

1 Elektromagnetism

Elektricitet

Ett av fysikens viktigaste fundament är *elektriciteten*. För att få ett begrepp om dess natur är det nödvändigt att studera materians inre. Detta är en värld fylld av svårförståeliga fenomen och företeelser vilka ingår i ett komplicerat samspel. Med hjälp av den enkla bohrska atommodellen (Niels Bohr, dansk fysiker, 1885–1962) får man dock en uppfattning om materians elementära uppbyggnad på denna nivå. (Se fig. 2.2 mitten).

Man har funnit att elektricitet finns av två slag: *positiv* och *negativ*. Den positiva elektriciteten är bunden till atomens kärna, medan den negativa elektriciteten är bunden till atomens elektroner. Elektricitet kvantifieras bl.a. som elektrisk laddningsmängd (oftast betecknad med bokstaven Q). Den minsta laddningsmängd man känner är elektronens, vilken brukar kallas för *elementarladdning*. I en elektriskt neutral atom motsvaras elektronernas sammanlagda negativa laddning av en lika stor positiv laddning hos kärnan.

Elektrisk potential och spänning

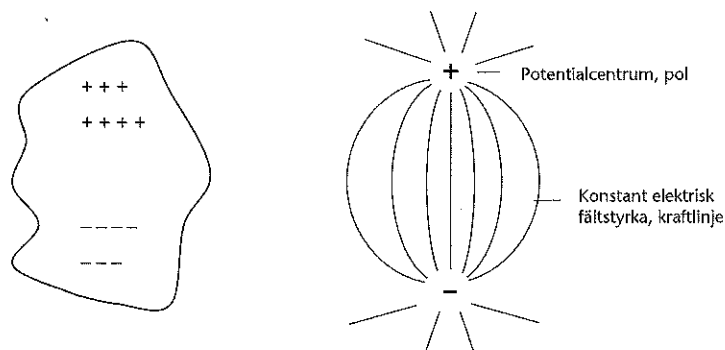
Varje elektrisk laddning har vad man brukar kalla en viss *elektrisk potential*, V . Om elektrisk balans råder i en kropp (eller mellan kroppar) sett utifrån systemet, såsom t.ex. är fallet i en vanlig neutral atom, uppvisar systemet lika stor positiv och negativ potential. Potentialskillnaden kallas för *elektrisk spänning*, u [V], fig. 1.1 tv.

Exempel:

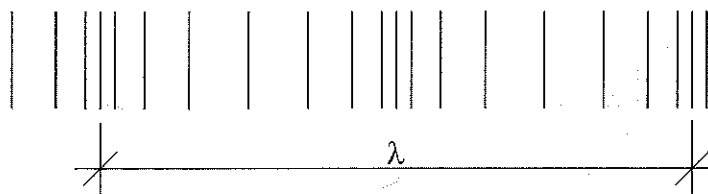
Spänningen mellan en kvantitet positiv elektricitet med potentialen $+V_1$ och en lika stor kvantitet negativ elektricitet med potentialen $-V_1$ blir

$$u = +V_1 - (-V_1) = +2V_1$$

räknat från $-$ laddningen. (+ tecknet framför spänningen brukar endast tas med då man är intresserad av hur potentialen förändras i t.ex. en elektrisk krets).



Figur 1.1 T.v: Kropp med separerade elektriska laddningar vilket ger potentialskillnad.
T.h: Utbildandet av elektriskt fält mellan poler.



Figur 1.2 Periodicitet.

Elektrisk potential antar (vanligen) olika värden i rummet. I ett laddningscentrum – *pol* – når den maximalt värde samt avtar lagbundet med ökat avstånd till polen. Man brukar illustrera elektrisk potential så som visas i fig. 1.1, th. Kombinationen av elektrisk potential och rumslig belägenhet kallas för ett *elektriskt fält* med *fältstyrkan* E [V/m].

Av utomordentligt stor betydelse för elektromagnetismens natur är fältens utbredningshastighet. Denna hastighet betecknas med c [m/s]. c har värdet $2.998... \cdot 10^8$ [m/s], oftast approximerat till $3 \cdot 10^8$ [m/s]. Om man tänker sig att ett fält skiftar storlek på ett regelbundet sätt kommer detta att ge en rumslig kvantitet som betecknas med λ (lambda) och som är produkten av c och tiden T för en cykel eller *periodtiden*.

$$\lambda = c \cdot T \left[\frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{s}} \right] \quad (1.1)$$

Storheten λ [m] kallas för *våglängd*. Kvoten c/λ [1/s] kallas för *frekvens*, betecknas med f och har oftast den alternativa dimensionen [Hz] (efter tyske fysikern H. Hertz, 1857–94).

Elektrisk ström

En av elektricitetens vid sidan av den elektriska potentialen viktigaste ytt-ringar är *elektrisk ström*. Elektrisk ström finns av två slag:

(1)

En immateriell ström vilken kan uttryckas som

$$\frac{\delta \psi}{\delta t} \text{ [A]}$$

Denna ström skulle man kunna kalla för "flödesström". Faktorn ψ (psi) [As] är en storhet kort och gott benämnd *elektriskt flöde*. Eftersom detta flöde är rumsberoende räknar man ofta i stället med flödestätheten D [As/m²], vanligen kallad *förskjutning*. Den immateriella strömmen blir då i stället

$$\frac{\delta D}{\delta t} \text{ [A/m}^2\text{]}$$

vanligen kallad *förskjutningsström(täthet)*. Som framgår av uttrycken så blir förskjutningsströmmen = 0 när fält, flöde och flödestäthet är konstanta. Ju snabbare dessa storheter varierar desto större blir förskjutningsströmmen.

Drivkrafterna, "motorn", till förskjutningsströmmen är:

a) *Elektrisk potentialskillnad*.

Förskjutningsströmmens storlek beror på:

- storleken hos E [V/m].
- värdet hos en materialkonstant, *dielektricitetskonstanten* ϵ (epsilon) [As/Vm] i det material där fältet befinner sig.
- Frekvensen hos D [As/m²] ($\delta D/\delta t$, hur snabbt D varierar).

Mellan förskjutning, fältstyrka och dielektricitetskonstant råder sambandet

$$D = E \cdot \epsilon \left[\frac{\text{As}}{\text{m}^2} = \frac{\text{V} \cdot \text{As}}{\text{m} \cdot \text{Vm}} \right] \quad (1.2)$$

En mycket stor grupp av material har ϵ -värden av någotsånär lika storlek. Värdet ligger inom ett par 10-potenser (1–100 [As/Vm]). Hos gaser och vakuum är dessa värden dock flera 10-potenser lägre. För vakuum har ϵ storleken $\approx (1/36 \pi) \cdot 10^{-9}$ [As/Vm] och kallas ϵ_0 .

b) Ett magnetiskt flöde vars storlek varierar i tiden (se forts).

Storleken hos det elektriska fält som skapas (induktion) är

$$-\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}$$

När väl storleken hos det elektriska fältet är fastställt kan sedan förskjutningen och förskjutningsströmmens storlek räknas ut.

(2)

Den andra typen av elektrisk ström utgörs av ett slags "materiellt" flöde. Flödet består av fysiska laddningsbärare i form av elektroner. Hos vissa material förekommer alltså en fysisk "laddningsbärarström". Material som ger upphov till denna ström sägs vara *konduktiva*, och strömmen kallas för *konduktionsström* eller *ledningsström*, betecknad med i [A]. Eftersom även denna ström är rumsberoende föredrar man ibland att i stället använda *strömtätheten* S [A/m²].

Drivkraften för ledningsström är:

a) *Potentialskillnad* på samma sätt som för förskjutningsström.

Ledningsströmmens storlek beror på:

- storleken hos det elektriska fältet E [V/m].
- storleken hos en materialkonstant betecknad med γ (gamma) [A/(m · V) eller [m/Ω].

Mellan fältstyrka, konduktivitet och strömtäthet råder sambandet

$$S = E \cdot \gamma \left[\frac{A}{m^2} = \frac{V \cdot A}{m \cdot mV} \right] \quad (1.3)$$

En ytterst viktig skillnad mellan förskjutningsström och ledningsström är att den senare är oberoende av med vilken frekvens E varierar.

Konduktivitet är en materialegenskap som har utomordentligt stor teknisk betydelse. Dess inverterade storhet är *resistivitet* r [Ω · m]. Värden för r kan man få ur tabeller. Speciellt metaller har stor konduktivitet eller god ledningsförmåga.

b) *Tidsvarierande magnetiskt flöde* (se forts.). Ledningsström kan precis som förskjutningsström åstadkommas av ett magnetiskt flöde som varierar i tiden (induktion). Storleken hos E blir som tidigare

$$-\frac{\delta \vec{B}}{\delta t}$$

Magnetism

Magnetismen är i likhet med elektriciteten en företeelse som förekommer på alla skalnivåer i naturen. Låt oss betrakta följande:

En elektrisk laddning befinner sig i vila vid en pol. Den bidrar därmed till storleken hos den latent elektriska energin eller den elektriska potentialen hos polen. Om laddningen av något skäl rör sig från polen, kommer polen att förlora energi, inte bara för att den mister laddningen i sig, utan även för att laddningen kan sägas representera viss rörelseenergi. Polen kan därmed anses ha förlorat mera energi än vad laddningen representerar, elektriskt. Emellertid kan inte energi försvinna, så någon annan energiform bör därför rimligen uppkomma under laddningens rörelse. Så är också fallet, och energitypen *magnetism* kan sägas representera denna energi.

Magnetiskt flöde

Magnetismen yttrar sig i form av ett *magnetiskt flöde* – ett slags ström – vilket betecknas med Φ (fi) [Vs]. Eftersom flödet är rumsberoende har man ofta behov av att ange *flödestätheten*, betecknad med B [Vs/m²]¹⁾.

Drivkraften – "motorn" – bakom det magnetiska flödet är:

a) *Den av elström genererade magnetiska (fält)vektorn*. Denna bildar ett fält med koncentrisk utbredning från strömbanor. (Den i inledningen omtalade laddningens bana kan sägas utgöra en strömbana). Drivkraftens position och riktning i förhållande till en strömbana framgår av fig. 1.6. Den magnetiska vektorn betecknas med H [A/m]. Vilken storlek fältvektorn H får när den skapas av en elektrisk strömbana kan skrivas som

$$\vec{S} + \frac{\delta \vec{D}}{\delta t}$$

Av detta uttryck framgår att fältvektorn skapas av en ledningsström och/eller en förskjutningsström. Storleken hos den senare beror på vilken frekvens dess upphov, det elektriska fältet, har.

Det magnetiska *flödets* storlek beror på:

- storleken hos den magnetiska fältvektorn H [A/m].
- storleken hos en materialkonstant, ett slags "magnetiskt motstånd", kallad (relativa) permeabiliteten och betecknad med μ (my) [Vs/Am].

1 För magnetiskt flöde Φ används enheten Weber [Wb], vilket är detsamma som [Vs]. För magnetisk flödestäthet B används ibland tesla [T], vilket är detsamma som [Vs/m²].

Mellan magnetisk flödestäthet, magnetisk fältvektor och permeabilitet råder sambandet

$$B = H \cdot \mu \left[\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \frac{\text{A} \cdot \text{Vs}}{\text{m} \cdot \text{Am}} \right] \quad (1.4)$$

Värdet på permeabiliteten μ har mycket stor teknisk betydelse och skiftar starkt mellan olika material. Högst värden har järnbaserade material. För vakuum har μ storleken $4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Vs/Am}]$ och kallas μ_0 .

b) En permanent magnetiska (fält)vektor. Ursprunget till denna fältvektor behandlar vi inte här. Intresserade hänvisas till fysiklitteraturen.

Hur rör sig elektrisk ström i rummet?

Ledningsström

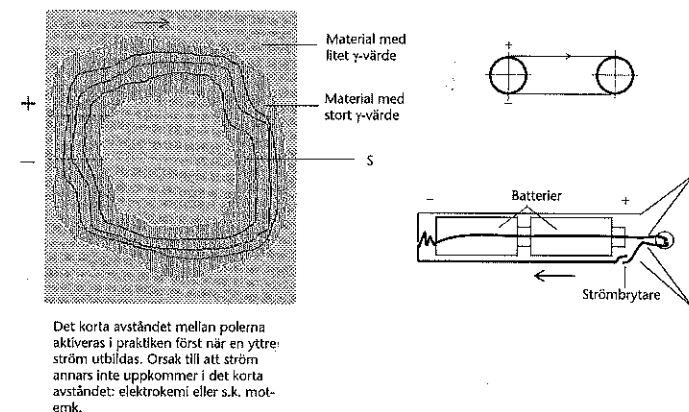
Strömmen rör sig definitionsmässigt från en pol med högre potential till en pol med lägre potential. Emellertid inte så som man kanske tänker sig, nämligen enbart från + till -. Strömmen går i stället i en sluten bana. Att så är fallet kan visas matematiskt (Se Appendix). Strömbanan kan liknas vid ett transportband i en snabbköpskassa eller liknande, dvs. ett band som går runt i all oändlighet i en ändlös rörelse. Potentialskillnaden blir då drivrullarna som får bandet att röra sig [Maxwell I].

Strömmen i t.ex. en ficklampa går från batteriets + pol, till glödlampan, genom glödlampan, till batteriets - pol, genom batteriet och tillbaka till + polen. Strömmen kan alltså inte "stanna någonstans på vägen", fig. 1.3. (Eftersom strömmen teoretiskt är olika stark i olika punkter i rummet, ersätter man alltså ibland strömmen i med strömtäthet $\vec{S} [\text{A/m}^2]$).

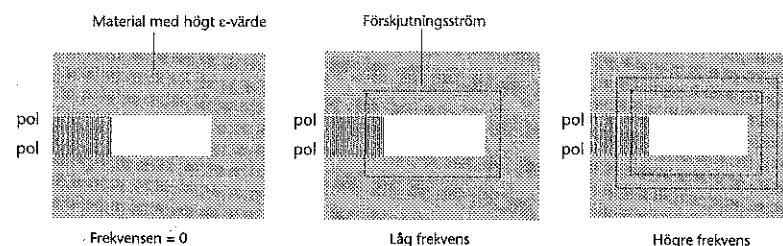
Ledningsförmågan skiftar starkt mellan olika material. Vid konstruktion av ledningsströmkretsar väljer man ledningsmaterial med god ledningsförmåga eller högt γ -värde. Där den sortens material finns i konstruktionen, finns också i allmänhet ledningsströmmen. På detta sätt blir strömbanorna mycket väl definierade i rummet. Även om en ledningsbana är "tillknäppt" på olika sätt måste likväl banan vara sluten. Ledningsströmmens storlek är oberoende av frekvensen.

Förskjutningsström

Förskjutningsströmmen rör sig på två sätt beroende på om "drivkällan" är en spänning eller ett tidsvarierande magnetflöde.

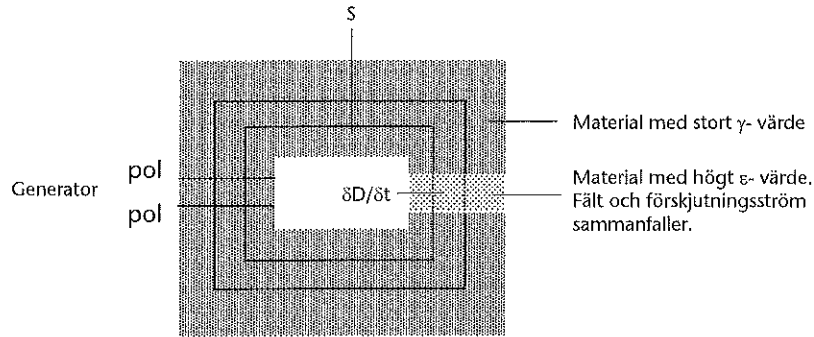


Figur 1.3 T.v: Hur ledningsström utbildas i material med stort γ -värde. E-fältet blir starkt när avståndet är litet mellan punkter med olika potential (ej utritat här). Ovan t.h. Hur en strömbana kan liknas vid ett transportband. Nere t.h: Hur ledningsströmmen bildar en sluten bana i en ficklampa.



Figur 1.4 Förskjutningsström ($\delta D/\delta t$) i material med högt ϵ -värde.

I det förra fallet, då drivkällan är en potentialskillnad, rör sig inte förskjutningsströmmen i en sluten bana. Låt oss återgå till liknelsen med transportbandet. Man kan då tänka sig att en drivrulle och en del av bandet är ersatt med en fram- och återgående hävstångsanordning, vilken får den resterande delen av bandet att röra sig i en fram- och återgående rörelse. Denna rörelse kan då inte ske utefter en sluten bana eftersom bandet är avbrutet vid drivanordningen. Storleken på strömmen är frekvensberoende som $k \cdot f$ vilket innebär att strömmen blir = 0 om frekvensen är 0 Hz, fig. 1.4. (Hela anordningen måste dock bilda en sluten enhet. Liknelsen ovan motsvaras av en växelströmgenerator kopplad till en kondensator. Genom genera-



Figur 1.5 En vanlig kombination av ledningsström och förskjutningsström i en krets.

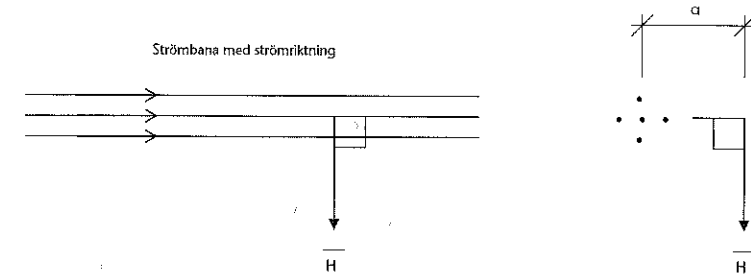
torn går en ledningsström, och genom kondensatorn går en förskjutningsström [Maxwell I]).

I det senare fallet, då förskjutningsströmmens drivkälla är ett varierande magnetflöde, rör sig förskjutningsströmmen i en sluten bana runt detta flöde. I liknelsen med transportbandet låter vi bandets drivning bestå av ett stort antal fram- och återgående små drivrullar vilka verkar mot bandets kant utefter hela dess längd. Bandet kommer då att runt hela sin längd röra sig fram och åter [Maxwell II].

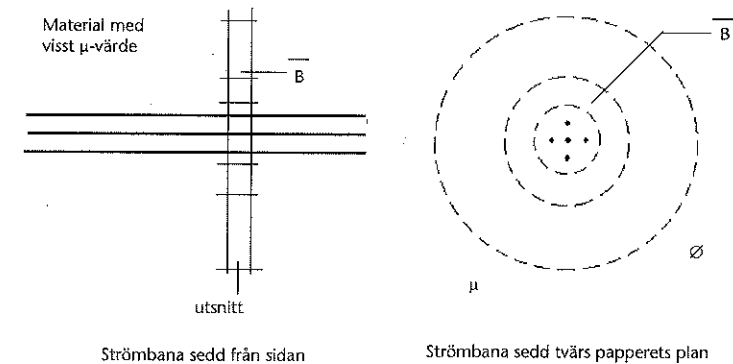
Av uttrycket $D = \epsilon \cdot E$ ser man att ett materials ϵ -värde har den allra största betydelse för förskjutningens och förskjutningsströmmens storlek. Trots att ϵ i luft (och vakuum) är enormt mycket lägre än i många fasta material så är ändå flödesutbredningen där av stor betydelse. Dels därför att vi praktiskt taget alltid är omgivna av luft, dels därför att förskjutningsströmmens storlek alltså ökar med frekvensen och till slut kan nå intressant storlek även i luft.

Hur rör sig magnetiska flöden?

Redan i inledningen antydde att även magnetiska flöden måste bilda slutna banor, något som också kan visas algebraiskt (Appendix), fig. 1.6 och 1.7. Av uttrycket $B = \mu \cdot H$ framgår att värdet på μ har den största betydelse för storleken på B . Speciellt järnhaltiga material har flera 10-potenser större μ -värde än de flesta material. Om man låter magnetflödet följa material med högt μ -värde blir flödet inte bara stort utan också relativt sett väldefinierat i rummet.



Figur 1.6 Hur den magnetiska fältvektorn H (magnetismens "drivkälla") utbildas i förhållande till en strömbana. Vektorn H 's storlek beror på strömmens storlek och avståndet a i figuren. Strömbanan till vänster är sedd från sidan. Till höger vinkelrätt mot strömriktningen. Strömmen går "ut ur papperet".

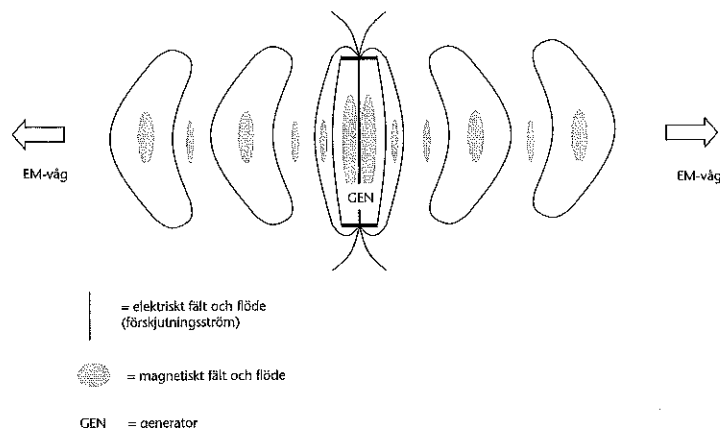


Figur 1.7 Uppkomsten av det magnetiska flödet Φ och flödestätheten B . Flödet Φ 's storlek beror på vektorn H 's storlek och på materialets permeabilitet μ .

Två viktiga naturlagar

Som beskrivits under "Magnetism" så bildas magnetiska fält av elektriska strömmar. Längre trodde man att ledningsström var ett villkor för bildandet av denna magnetism. I spetsen för denna forskning gick fransmannen André Marie Ampère (se biografi fig. 1.9)²⁾. Att magnetism frambringas av elektrisk ström formulerade han i Ampères lag.

2 De biografiska uppgifterna är hämtade ur "The New Encyclopædia Britannica". (Chic. Min. USA, -97). Övriga biografier från "Nationalencyklopedin" (Bra böcker, -89, Högnäs).



Figur 1.8 Uppkomsten av EM-våg från en öppen krets. Se vidare texten.

Den skotske fysikern James Clerk Maxwell (se biografi) anade emellertid att ledningsström var ett viktigt men dock specialfall. Han antog att magnetism borde genereras från elektriska flöden i allmänhet. Han visade också detta teoretiskt. Det var framför allt genom att föra in den fiktiva förskjutningsströmmen som begrepp, som han lyckades formulera sina berömda ekvationer. Just detta anses vara hans kanske mest geniala insats. I slutet av 1800-talet kunde man också praktiskt verifiera hans teorier när de första försöken med trådlös telegrafi genomfördes.

Man lyckades också under denna tid visa att ett varierande magnetiskt flöde alstrar en varierande elektrisk spänning. Detta är det vi kallar *induktion*. Maxwell lyckades ge induktionslagen ($\mathcal{E} = -d\Phi/dt$) en allmännare form. (Se Appendix).

Det ovan sagda betyder alltså att elektrisk ström (även utan inblandning av ledningar) bildar magnetfält och magnetiska flöden, och att varierande magnetflöden bildar varierande elektriska fält och strömmar.

EM-våg

Hos den elektriska strömmen – oavsett om den utgörs av ledningsström eller förskjutningsström – måste när den t.ex. bildar slutna banor strömstyrkan i ett oändligt litet ytutsnitt hos strömbanan vara lika stor runt hela banan. (Man brukar illustrera detta med *en linje* i principsskisser).

James Clerk Maxwell, 1831–1879, skotsk fysiker. Maxwell anses vara en av 1800-talets mest moderna vetenskapsmän och en av dem som haft störst betydelse för 1900-talets fysik. Han är som vetenskapsman nästan jämbördig med storheter som Newton och Einstein. Maxwells teorier om elektromagnetisk strålning och hans fältekvationer – grundade på Faradays upptäckt av elektriska och magnetiska kraftlinjer – beredde vägen för Einsteins speciella relativitetsteori. Maxwell anses också ha betytt mycket för utvecklandet av det andra stora fundamentet i 1900-talets fysik, nämligen kvantteorin.

Maxwell började 1850 vid universitetet i Cambridge, där snart hans begåvning upptäcktes. Tvärt emot vad man kanske skulle vänta sig yttrade sig denna begåvning mera i en benägenhet att "se" än att "räkna sig fram till" svar på problem eller formulering av teorier. Maxwells förkärlek för "geometri" framför algebra lär ha varit omvittnad.

År 1856 blev han professor i naturfilosofi vid universitetet i Aberdeen, 1856 gifte han sig med Katherine Mary Dewar. Detta barnlösa äktenskap betecknades som "married life... of unexampled devotion". År 1856 blev Maxwell professor i naturfilosofi vid King's College i London. Från denna tjänst avgick han 1865. Dessförinnan hade han 1861 blivit invald i Royal Society. Mellan 1860 och 1865 åstadkom han sina mest betydande arbeten, framför allt teorier om elektromagnetiska fält. Först efter 1865 fullföljde han också sitt teori-bygge om elektromagnetismen och formulerade sina berömda ekvationer (se Appendix).

Förutom att arbeta med elektromagnetismen sysslade han också med andra delar av den klassiska fysiken, t.ex. termodynamik och statik. Dessutom gjorde han experiment med färgfotografi samt förklarade Saturnus ringar.

André Marie Ampère, 1775–1836, är en av 1700- och 1800-talens mest betydande fysiker och anses vara elektrodynamikens grundare. Redan vid 12 års ålder lär han ha behärskat en stor del av matematiken och hans karriär gick raskt. År 1801 blev han professor i matematik och fysik i Bourg, 1809 fick han en professur vid École Polytechnique i Paris.

Ampères begåvning uttryckte sig inte i ett metodiskt och tålmodigt sökande utan mera som ett flöde av idéer och teorier – matematiskt formulerade – när han blev inspirerad. När Ampère t.ex. fick veta att den danske fysikern Ørsted upptäckt att en magnetnål rörde sig i närheten av en strömgenomfluten ledare tog det inte mer än en vecka förrän han skrivit den första av de uppsatser, vars innehåll var teori om detta nya fenomen. Detta material var upphovet till det vi idag kallar Ampères lag, vilken generellt beskriver den magnetiska kraften mellan två elektriska strömmar. Ampère utvecklade också föregångaren till amperemetern eller gamla tiders galvanometer.

Figur 1.9 Biografier

Eftersom emellertid fältens utbredningshastighet inte är oändligt stor måste därför enligt Maxwell, vid varierande ström, nya slutna banor bildas eftersom en strömbana i vilken strömmen antar olika värden vid olika tider inte kan existera.

När dessa nya strömbanor bildas innebär detta också en strömförändring i rummet. En strömförändring ger upphov till ett varierande magnetiskt fält vilket i sin tur ger upphov till en varierande spänning (emk) och ström i rummet, vilken ger upphov till ett magnetfält osv. Man får vid växelström i princip alltid ett system av elektriska och magnetiska kretsar som fortplantas radiellt utåt i rummet från en källkrets. Man får en *elektromagnetisk våg*. (Se vidare kapitel 4), fig. 1.8.

I slutet av boken under "Appendix" finns för den som är intresserad en (förkortad) härledning av Maxwells berömda (grund)ekvationer. Här finns också exempel på Maxwells fältekvationer liksom exempel på ekvationer vilka beskriver generering från fält av spänning i ledning.

Tidsfunktioner

Hur fälts, spänningars och flöden/strömmars tidsfunktioner ser ut är av mycket stort intresse inom all elektroteknik. Hittills har vi bara tämligen ytligt noterat att dessa parametrars värden ofta varierar regelbundet, periodiskt, i tiden. De matematiska uttrycken för tidsfunktionerna kan ibland vara svåra eller nästan omöjliga att ställa upp.

Sinusfunktionen

Den enklaste och mest fundamentala av alla tidsfunktioner är *sinus(cosinus)funktionen*. Här som spänning.

$$u = \hat{u} \sin \omega t \quad (1.5)$$

Här är $\hat{u}$ = den högsta spänning som funktionen har [V], $\omega = 2\pi f$ [rad/s], t = tid[s]. 2π motsvarar 360° eller en period. $1 \text{ [rad]} = 360^\circ/2\pi = 57.3^\circ$. Utseendet hos en sinusfunktion framgår av fig. 1.10, överst. Viktigt att notera är att denna funktion inte har någon "början" och "slut" utan är kontinuerlig.

Om man gör ett diagram där storheterna spänning, ström, fältstyrka, flöde etc. anges på den lodräta axeln och svängningstal, frekvens, på den vågräta får man ett *spektrumdiagram*. Avsätter man en sinusfunktion i ett sådant diagram får man en lodrät linje med höjden u vid den frekvens som u har.

Fyrkantvågen, Dirac-pulsen

Kurvan i fig. 1.10, mitten, är vanlig i tekniken. Den benämns i dagligt tal *fyrkantvåg*. Även denna är kontinuerlig och har funktionen

$$u = \frac{2}{\pi} u_{pp} \left[\sin \omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3 \omega_1 t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega_1 t + \frac{1}{7} \sin 7 \omega_1 t \dots \right] \quad (1.6)$$

Som synes av ekv. (1.6) så ingår sinusuttryck som en väsentlig del. Man kan med en matematisk metod, fourieranalys, visa att alla tidsfunktioner är uppbyggda av sinus- och cosinuskomponenter med olika amplitud och frekvens. (J.B.J. Fourier, fransk matematiker, 1768–1830).

Godtyckliga tidsfunktioner

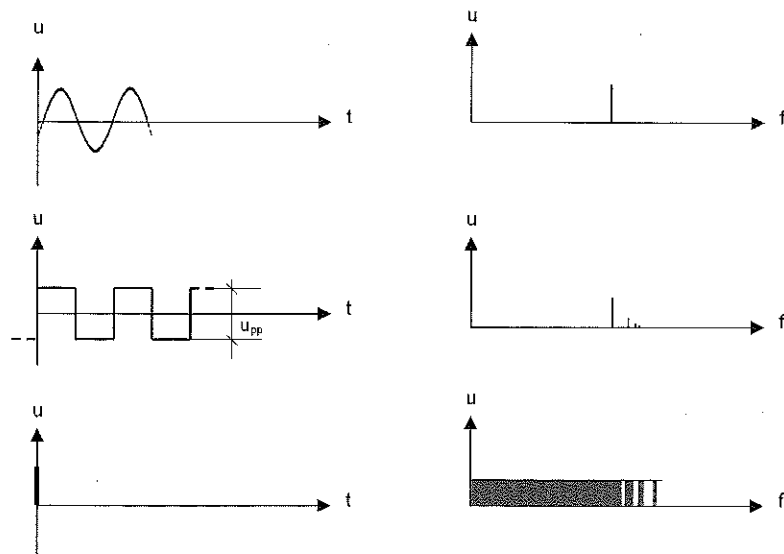
Storheterna hos de hittills redovisade funktionerna har varierat regelbundet i tiden. Man säger att funktionerna är *periodiska*. Dessa funktioner är också någotsånär enkla att hantera matematiskt. Utgörs spänningen, strömmen etc. i stället av t.ex. en enstaka puls blir matematiken emellertid mera komplicerad. Den största skillnaden jämfört med de periodiska funktionerna är att antalet sinus-/cosinuskomponenter blir oändligt. Fig. 1.11 är ett exempel på en oregelbunden funktion.

Sambandet mellan sinusfunktionen och en godtycklig funktion

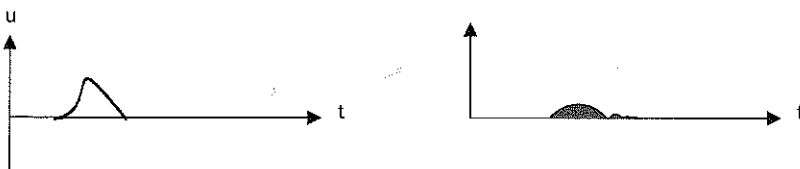
Efter att ha tagit del av ovanstående inställer sig en intressant fråga. Hur kan en relativt kort puls, t.ex. med pulslängden $100 \mu\text{s}$, vara uppbyggd av sinus-/cosinustermer vars utsträckning i tidled är oändliga? För att skapa sig en föreställning om den saken kan man ha viss nytta av att tillägna sig nedanstående bild.

Man utgår från att alla "frekvenser" alltid finns och är lika stora, men att deras inbördes fasförhållanden är sådana att när ingen detekterbar spänning (eller ström eller någon annan storhet) är för handen så tar alla frekvenserna ut varandra. Man kan då tänka sig att en generator som ger en sinusspänning fungerar så att den "förstärker" den frekvens som utspänningen har.

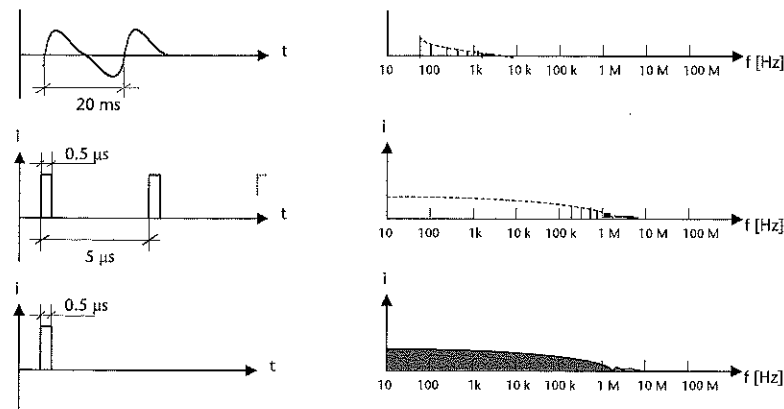
En anordning som ger en oändligt kort puls, en sk. dirac-puls (Dirac, fransk matematiker, 1902–84) ger då för ett ögonblick alla frekvenser samma fasläge. På grund av sin oändliga mångfald tar frekvenserna i nästa ögonblick ut varandra, och spänningen blir $= 0$ igen. Denna tankelek kan bidra till att öka förståelsen för hur olika tidsfunktioner är uppbyggda.



Figur 1.10 Överst: Sinusfunktion med spektrum. I mitten: Fyrkantvåg med spektrum. Underst: Dirac-puls med spektrum.



Figur 1.11 Exempel på enstaka puls med spektrum.



Figur 1.12 Exempel på funktioner med tillhörande spektrum.

En viss spänning eller ström etc. har alltså en viss utsträckning i tidled och ett visst spektrum, där man ser de olika sinuskomponenterna som lodräta linjer. Om man har en enstaka puls får man, som tidigare påpekats, ett oändligt antal sinuskomponenter och linjer i detta *kontinuerliga* spektrum. Man kan visa att dirac-pulsens utsträckning i frekvensled är oändlig, dvs. pulsen innehåller teoretiskt alla frekvenser, fig. 1.10, nederst. När det gäller tidsfunktioner har vi alltså de två ytterligheterna:

- Sinus(cosinus)funktionen med oändlig utsträckning i tidled men utan utsträckning i frekvensled.
- Dirac-pulsen utan utsträckning i tidled men med oändlig utsträckning i frekvensled.

I fig. 1.12 visas några kurvformer med sina spektra.