

Fra Ørstedes opdagelse af elektromagnetisme til det moderne trådløse samfund

Samel Arslanagić og Olav Breinbjerg, Faggruppen for Elektromagnetiske Systemer, DTU Elektro

Den geniale opdagelse af elektromagnetisme i 1820 af H. C. Ørsted var en vigtig forudsætning for James C. Maxwells teoretiske forudsigelse af elektromagnetiske bølger i 1864 samt Heinrich R. Hertz' eksperimentelle verifikation af deres eksistens i 1888. Elektromagnetiske bølger præger vores liv på et utal af måder og danner grundlag for en række teknologier, som vores moderne samfund hviler på. I nærværende artikel gennemgår vi kort egenskaberne af elektromagnetiske bølger og deres rolle i elektromagnetiske systemer for kommunikation, telemåling og energioverførsel.

Fra Ørsted til elektromagnetiske bølger

Før Ørsted betragtedes elektricitet og magnetisme som to adskilte discipliner. Elektricitet blev forklaret ud fra elektriske ladninger, enten i hvile eller i bevægelse (elektrisk strøm), mens magnetisme udelukkende blev beskrevet med magnetiske ladninger (poler) uden henvisning til elektricitet. Denne opfattelse blev dog for evigt ændret i 1820, da Ørsted opdagede, at en magnetiseret kompasnål blev påvirket af en elektrisk strøm passerende igennem en nærliggende metaltråd [1]. Det var klart for Ørsted, at den elektriske strøm (egentlig benævnt som den elektriske konflikt i [1]) forårsagede en kraft på kompasnålen, og at der derfor er et uløseligt forhold imellem elektricitet og magnetisme. De to grundlæggende kræfter i elektricitet og magnetisme blev fra nu af betragtet som en enkel, elektromagnetisk kraft manifesteret igennem et nyt videnskabeligt felt, som Ørsted døbte elektromagnetisme.

Ørstedes opdagelse bidrog i høj grad til udviklingen af den klassiske elektromagnetiske feltteori, som blev fuldendt af Maxwell i 1864 med hans geniale teoretiske forudsigelse af elektromagnetiske bølger, og endegyldigt af Hertz i 1888, som leverede et eksperimentelt bevis på deres eksistens. Maxwell konkluderede bl.a., at alle elektromagnetiske fænomener kan beskrives med blot fire ligninger, i dag kendt som Maxwells ligninger, givet ved (tiden er angivet med symbolet t [s]) [2]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t, \quad (1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1d)$$

hvor $\mathbf{E}$ [V/m] er den elektriske feltstyrke, $\mathbf{B}$ [T] er den magnetiske fluxtæthed, $\mathbf{H}$ [A/m] er den magnetiske feltstyrke, og $\mathbf{D}$ [C/m²] er den elektriske fluxtæthed. Operatorene $\nabla \times$ og $\nabla \cdot$, hvor ∇ er den såkaldte nabla-operator, angiver henholdsvis rotation og divergens af de involverende felter [2, 3]. Kilderne til felterne er ladninger og strømme angivet i (1) som rumladningstæthed ρ [C/m³] og rumstrømtæthed $\mathbf{J}$ [A/m²]. Når disse varierer i tid, ses det af (1), at felterne ikke er uafhængige af hinanden: en tidslig variation af et magnetisk felt

inducerer et elektrisk felt, og omvendt. Det er netop disse forhold, som muliggør elektromagnetiske bølger.

Lad os for at illustrere essensen af bølger betragte et sæt af felter, hvor $\mathbf{E}$ -feltet kun har én x -komponent, mens det tilhørende $\mathbf{H}$ -felt kun har én y -komponent. Felterne eksisterer i et medium med permittivitet ϵ [F/m] og permeabilitet μ [H/m], og er givet ved:

$$\mathbf{E} = \mathbf{a}_x E_x(z, t) = \mathbf{a}_x E_x(t - z/v), \quad (2a)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{a}_y H_y(z, t) = \mathbf{a}_y H_y(t - z/v), \quad (2b)$$

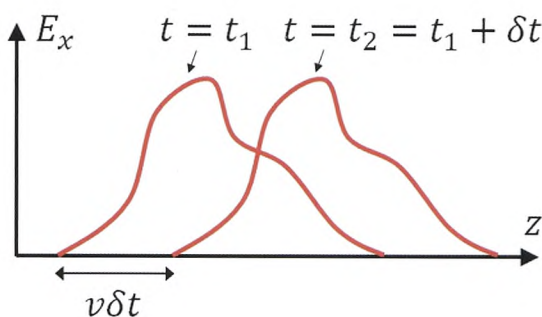
hvor $E_x(t - z/v)$ er $\mathbf{E}$ -feltets x -komponent, som afhænger af argumentet $(t - z/v)$, $H_y(t - z/v)$ er $\mathbf{H}$ -feltets y -komponent, som afhænger af det samme argument, z [m] er den rumlige stedkoordinat, t er tiden, og v [m/s] er en ukendt konstant. Det vises let, at (2) opfylder Maxwells ligninger, såfremt v er givet ved:

$$v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}. \quad (3)$$

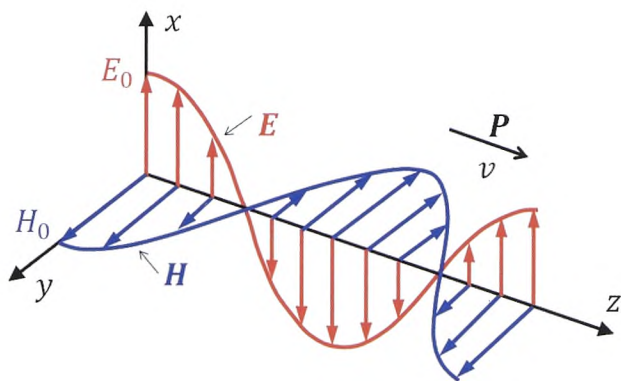
Hvad repræsenterer felterne i (2) egentlig? For at svare på dette betragter vi $\mathbf{E}$ -feltet ved to forskellige tider $t = t_1$ og $t = t_2 = t_1 + \delta t$, hvor $t_2 > t_1$. Det følger, at $E_x(z, t_1) = E_x(t_1 - z/v)$, mens $E_x(z, t_2) = E_x(t_1 - (z - v\delta t)/v) = E_x(z - v\delta t, t_1)$. Feltet i et arbitrært punkt z til det senere tidspunkt t_2 er det samme som feltet i en afstand $v\delta t$ til venstre for z beregnet til det tidligere tidspunkt t_1 . Dette er lige præcis, hvad bølgeudbredelsen handler om! Funktionen $\mathbf{E} = \mathbf{a}_x E_x(z - t/v)$ repræsenterer en bølge, som udbreder sig i den positive z -retning med udbredelseshastighed v givet ved (3). Disse forhold, som også gælder for det tilhørende $\mathbf{H}$ -felt, er grafisk illustreret i figur 1(a).

Indsættes $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m] og $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] for et tomt rum i (3), fås $v = 3 \cdot 10^8$ [m/s] svarende til lysets hastighed i det tomme rum. Lyset må altså være en elektromagnetisk bølge! Det kommer som ingen overraskelse i dag, men var en enestående opdagelse for Maxwell, som dermed fik indlemmet optik inden for elektromagnetismen. Hvad der ydermere er bemærkelsesværdigt, er, at elektromagnetiske bølger kan udbrede sig selv i det tomme rum. De behøver, i modsætning til fx lydbølger, intet medium for at udbrede sig. Stjernelyset, vi ser om natten, har udbredt sig gennem kolossalt store områder af næsten tomt rum.

(a)



(b)



Figur 1. (a) Illustration af bølgeudbredelse. (b) Tidsharmoniske elektromagnetiske bølger.

De såkaldte tidsharmoniske bølger er af særlig interesse i alle trådløse systemer. For eksemplerne i (2) er disse givet ved [3]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{a}_x E_0 \cos(\omega t - kz), \quad (4a)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{a}_y H_0 \cos(\omega t - kz), \quad (4b)$$

hvor E_0 [V/m] og H_0 [A/m] er de respektive felter amplituder, mens argumentet af cosinusfunktionen repræsenterer faser. Symbolet $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ betegner vinkelfrekvensen, hvor f [Hz] er frekvensen og T [s] er feltets periode. Symbolet $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ [m⁻¹] er bølgetallet, hvor $\lambda = v/f$ [m] er feltets bølglængde (rumlige periode). Felterne er periodiske i tid med perioden T , og i rum med perioden λ . Feltets tidslige variation bestemmes af frekvensen f , mens dets rumlige variation bestemmes af bølgetallet k . Felterne i (4) repræsenterer bølger, som udbreder sig i den positive z -retning; deres grafiske visualisering er inkluderet i figur 1(b). Der er en mangfoldighed af elektromagnetiske bølger såsom lys, radio- og mikrobølger, ultraviolet stråling og x-rays. Selvom de adskiller sig i frekvens, brug, og måden at generere dem på, så har de alle det til fælles, at de udbreder sig med en hastighed givet ved (3).

Mens elektromagnetiske felter kan oplagre energi, så kan elektromagnetiske bølger overføre denne energi. Sollyset indeholder som bekendt energi, som opvarmer Jorden. Utallige praktiske anvendelser af elektromagnetiske bølger som fx radiosendere i trådløse systemer,

mikrobølgeovne og ikke mindst lasere, gør alle flittigt brug af energien indeholdt i disse bølger. Ud fra en elektromagnetisk sammenhæng beskrives energioverførsel som den energi, der overføres per enhedstid per enhedsareal, eller som effekt per enhedsareal, hvor arealet er vinkelret på udbredelsesretningen. Vi taler altså om en effekttæthedsfunktion, som kan vises at være givet ved [3]:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad [\text{W/m}^2]. \quad (5)$$

også kendt som Poyntings vektor efter John H. Poynting. Dens størrelse angiver den øjeblikkelige effekt, som strømmer igennem et enhedsareal, når en bølge udbreder sig, mens dens retning angiver energiudbredelsesretningen. Den sidstnævnte er selvklaart sammenfaldende med udbredelsesretningen for bølgen, som det også er vist på figur 1(b).

Elektromagnetiske systemer

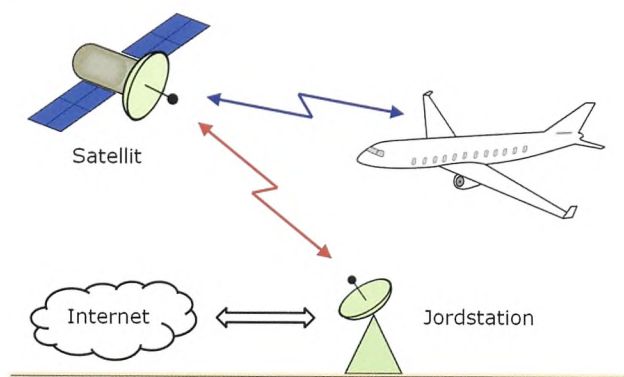
Elektromagnetiske bølger danner grundlag for utallige elektromagnetiske systemer og teknologier. Mange af disse er trådløse, og nogle få eksempler herpå vil blive beskrevet i det følgende. Trådløse systemer kan groft sagt inddeles i blot tre kategorier: 1) *trådløs kommunikation* [4], hvor der aktivt sendes information fra en part til en anden, som det kendes fra radio og TV, eller aktivt imellem to parter som i mobilkommunikation; 2) *trådløs telemåling* [5], hvor en part modtager information fra en anden eller fra noget andet, som ikke aktivt sender information; det kan fx være en flyradar eller en sikkerhedsscanner i lufthavnen; 3) *trådløs energioverførsel* (eller *effektoverførsel*) [6], hvor det ikke er informationen i bølgen, som er af interesse, men energien; det fremmeste eksempel er selvfølgelig Solens lys, der leverer al Jordens energi, mens et mere dagligdags eksempel er trådløs opladning af batteriet i mobiltelefonen. I det følgende beskrives en konkret anvendelse inden for hver af disse tre kategorier.

Trådløs kommunikation: Mobilt internet

I dag er vi allerede vant til at have adgang til internettet ikke blot fra faste computere derhjemme, men fra bærbare computere, smartphones og tablets mange af de steder vi færdes – på gaden, i bilen, i bussen, i toget, på skibe, og endda på flyrejser; det mobile internet er en realitet. I løbet af nogle få år vil det ovenikøbet blive både bedre og hurtigere, når det såkaldte 5G-netværk er etableret [7].

Som det er tilfældet for mobil kommunikation, er mobilt internet baseret på trådløs overførsel af information både fra og til antenner i vores trådløse enheder. Disse antenner modtager og sender mikrobølger fra og til antennerne på de faste basisstationer og routers, der udgør knudepunkterne i de mobile netværk og trådløse netværk. Ved at kode og modulere mikrobølgerne, dvs. at påtrykke mikrobølgerne specielle tidslige variationer, kan man overføre den ønskede information. Mikrobølger er elektromagnetiske bølger med en frekvens mellem 300 MHz og 300 GHz. Indtil nu har mobil- og trådløs kommunikation kun udnyttet frekvenser under 6

GHz, men med 5G sigtes efter højere frekvenser op til 60 GHz.



Figur 2. Illustration af mobilt internet på fly.

Det er forholdsvis nyt med mobilt internet på fly og skibe; denne teknologi er fortsat under kraftig udvikling, og den er da også særligt udfordrende, da den ikke kan baseres udelukkende på faste, landbaserede basisstationer. I stedet kommunikerer der via satellitter i kredsløb om Jorden og satellit-jordstationer til det almindelige internet (se figur 2). Den trådløse kommunikation følger en lang vej: passagerernes bærbare PC, smartphone eller tablet kommunikerer i første omgang trådløst med en router inde i flyet, denne kommunikerer via en trådet forbindelse til flyets ydre antenne, som kommunikerer trådløst med en satellit, der igen kommunikerer trådløst med en jordstation. Al den trådløse kommunikation er mikrobølger; inde i flyet anvendes frekvenser under 6 GHz som i almindelige trådløse netværk; men mellem fly og satellit anvendes frekvenser fra 10 til 40 GHz (de såkaldte Ku-, K-, og Ka-frekvensbånd). En anden væsentlig forskel er, at antennerne i flyet er rundstrålende for at sikre forbindelse uafhængigt af siddepladsen, mens den ydre antenne er meget direktiv, da den kun skal kommunikere i retningen af satellitten.

Der anvendes i dag oftest geostationære satellitter, som i deres kredsløb 36.000 km over Jordens overflade står stille i forhold til Jorden. Da flyet bevæger sig, vil retningen til satellitten ændre sig med tiden, og det betyder, at den ydre antenne skal kunne ændre sin kommunikationsretning. På grund af aerodynamiske forhold kan man ikke anvende fx en reflektorantenne, som drejes mekanisk. I stedet anvendes en avanceret type af antenne, som består af en gruppe af flade og små antenneelementer, og ved at tidsforskyde signaler til de enkelte elementer kan man ændre kommunikationsretningen uden nogen mekanisk drejning af antennen. Man kalder disse antenner fasestyrede antennegrupper (phased arrays) [4].

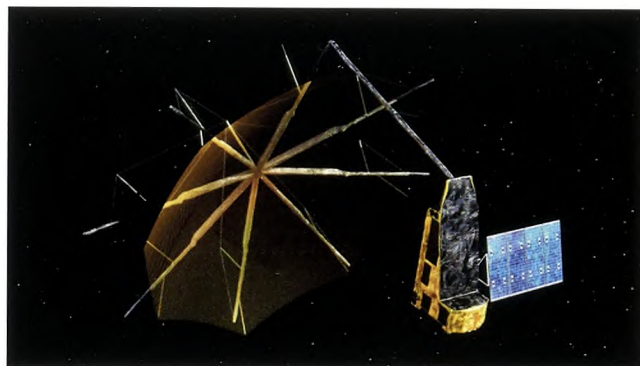
På grund af den lange vej fra fly til satellit og derefter fra satellit til jordstation reduceres mikrobølgens effektæthed væsentligt undervejs. Der arbejdes derfor på at anvende satellitter i lavere kredsløb, de såkaldte Low-Earth-Orbit (LEO)-satellitter i en højde af blot et par tusinde kilometer. Disse er til gengæld ikke stationære, men kredser Jorden rundt på blot et par timer. Det vil derfor kræve, at flyets ydre antenne

kan ændre kommunikationsretning meget hurtigt og desuden skifte fra den ene LEO-satellit, der forsvinder bag horisonten, til en anden synlig LEO-satellit uden tab af kommunikationen. Der foregår i dag en intens udvikling inden for antennteknologien for at overkomme disse udfordringer.

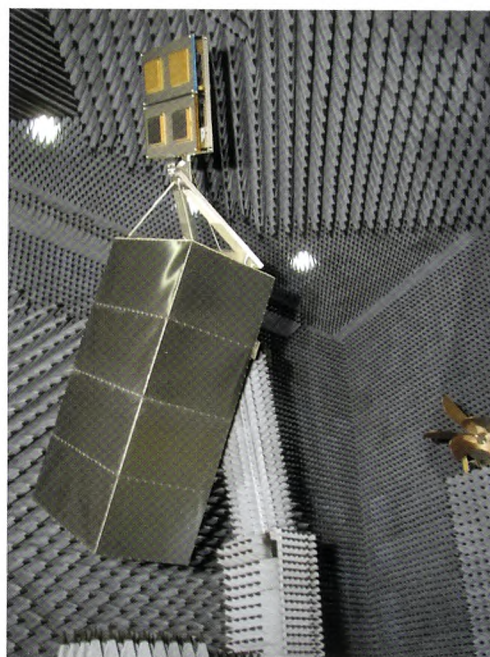
Trådløs telemåling: BIOMASS

Det Europæiske Rumagentur ESA (European Space Agency) planlægger opsendelse af BIOMASS-satellitten i 2022; fra en højde af ca. 650 km skal satellitten måle indholdet af biomasse i Jordens skove med en syntetisk apertur-radar, som giver en høj rumlig opløsning. Satellittens radarantenne sender en 435 MHz-mikrobølge ned mod et område på Jorden, hvorfra mikrobølgen spredes tilbage mod satellitten for dér at blive modtaget af samme radarantenne. Avanceret signalanalyse gør det efterfølgende muligt at beregne mængden af biomasse inden for det belyste område på Jorden. BIOMASS-missionen vil bidrage med vigtig viden om tilstanden af og ændringer i Jordens skove og om deres rolle i den globale CO₂-cyklus [8], [9].

(a)



(b)



Figur 3. Kunstnerisk gengivelse af BIOMASS-satellitten i rummet (a) og satellittens DTU-måle-model (b).

Radarantennen er en central del af BIOMASS-satellitten, og meget vil afhænge af, at denne antenne fungerer korrekt. Der er tale om en reflektor-antenne, som kendes fra satellit-tv-antenner på hustage, dog med den væsentlige forskel, at BIOMASS-satellitens reflektor vil være 12 m i diameter. Reflektoren må derfor være foldet sammen under opsendelsen af satellitten, og den bliver først foldet ud, når satellitten har nået sit kredsløb. Reflektoren har den vigtige funktion at fokusere mikrobølgen på et lokaliseret område på Jorden; men reflektoren er i sig selv en passiv struktur, og den skal belyses af den såkaldte føde-antenne. Mens reflektoren sidder på en arm ud fra satellitten, sidder føde-antennen tæt på satellitten med forbindelse til det elektroniske sender- og modtagerudstyr inde i satellitten, se også figur 3(a).

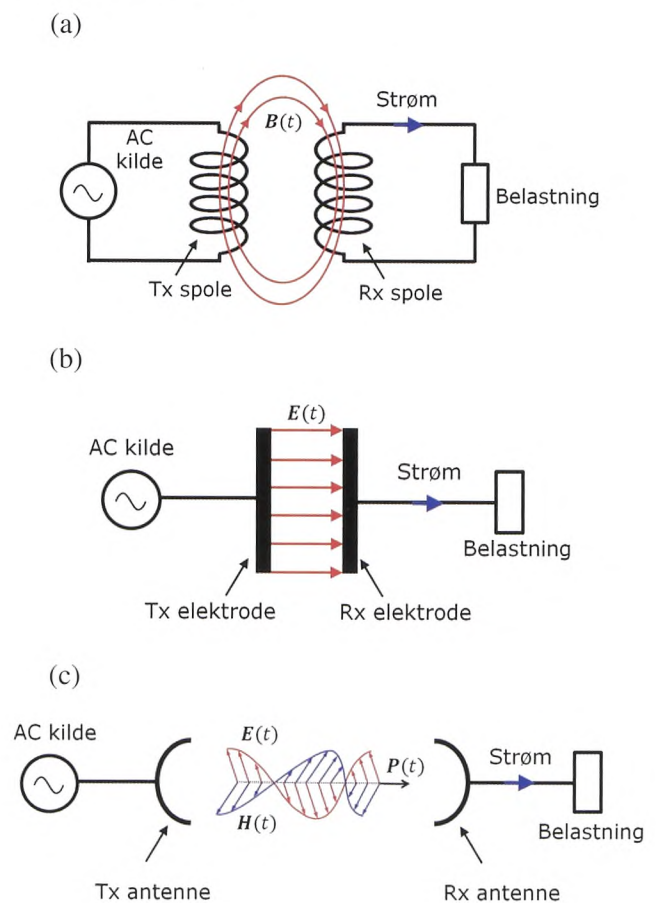
Alt udstyr, som sendes ud i rummet, må først testes meget grundigt på Jorden; dette gælder ikke mindst antenner. Sådanne tests foretages i radiodøde rum, som med en ydre skærm (et Faradaybur) og en indre beklædning af absorbenter på gulv, loft og vægge sikrer, at der ikke er nogen uønsket indstråling eller refleksioner, som forstyrrer målingen. Man genskaber så at sige de samme forhold som i det tomme verdensrum. I dag findes sådanne radiodøde rum mange steder, da de bliver brugt til test af al tænkelig trådløs teknologi; men der kræves en særlig nøjagtig type af radiodødt rum til test af satellitantenner, hvor der er meget høje krav til nøjagtigheden. Danmarks Tekniske Universitet (DTU) har et sådan radiodødt rum, som benyttes i samarbejde med ESA under navnet DTU-ESA Spherical Near-Field Antenna Test Facility. Dette navn hentyder til den ganske særlige måleteknik baseret på en sfærisk vektorbølgeudvikling af antennens udstrålede mikrobølge; en teknik, som er udviklet på DTU, og som sikrer den særligt høje nøjagtighed af målingerne [10], [11].

Som led i forberedelsen af BIOMASS-missionen har DTU udført en række målinger og tests af føde-antennen, se figur 3(b) [12]. Føde-antennen er en dobbelt-polariseret antennegruppe med 4 kvadratiske antenneelementer på i alt ca. 1 m^2 , som sidder øverst på en model af den $1075 \text{ mm} \times 1610 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ rektangulære satellit. Føde-antennen og satellitmodellen er monteret på et tårn, som roterer om både en vertikal og en horisontal akse, således at udstrålingen fra føde-antennen kan måles i alle retninger med den mindre laboratorieantenne, som også ses på billedet. Der er tale om en såkaldt nærfeltsmåling med ca. 6 m afstand mellem testantennen og laboratorieantennen; men efterfølgende kan det så beregnes, hvordan udstrålingen vil være på længere afstand i det såkaldte fjernfelt – fx de ca. 650 km fra BIOMASS-satellitens kredsløb til Jorden. På billedet ses også de kegleformede absorbenter i det radiodøde rum, som sikrer en refleksionsfri måling.

Trådløs energioverførsel: Batteri-opladning

Idéen om trådløs energioverførsel er slet ikke ny og kan siges at have sine rødder i Faradays opdagelse af elektromagnetisk induktion, fremkomst af transformere i 1800-tallet, og ikke mindst i Nikola Teslas banebrydende eksperimenter fra 1899, hvor energien for

første gang blev overført trådløst [13, 14]. Energien kan grundlæggende overføres trådløst via en induktiv kobling, en kapacitiv kobling, eller med elektromagnetiske bølger [6, 15]. De to førstnævnte mekanismer baserer sig på nærfeltet, mens den tredje udnytter fjernfeltet eller bølger. I induktiv kobling, se figur 4(a), haves en senderspole (Tx) og en modtagerspole (Rx). Der sendes en tidsvarierende strøm igennem sender-spolen. Denne genererer et tidsvarierende B -felt igennem modtagerspolen, som via Faradays induktionslov (som kan forklares via Maxwells ligning (1a)), inducerer en strøm, der kan leveres til en belastning. En variation af den induktive kobling udnytter magnetiske resonanser, hvor man i tilgift til spoler også har kondensatorer i systemet. I den kapacitive kobling, se figur 4(b), overføres energien via det tidsvarierende E -felt imellem sender- og modtager-elektroder. I tilfælde af elektromagnetiske bølger fokuseres energien skarpt fra en senderantenne til en modtagerantenne, se figur 1(c). Energien kan også overføres i form af lys i systemer, hvor en laser benyttes på sendersiden, mens modtageren indeholder en fotovoltaisk celle.



Figur 4. Trådløs energioverførsel via induktive (a) og kapacitive (b) koblinger og elektromagnetiske bølger (c).

Mens radio- og mikrobølger blev foreslået til fx solenergi-satellitter, hvor store solpaneler på satellitten opfanger Solens lys og sender den videre til Jorden, så er nærfelts-mekanismerne dominerende, når det kommer til de mere gængse forbrugeranvendelser såsom opladning af mobiltelefoner, bærbare computere og tablets, og sågar elbiler.

Elbiler og elbusser vinder utvivlsomt frem – og inden længe måske ellastbiler, eltog, og endda elfly. Elbilens energi kommer fra et stort batteri, som må oplades, når energien er brugt under transport. I dag oplades elbilens batteri næsten udelukkende via en ledning fra en fast ladestander (vi ser bort fra hybridbilerne, hvor batteriet også kan oplades fra motoren, når denne kører på benzin); men der arbejdes ihærdigt på at gøre trådløs opladning af elbiler praktisk muligt. I 2007 fik trådløs energioverførsel et væsentligt skub efter en gruppe forskere på MIT, USA, overførte 60 W trådløst over en afstand på 2 meter via den magnetiske resonans [16]. Netop denne teknologi anvendes i utallige af de ovenfor omtalte anvendelser, med fokus rettet især mod trådløs opladning af elbiler. Mens teknologien fra MIT udelukkende bruges til at oplade biler, som står stille, er der i dag en stor interesse for at kunne oplade elbiler i bevægelse, for hvilke rækkevidden og opladningstiden er faktorer uden stor betydning. Der bliver snakket om hele vejnetværk med elektriske opladningsbaner med indbyggede trådløse opladere; i Sydkorea blev en dynamisk opladning af en elbus demonstreret for nyligt over en vejbane på 48 km [17]. Disse og mange andre aktiviteter er stadig under hastig udvikling, og de forventes at fremme udviklingen og kommercialiseringen af teknologien i den nære fremtid.

Afsluttende bemærkninger

Opdagelsen af elektromagnetisme i 1820 af H. C. Ørsted var en vigtig forudsætning for Maxwells teoretiske forudsigelse af elektromagnetiske bølger i 1864 samt Hertz' eksperimentelle verifikation af deres eksistens i 1888. Elektromagnetiske bølger omgiver os alle og danner grundlag for en række teknologiske anvendelser af kolossal betydning for det moderne samfund. Vi har i denne artikel gennemgået egenskaberne af elektromagnetiske felter og bølger samt deres vitale rolle i konkrete trådløse systemer for kommunikation, telemåling og energioverførsel.

Litteratur

- [1] H. C. Ørsted (1820) "Experimenta circa Effectum Conflictus Electricitatis in Accum Magneticam," genoptrykt i H. C. Ørsted, "The discovery of electromagnetism made in the year 1820 by H. C. Ørsted," A. Larsen, København, 1920.
- [2] J. C. Maxwell (1954) A Treatise on Electricity and Magnetism, 3. udg., Dover, New York.
- [3] D. K. Cheng (1989) Field and Wave Electromagnetics, 2. udg., Addison-Wesley.
- [4] W. L. Stutzman og G. A. Thiele (2013), Antenna Theory and Design, 3. udg., John Wiley & Sons, New Jersey.
- [5] C. Elachi og J. V. Zyl (2006) Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing, 2. udg., Wiley-Interscience, New Jersey.
- [6] J. I. Agbinya (2015) Wireless Power Transfer, 2. udg., River Publishers.

- [7] <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
- [8] K. Scipal (2017) "The BIOMASS Mission – ESAs P-Band Polarimetric, Interferometric SAR Mission", Proc. of Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. s. 8127837.
- [9] https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/Biomass
- [10] http://www.ems.elektro.dtu.dk/research/dtu_esa_facility
- [11] J. E. Hansen (ed.) (1988) Spherical Near-Field Antenna Measurements, Peter Peregrinus Ltd., London.
- [12] S. Pivnenko, O. S. Kim, J. M. Nielsen, O. Breinbjerg, K. Pontoppidan, A. Østergaard og C. C. Lin (2013) "Electrical performance verification methodology for large reflector antennas: the P-band SAR payload of the ESA BIOMASS candidate mission", CEAS Space Journal, bind. 5, nr. 3–4, s. 211–219.
- [13] N. Tesla (1900) Apparatus for transmission of electrical energy, U.S. Patent 649621, May, 1900.
- [14] W. B. Carls (2005) "Inventor of dreams," Sci. Am., bind 292, s. 78–85.
- [15] L. Sun, D. Ma og H. Tang (2018) "A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging," Renewable and Sustainable Energy Reviews, bind 91, s. 490–503.
- [16] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher og M. Soljacic (2007) "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, bind 317, nr. 5834.
- [17] <https://www.wired.com/2013/08/induction-charged-buses/>



Samel Arslanagić er lektor i anvendt elektromagnetisk feltteori ved DTU Elektro. Hans forskningsinteresse inkluderer bl.a. spredning og interaktion af elektromagnetiske bølger med komplekse materialestrukturer fra radio og op til optiske frekvenser. Han er modtager af DTUs Årets Underviserpris i 2018.



Olav Breinbjerg er professor for faggruppen Elektromagnetiske Systemer ved DTU Elektro, og leder af DTU-ESA Spherical Near-Field Antenna Test Facility. Hans forskning inden for anvendt elektromagnetisk feltteori vedrører bl.a. satellitantenne-teknologi i samarbejde med European Space Agency.