Inleiding

Er zijn legio voorbeelden waarin trillingen en golven voorkomen. Als inleiding zullen we er hier een niet onaardige kort aanstippen. Aanschouw de volgende wonderbaarlijke vergelijkingen ...

$$
\begin{aligned}
\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\
\vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\
\vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\
c^2 \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \frac{\vec{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}
\end{aligned}
$$

Je zal misschien zeggen dat ze je niets zeggen. Toch ken je alle vier de vergelijkingen op één term na. Je bent waarschijnlijk gewoon niet vertrouwd met de symbolen en de compacte manier waarop ze zijn weergegeven.[1] De letters E en B zouden wel een *lichtje* moeten doen branden; het gaat over elektrische en magnetische velden. De vergelijkingen vormen de fundamentele wetten van het elektromagnetisme en worden de wetten van Maxwell[2] genoemd.

Dit is niet omdat hij ze heeft uitgevonden maar omdat hij – naast die ene term die je niet kent er aan toegevoegd te hebben – de verschillende bestaande wetten heeft samengevoegd. Zo eenvoudige, compacte vergelijkingen met symbolen die een lust zijn voor het oog, in een wiskundige taal die onze snaar van zuivere logica en abstractie doet trillen, omvatten en beschrijven een onwaarschijnlijke uitgebreide waaier van verschijnselen. Dat is fysica ten top!

In de vergelijkingen staat ook een c... Juist ja, de c van de lichtsnelheid. Op het eind van de 19de eeuw was er bij het opstellen van de vergelijkingen nog geen c aanwezig. In de plaats van c^2 stond er $\dfrac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$ oftewel[3]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}. \tag{1}$$

Author(s): Bart Lambregs

[1] Het symbool $\vec{\nabla}$ staat voor $\vec{\nabla} = \dfrac{\partial}{\partial x}\vec{e}_x + \dfrac{\partial}{\partial y}\vec{e}_y + \dfrac{\partial}{\partial z}\vec{e}_z$. Het is een operator. Ze wordt de nabla-operator genoemd. $\times$ staat voor het vectorproduct (de derde rechterhandregel ken je om de richting van de resulterende vector te bepalen) en $\cdot$ staat voor het scalair product.

[2] James Clerk Maxwell (1831 - 1879)

[3] Door c in de vierde vergelijking te vervangen en de laatste term in het rechterlid weg te laten, herken je enigszins de jouw bekende formule $B = \dfrac{\mu_0}{2\pi}\dfrac{I}{d}$. De uitdrukking $2\pi d$ als omtrek van een cirkel zit vervat in $\vec{\nabla} \times \vec{B}$.

Maxwell kende echter de waarde van c en zag de gelijkenis. . . . Bovendien liet hij zien dat een golvend elektrisch en een golvend magnetisch veld dat zich met dezelfde waarde als de lichtsnelheid voortplantte, een oplossing was van de vergelijkingen[4]. Dat wilde zeggen dat hij dus een tot dan toe onverklaarbaar verschijnsel als het licht kon verklaren met een elektromagnetische golf. En dit als *gevolg* van de opgestelde wetten. Om het in zijn eigen woorden te zeggen:

> *This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reasons to conclude that light itself [. . .] is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.*

Het ongelofelijk knappe hiervan is dat die wetten hun oorsprong vinden in verschijnselen die daar op het eerste zicht niets mee te maken hebben: het aantrekken en afstoten van ladingen, magneten en stromen. Deze verschijnselen zijn in de eeuwen daarvoor onderzocht en door verschillende grote fysici in wetmatigheden gegoten om vervolgens, als bijkomende consequenties, ook licht, radiogolven, gsm-straling en alle andere golven binnen het elektromagnetische spectrum te kunnen beschrijven. Dat is binnen de fysica alweer een staaltje van unificatie!

[4] Deze voetnoot bekijk je beter wanneer we het hoofdstuk over golven achter de rug hebben. En zelfs dan is hij niet zomaar te verstaan. . . Maar we lopen hier toch even voor op de feiten. In het luchtledige reduceert de eerste vergelijking tot $\vec{\nabla}\cdot\vec{E} = 0$ en de laatste tot $c^2\vec{\nabla}\times\vec{B} = \frac{\partial\vec{E}}{\partial t}$. Er zijn dan immers geen ladingen en geen stromen. Net iets geavanceerder rekenen met $\vec{\nabla}$ levert, als we slechts één dimensie beschouwen, de vergelijking $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = c^2\frac{\partial^2 E}{\partial x^2}$ op. Dit is een golfvergelijking met $E = E_0 \sin(kx - \omega t)$ als mogelijke oplossing als $c = \lambda f$. Dit kan je nagaan door in te vullen. De oplossing is dus een golf die zich met de lichtsnelheid voortbeweegt!