniken. Tekniken förfinades och meddelanden kunde skickas över allt längre avstånd. År 1902 lyckades han skicka ett meddelande från USA till Irland. Trådlös telegrafi blev mycket betydelsefull där det inte gick att dra telegrafledningar. Detta gällde i synnerhet till sjöss, där kommunikation mellan fartyg ökade sjösäkerheten. Vid dimma kunde kollisioner undvikas genom att båtarna telegraferade sina positioner. När Titanic sjönk 1912 kunde många räddas tack vare att man telegraferat meddelanden till närliggande fartyg.

Runt 1915 började man använda amplitudmodulerade signaler. Det innebar att man kunde skicka ljud via radiovågor. Radiosändningar började runt 1920.

19 Långvågs- och kortvågsradio

I början av 1900-talet ansåg man att trådlös kommunikation över mycket långa avstånd, t.ex. mellan USA och Europa, endast kan ske med mycket lågfrekventa radiovågor. Därför byggdes ett stort antal långvågssändare runt om i världen. En av dessa är Grimeton vars antenn kan ses från E6. Grimetonsändaren stod färdig 1924 och opererar¹⁹ på frekvensen 17.3 kHz, vilket motsvarar en våglängd av 17 km. Redan 1922 hade radioamatörer i Europa kunnat höra sändningar från USA med hjälp av kortvågskommunikation. Till att börja med var detta i strid med teorierna för vågutbredning, men man fann en förklaring. Denna är att det runt jordklotet finns en jonosfär som innehåller fria elektroner. Jonosfären fungerar som ett ledande skikt som kan reflektera de radiovågor som används vid kortvågskommunikation. Utvecklingen av kortvågsradion gjorde att de transatlantiska kablarna och långvågssändarna delvis konkurrerades ut.

References

- [1] B. J. Hunt, *The Maxwellians*, Cornell university press, (1991)
- [2] Piccolino, Marco, "Luigi Galvani's path to animal electricity", *Comptes rendus biologies* **329.5-6** (2006) 303-318.
- [3] H. C. Ørsted, "Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle", Översättning från latin av Ørsteds ursprungliga artikel publicerad 1829 i the *Annals of Philosophy*. Den engelska versionen finns tillgänglig på nätet.
- [4] Kirchhoff, Gustaf, "On the motion of electricity in conductors", *Annalen der Physik*, vol 152, (1857), p. 529.
- [5] P.Graneau and A.K.T. Assis, "Kirchhoff on the Motion of Electricity in Conductors", APEIRON, (1994).
- [6] M. Pupin, *From immigrant to inventor* Charles Scribner's sons, New York (1949) (Boken finns på nätet)

¹⁹Sändaren fungerar fortfarande men är bara i drift vid speciella tillfällen.

- [7] Prescott, George *History, theory, and practice of electrical telegraph*, Ticknor and fields, Boston (1866) (Boken finns i Google books på nätet)
- [8] Herbert N. Casson, *The History of the Telephone*, The Gutenberg project (1997) (finns tillgänglig på nätet)
- [9] M. Schwartz and J. Hayes, "A history of transatlantic cables", *IEEE Communications Magazine* **46.9** (2008), 42-48.
- [10] S. Weinstein. "The history of orthogonal frequency-division multiplexing [History of Communications]", *IEEE Communications Magazine* **47.11** (2009), 26-35.
- [11] N. H. Heden, "Teleteknikens utveckling 1846-1946", *Ericsson Review* nr 2 (1946).
- [12] T. Standage, *The Victorian Internet*, Bloomsbury (2014).