



# Introductie Velden

Dr. J. Kalkman

Hoofd van het KaLKMaNaLb (TU Delft)

**In deze inleiding wil ik je meenemen in de fascinerende ontwikkeling van het begrip 'velden' in de natuurkunde. Velden komen in vele gebieden van natuurkunde voor, maar dat was niet altijd al zo. Het bestaan van velden, die je niet kan zien of voelen, was lange tijd niet vanzelfsprekend. In de mechanica wordt onderzocht hoe krachten de beweging van objecten beïnvloeden. Lang geleden werd vooral gekeken naar krachten die worden uitgeoefend via contact tussen de objecten zoals wrijvingskracht of duwkracht. Het was toen onvoorstelbaar dat er ook contactloos krachten worden uitgeoefend. Ondertussen werden er na verloop van tijd verschillende fenomenen ontdekt waarbij krachten contactloos en op een afstand werkten. Zo was er bijvoorbeeld statische elektriciteit, gemaakt door wol langs barnsteen te halen, die je de haren kon laten rijzen. Daarnaast waren er natuurlijke magnetische materialen die objecten konden aantrekken of afstoten. Ook was er het effect van eb en vloed, dat duidelijk door een op-afstand-werkende kracht werd veroorzaakt.**

Met de formulering van Newtons zwaartekrachttheorie, die beschreef hoe massa's elkaar over afstand aantrekken, was het concept van een veld voor het eerst nodig. Newtons theorie beschrijft de kracht  $F$  tussen twee massa's. Deze kracht is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de onderlinge afstand. Om deze kracht overal aanwezig te laten zijn werd aangenomen dat de kracht per massa-eenheid door een statisch zwaartekrachtsveld werd gegenereerd:  $g=F/m$ . Dit zwaartekrachtsveld is een vectorveld en heeft op elke plaats een grootte en een richting. Deze kracht kan worden gegenereerd door het nemen van de gradiënt uit een scalair potentiaalveld, d.w.z. een veld met op elke plaats een enkelvoudige waarde.

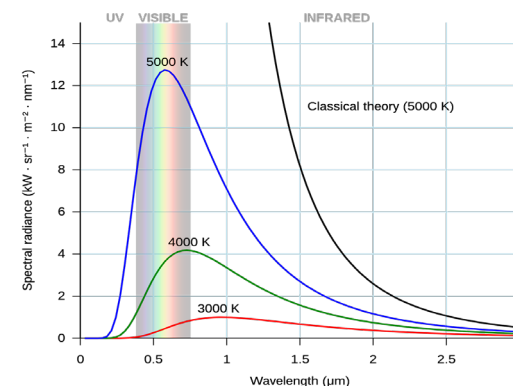
Het was Michael Faraday, een getalenteerd experimentator, die het begrip 'veld' introduceerde voor een

magneet om een kracht op afstand over te brengen. Ook werd er een elektrostatisch veld gedefinieerd om de coulombkracht, de kracht tussen elektrostatische ladingen, over te brengen. Velden waren echter geen opzichzelfstaande begrippen. Zo liet Ørsted zien dat een elektrisch aangedreven stroom door een draad een magnetisch veld kan genereren dat een kompasnaald op afstand kan laten draaien. Tot zover leek het concept veld nog overzichtelijk, constante ladingen geven een elektrisch veld en constante stromen een magnetisch veld. Faraday had echter eerder al laten zien dat wisselende magnetische velden een elektrische stroom kon genereren. Velden, die tot dan toe alleen de oorsprong voor krachten waren, konden dus ook gegenereerd worden door andere velden! Maar het werd nog veel gekker.

## Maxwell

Maxwell analyseerde de vergelijking voor het elektrisch en magnetisch veld en kon afleiden dat er nog een term miste. Hij noemde die de verplaatsingsstroom. Door de toevoeging van deze term kon er een vergelijking voor het elektrisch en magnetisch veld worden afgeleid die er precies hetzelfde uitziet als de vergelijking die de voortplanting van mechanische golven beschrijft, bijvoorbeeld in een koord. Zijn conclusie was dus dat tijdvariërende elektromagnetische velden golven konden zijn. Toen hij de golfsnelheid berekende bleek dat die elektromagnetische golven zich met de lichtsnelheid voortplanten; licht is dus een elektromagnetische golf. Het belang van deze ontdekking is nauwelijks te overschatten, gezien de invloed van telecommunicatie en beeldvorming in ons dagelijks leven. Uit de golfvergelijking blijkt dat de koppeling tussen elektrische en magnetische velden er niet alleen is als er ladingen en stromen aanwezig zijn. Nee, deze koppeling is er ook zonder de aanwezigheid van ladingen en stromen. De velden kunnen tot in eeuwigheid blijven oscilleren. Velden zijn dus niet alleen maar mathematische constructies om de geobserveerde fenomenen te beschrijven. Het zijn opzichzelfstaande fysische entiteiten.

De klassieke velden, zoals hiervoor beschreven, kunnen een aantal fysische fenomenen niet goed beschrijven. Zo leiden klassieke velden tot de ultravioletcatastrofe bij zwarte stralers. Met klassieke velden stralen die zwarte stralers oneindig veel energie uit bij korte golflengtes, iets wat fysisch niet mogelijk is. Tevens zijn atomen niet stabiel onder het continue uitstralen van elektromagnetische golven bij de cirkelbaanbeweging van het elektron. De oplossing van deze problemen was om de velden te kwantificeren en de veld energie te beschrijven als een quantumharmonische oscillator met een discreet aantal toestanden. Alhoewel Planck de eerste was die de kwantificering van velden beschreef, was het Dirac die er de spontane emissie van atomen mee kon beschrijven. De spontane emissie vindt hierbij plaats door stimulatie van het atoom door de nulpuntsenergie van het veld (de harmonische oscillator heeft  $\hbar\omega/2$  als laagste energieniveau). Dit gaf aan dat zelfs een leeg veld een nulpuntsenergie had en nog oscilleerde. Sterker nog, quantumvelden laten ook het onderscheid los tussen deeltjes en velden. Zo kunnen deeltjes, net als golven, interfereren en kunnen golven, net als deeltjes, deeltje voor deeltje worden gedetecteerd.



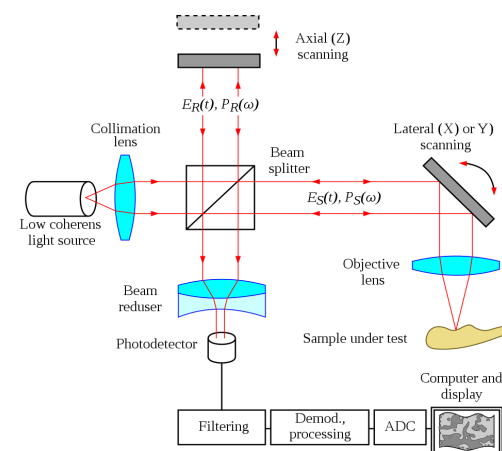
*Licht dat een zwart lichaam uitstraalt volgens de klassieke en quantum theorie*

## Velden in de beeldvorming

In beeldvormingsonderzoek zijn veld eigenschappen belangrijk als overbrengers van de informatie van een object naar de detector. Zo bepaalt de hoek waarbinnen golven worden gevangen door een microscoopobjectief, de numerieke apertuur, het kleinste detail dat afgebeeld kan worden. Ook kan er voor het beeldvormen gebruik worden gemaakt van alle informatie van het elektromagnetische veld: am-

plitude, fase, golflengte en polarisatie. Zo kan een fasecontrastmicroscop een duidelijker beeld maken dan een op amplitude gebaseerde microscoop. In optische coherentietomografie wordt een diepteplaatje gemaakt door het interferentiespectrum Fourier te transformeren. Polarisation wordt gebruikt om dubbelbrekende stoffen met hoog contrast af te beelden. Voor het kwantificeren van de ruis in het gemeten veld stappen we over op de quantummechanische veldbeschrijving en zetten we de intensiteit van het veld om in een discreet aantal fotonen. De wortel van het aantal gedetecteerde fotonen is de hagelruislimiet van de meetmethode.

In beeldvormingsonderzoek kunnen we steeds beter de elektromagnetische velden generen, manipuleren en detecteren. Zo zijn er geavanceerde lichtbronnen die ons bijna elke gewenste golflengte en spectrum kunnen geven. We kunnen de amplitude en fase manipuleren met digitale modulators, we kunnen de polarisation draaien met elektro-optische modulators. Detectoren zijn gevoelig, snel en hebben enorm veel pixels. Ook zijn de rekenkundige hulpmiddelen steeds krachtiger zodat we beelden kunnen reconstrueren uit grote datasets van ruwe beelden. We kunnen met de computer corrigeren voor allerlei afwijkingen van het ideale beeldsysteem. Zo kunnen we bijvoorbeeld de afwijking van het golffront corrigeren of de scherptediepte vergroten. Ondanks dat elektromagnetische velden al eeuwen geleden ontdekt zijn, vormen de detectie, manipulatie en beeldvorming van deze velden nog steeds een zeer uitdagend onderzoeksveld waarmee het onzichtbare zichtbaar gemaakt kan worden.



*Een optische coherentietomografie opstelling*