

# Elektrobiologisk Selskab

- [www.elektrobiologi.dk](http://www.elektrobiologi.dk) -

---

Kort introduktion til RF-fysik

Kim Horsevad

2017

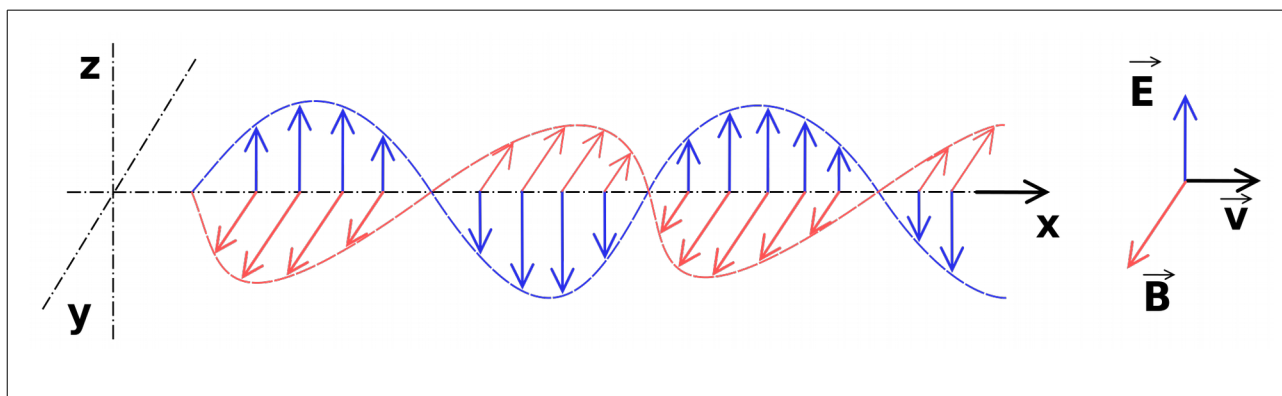
## Grundlæggende RF-fysik:

Idet frekvensen for en elektromagnetisk bølge udtrykker, hvor mange bølger der passerer pr sekund, er både bølgelængde, frekvens og hastighed for den elektromagnetiske bølge således relateret. Samtidigt bestemmer frekvens (og dermed bølgelængde), hvor højt energiniveau den enkelte foton har:

$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad ; \quad \nu = \frac{E}{h} \quad ; \quad E = h \cdot \nu$	<p><u>Konstanter:</u></p> <p>c er lysets hastighed i vakum:  <math>c = 299,792,458 \text{ m/s}</math></p> <p>h er Planck's konstant:  <math>h = 6.62606896(33) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}</math>  <math>h = 4.13566733(10) \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}</math></p>
---	---

Figur 3: Fundamentale beregninger for elektromagnetisk stråling. Frekvensen angives med  $\nu$ , bølgelængden angives med  $\lambda$  og energien angives med  $E$ . Såfremt energien ønskes i eV angives Plancks konstant tilsvarende i eV · s, ønskes energien i stedet i Joule angives Plancks konstant i J · s. Konstanter gengivet fra CODATA / Mohr et al, 2010

Elektromagnetiske bølger består - som navnet antyder - af både elektriske og magnetiske komponenter. De elektriske og magnetiske komponenter står vinkelret på hinanden - og begge står igen vinkelret på udbredelsesretningen. Grafisk kan det vises således:



Figur 4: Tredimensionel struktur for en elektromagnetisk bølge i Far-field regionen. X, Y, Z refererer til et traditionelt tre-dimensionelt koordinatsystem.  $\vec{E}$  betegner den elektriske feltvektor og  $\vec{B}$  betegner den magnetiske feltvektor. Udbredelsesretningen sker langs x-aksen, betegnet med  $\vec{\nu}$ , symbolet for frekvens. Illustration: Wikipedia / Emmanuel Boutet - GFDL

Et elektromagnetisk felt kan således anses som produktet af to vektorer, nemlig den magnetiske feltvektor og den elektriske feltvektor, hvis interaktioner kan udregnes efter Maxwells ligninger. Det samlede elektromagnetiske felt benævnes ofte Poynting-vektoren efter ophavsmanden til udregningsmetoden, John Henry Poynting.

<p><u>Poynting-vektor:</u></p> $\mathbf{S} = \vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{H}}$	<p><u>Hvor:</u></p> <p>S er Poynting-vektoren for det elektromagnetiske felt - målt i W/m<sup>2</sup></p> <p>E er den elektriske feltvektor</p> <p>H er den magnetiske feltvektor</p>
--	---

Figur 5: Udregning af det elektriske felt ved Poynting-vektoren. Vektoren udtrykker egentlig raten af energioverførsel pr arealenhed. Enheden er derfor watt pr kvadratmeter.

Effektæthed giver altså et mål for, hvor megen energi det elektromagnetiske felt er i stand til at overføre pr arealenhed. Det engelske begreb er "Power Flux Density". Der måles altid i watt pr kvadratmeter som grundenhed.

Den viste kobling mellem det elektriske og det magnetiske felt gælder imidlertid kun i en vis afstand fra antennen - det såkaldte far-field. I far-field regenererer de to felter kontinuerligt hinanden og kan således anses for sammenkoblede til een elektromagnetisk bølge. I near-field, altså området tæt på antennen, gælder samme kobling ikke mellem det elektriske og det magnetiske felt. Her kan et af felterne dominere det andet, og samtidigt kan der opstå kapacitive koblinger mellem senderen og et modtagende objekt i near field.

I near-field er det elektriske og det magnetiske felt ikke koblet i samme grad som i far-field. Herudover kan der opstå interessante tilbagekoblingssituationer, idet en absorption af energi i near-field direkte påvirker belastningen på senderen. Ved modtagelse af radiosignaler i far-field påvirkes belastningerne på senderen derimod ikke ved modtagelse af signalet.

Near-field deles i øvrigt ofte op i det reaktive felt og det radiative felt, hvor det reaktive felt er tættest på antennen. Ofte gives denne formel for det reaktive felts udstrækning:

$R < 0,62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$	
---	--

Figur 6: Det reaktive felts udstrækning. R betegner afstanden til antennen, D betegner den største lineære diameter på antennen.  $\lambda$  angiver bølgelængde. Formelgrundlag: Bevelacqua, 2014

I det reaktive felt findes en forskydning i bølgefaserne på 90° mellem det elektriske og magnetiske felt. Samtidigt kan felterne i nogen grad eksistere uafhængigt af hinanden, og/eller den ene felttype kan dominere den anden.

Efter det reaktive felt kommer det radiative felt, som beregnes således:

$$0,62 \cdot \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < R < \frac{2D^2}{\lambda}$$

Figur 7: Det radiative felts udstrækning.  $R$  betegner afstanden til antennen,  $D$  betegner den største lineære diameter på antennen.  $\lambda$  angiver bølgelængde. Formelgrundlag: Bevelacqua, 2014

Afhængigt af den konkrete bølgelængde kan de radiative felt helt udelades i forhold til konkrete målinger. I det radiative felt overgår de to elektromagnetiske felter langsomt til den kobling, der findes i far-field.

I praksis siges far-field-regionen ofte at begynde mellem 2 og 10 bølgelængder fra antennen, men den kan udregnes med lidt større nøjagtighed. Den gældende antagelse er, at alle tre kriterier skal være opfyldte, for at man kan betegne regionen som far-field:

$$1: R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad ; \quad 2: R \gg D \quad ; \quad 3: R \gg \lambda$$

Figur 8: Udregning af far-field.  $R$  betegner afstanden til antennen,  $D$  betegner den største lineære diameter på antennen.  $\lambda$  angiver bølgelængde. Formelgrundlag: Bevelacqua, 2014

Det bør bemærkes, at der ikke er nogen distinkt overgang mellem de forskellige regioner - derfor kan man i forskellige sammenhænge benytte forskellige definitioner på de forskellige regioner.

I far-field gælder følgende sammenhæng (ofte benævnt Friis-formlen) mellem modtagen og afsendt effekt:

$P_r = \frac{P_t \cdot G_r \cdot G_t \cdot \lambda^2}{16 \cdot \pi^2 \cdot r^2}$	<p><u>Hvor:</u></p> <p><math>P_r</math> betegner modtaget effekt, målt i W</p> <p><math>P_t</math> betegner afsendt effekt, målt i W</p> <p><math>G_r</math> betegner gain (lineært ratio) for modtagende antenne</p> <p><math>G_t</math> betegner gain (lineært ratio) for sendende antenne</p> <p><math>r</math> betegner afstand fra sender til modtager, målt i meter</p>
--	---

Figur 9: Friis Transmission Formel: Beregningsmæssig sammenhæng mellem modtagen og afsendt effekt. Bemærk at denne beregning kun er gældende i far-field, og kun er valid for ideelle situationer med line-of-sight mellem modtager og afsender i et frit rum. Formelgrundlag: Frenzel, 2012

I far-field er det elektriske felt og det magnetiske felt relateret til hinanden via impedansen i vakuum:

$P_d = \frac{E^2}{Z_0} = \frac{Z_0}{H^2}$	<p><u>Hvor:</u>  <math>P_d</math> betegner effekttætheden, målt i W/m<sup>2</sup>  <math>E</math> betegner den elektriske feltintensitet, målt i V/m.  <math>H</math> betegner det magnetiske felt, målt i A/m.  <math>Z_0</math>: Impedans i vakuum = <math>120\pi = 377\Omega</math></p>
---	--

Figur 10: Relation mellem det elektriske og magnetiske felt: Formlen angiver sammenhængen mellem feltintensitet for det elektriske og magnetiske felt og effekttætheden. Beregningen er kun valid i far-field. Formelgrundlag: Balanis, 1997.

Fra et teknisk synspunkt vil det ofte ved måling af peak-niveauer være hensigtsmæssigt at måle intensiteten af elektriske felt (i V/m), idet denne måleenhed (i modsætning til effekttæthedsmåling i W/m<sup>2</sup>) angiver en øjebliksmåling. Man skal imidlertid være opmærksom på, at måleværdier opgivet i V/m ikke i samme grad som effekttæthedsmålinger kan oversættes direkte til eksponering, idet eksempelvis 250 gange forøgelse af eksponering fra 0,01 mW/m<sup>2</sup> til 2,5mW/m<sup>2</sup> kun giver en eksponeringsforøgning på 16 gange, hvis værdierne omregnes til V/m (fra 61mV/m til 955mV/m).

I forhold til biologisk påvirkningspotentialer og eksponeringsopmåling er bevidsthed om forskellene mellem near-field og far-field ganske væsentlig, derved at stort set al eksponering fra mobiltelefoner og lignende bærbare mikrobølgesendere sker i near-field.