

Joris Dirckx

Fysica voor farmaceutisch onderzoek en technologie

**acco
learn**

Inhoud

Fysica voor farmaceutisch onderzoek en technologie	15
1. Magnetische velden en bewegende ladingen	19
1.1 Historische inleiding	20
1.2 De magnetische inductie en de lorentzkracht	22
1.3 Baan van geladen deeltje in een magnetisch veld	23
1.4 Magnetische kracht op een stroom	24
1.5 Bewegings-emk, Halleffect	26
1.6 Koppel en moment op een kringloop	28
1.7 Instrumenten	31
1.7.1 <i>Het cyclotron</i>	31
1.7.2 <i>De massaspectrometer</i>	33
1.7.3 <i>Debietmeter van geleidende vloeistoffen</i>	35
1.7.4 <i>Elektromagnetische pomp</i>	35
1.7.5 <i>De luidspreker</i>	36
1.7.6 <i>De draaispoelgalvanometer</i>	37
2. Ontstaan van magnetische velden	39
2.1 Wet van Biot	40
2.2 Kracht tussen twee doorstroomde geleiders	43
2.3 Magnetisch veld van een circulaire winding	45
2.4 Wet van Ampère	47
2.5 Toepassingen van de wet van Ampère	48
2.5.1 <i>Veld van een toroïde</i>	48
2.5.2 <i>Veld van een solenoïde</i>	49
2.6 Magnetisme in materialen	51

2.6.1	<i>Het Bohrmagneton</i>	51
2.6.2	<i>Ferromagnetisme</i>	52
2.6.3	<i>Paramagnetisme</i>	54
2.6.4	<i>Diamagnetisme</i>	55
3.	Wet van Faraday en elektromagnetisme	57
3.1	Magnetische flux en de wet van Gauss voor magnetische inductievelden	58
3.2	Wet van Faraday en Lenz	59
3.3	Illustratieve voorbeelden bij de wetten van Faraday en Lenz	61
3.4	Spanning als gevolg van beweging van een geleider in een magnetisch veld	64
3.5	Zelfinductie	67
3.6	Elektromagnetisme en de vier wetten van Maxwell	69
4.	Wisselstroomketens en impedantie	75
4.1	Wisselstroom	76
4.2	Ter herinnering: enkele basiseigenschappen van de sinusgolf	77
4.3	Netspanning	78
4.4	Het begrip impedantie	79
4.5	Snelcursus complexe getallen	80
4.6	Definitie van impedantie	85
4.7	Impedantie van een capaciteit	86
4.8	Impedantie van een self	87
4.9	Impedantie van een ohmse weerstand	88
4.10	Interpretatie van een impedantiewaarde	88
4.11	Ter illustratie: een rekenoefening	90
4.12	Voorbeeld van AC-circuit analyse: de serie RC-keten	91
4.13	Neuronen en coaxkabels als laagdoorlaatfilter	92
4.14	Serie RLC-keten en elektrische resonantie	94
4.15	Toepassing van resonantie	95
4.16	Vermogen in een wisselstroomkring	96
4.17	Mechanische en akoestische systemen	96
4.18	Transformatoren	99

5.	Golven	105
5.1	Golven in elastische media	107
5.2	Mathematische formule voor een golf	110
5.3	Snelheid van mechanische golven	113
5.4	Energietransport – Intensiteit	113
5.5	Interferentie	115
	5.5.1 <i>Golven met gelijke amplituden en gelijke frequenties</i>	115
	5.5.2 <i>Golven met verschillende amplitudes en gelijke frequenties</i>	115
5.5.3	Niet-coherente golven	118
5.6	Staande golven	118
6.	Akoestiek	123
6.1	Geluid	124
6.2	Het begrip akoestische impedantie	124
6.3	Intensiteit van geluid	126
6.4	Reflectie van geluid	127
6.5	Zwevingen	129
6.6	Dopplereffect	130
6.7	Enkele toepassingen	131
6.8	Fysische en fysiologische aspecten van geluid	132
6.9	Het middenoor als impedantieomvormer	134
6.10	Spraak	136
7.	Fysische optica	139
7.1	Historische inleiding	140
7.2	Voorwaarden voor interferentie	142
7.3	Principe van Huygens	143
7.4	Proef van Young	145
7.5	Interferometer van Michelson	147
7.6	Interferentie in dunne lagen	150
7.7	Buiging	154
7.8	Buiging aan een spleet	156

7.9	Intensiteitsverdeling bij diffractie aan een spleet	159
7.10	Buiging aan een dubbele spleet	163
7.11	Buigingsroosters	165
7.12	Fourieroptica	166
7.13	Fraunhoferdiffractie door een cirkelvormige opening	168
8.	Polarisatieverschijnselen	171
8.1	Polarisatie	172
8.2	Polarisatie door terugkaatsing en breking	175
8.3	Dubbele breking	177
8.4	Polarisatie door dubbele breking	180
8.5	Verstrooiing van licht	181
8.6	Circulair en elliptisch gepolariseerd licht	183
8.7	Geïnduceerde dubbele breking	185
	8.7.1 <i>Foto-elasticiteit</i>	185
	8.7.2 <i>Kerr- en Pockeleffect</i>	186
	8.7.3 <i>Dubbelbreking door stroming</i>	186
8.8	Optische activiteit	186
9.	De laser	189
9.1	Ontstaan van licht	190
9.2	Monochromatisch en coherent licht	191
9.3	Gestimuleerde emissie en metastabiele niveaus	192
9.4	Inversie	193
9.5	Benaming	195
9.6	Basiselementen die nodig zijn voor een werkende laser	195
	9.6.1 Lasermedium	195
	9.6.2 Een lang, smal medium voor ruimtelijke coherentie	196
	9.6.3 Spiegels	197
	9.6.4 Brewstervensters	197
	9.6.5 Pompsysteem	198
9.7	Soorten lasers	198
	9.7.1 Gaslaser	198

9.7.2	Vloeistoflaser	199
9.7.3	Vastestoflaser	199
9.8	Enkele toepassingen	200
9.8.1	Interferometrie	200
9.8.2	Holografie	200
9.8.3	Laserspectroscopie	201
9.8.4	Communicatie	201
9.8.5	Laserscanningmicroscopie	201
9.8.6	Optische pincetten en naalden	202
9.8.7	Branden en snijden in chirurgie en industrie	202
9.9	Laserveiligheid	202
10.	Microscopen	207
10.1	Vooraf: beeldvorming en diffractie	208
10.2	Doel van een microscoop	210
10.3	Vergroting en diffractie	213
10.4	Theorie van Abbe	214
10.5	Condensorens, schuine verlichting en condensordiafragma	217
10.6	Velddiafragma	221
10.7	Afregeling van de microscoop volgens de methode van Köhler	221
10.7.1	<i>Voorafgaande afregelingen</i>	222
10.7.2	<i>Afregeling bij iedere wissel van objectief</i>	223
10.7.3	<i>Regels voor Köhlerverlichting</i>	225
10.8	Immersie	225
10.9	Oplossend vermogen en grootste nuttige vergroting van de optische microscoop	227
10.10	Bijzondere lichtmicroscopen	228
10.10.1	<i>De donkerveldmicroscoop</i>	228
10.10.2	<i>De fluorescentiemicroscoop</i>	229
10.10.3	<i>De polarisatiemicroscoop</i>	231
10.10.4	<i>De fasecontrastmicroscoop</i>	231
10.11	De verdere evolutie in optische microscopen	235
10.11.1	<i>De transmissie-elektronenmicroscoop</i>	236
10.11.2	<i>De rasterlektronenmicroscoop</i>	238

11. Atoomkernen en radioactiviteit	243
11.1 Samenstelling van de atoomkern	244
11.2 Kernkrachten	245
11.3 Bindingsenergie	246
11.4 Soorten radioactieve stralen	247
11.5 Radioactief verval	248
11.6 De natuurlijke radioactieve elementen	251
11.7 Alfaverval	253
11.8 Bètaverval	253
11.9 Gammaverval	255
11.10 Kernreacties	256
11.11 Kernsplijting	257
11.12 Thermonucleaire reacties	261
11.13 Enkele toepassingen	262
12. Interactie van straling met materie	271
12.1 X- en γ -stralen	273
12.1.1 Foto-elektrisch effect	273
12.1.2 Comptonverstrooiing	274
12.1.3 Paarvorming	274
12.1.4 Attenuatie	275
12.2 Geladen kerndeeltje (α , p , d ,...)	276
12.2.1 Coulombinteractie van kerndeeltjes met materie	276
12.2.2 Dracht van geladen deeltjes	276
12.3 Elektronen	278
12.3.1 Ionisatie door elektronen	278
12.3.2 Remstraling	280
12.4 Neutronen	283
12.4.1 Interactie tussen neutronen en materie	283
12.4.2 Neutronenbronnen	284
12.4.3 Penetratie van neutronen in materie	284
12.5 Stralingsschade	285
12.5.1 Bestraling en besmetting	285
12.5.2 Tabel met biologische halfwaardetijden	287

12.5.3	<i>Bestraling en geïnduceerde radioactiviteit</i>	287
12.5.4	<i>Stralingseenheden</i>	288
12.6	Nucleaire instrumentatie	290
12.6.1	<i>De elektroscop</i>	290
12.6.2	<i>Ionisatiekamer</i>	291
12.6.3	<i>Geiger-Müllerteller</i>	292
12.6.4	<i>Scintillatieteller</i>	293
12.6.5	<i>Halfgeleiderdetector</i>	294
12.6.6	<i>Visualiserende detectoren</i>	294
12.6.7	<i>Neutronentellers</i>	295
13.	Hydrodynamica	297
13.1	Stationaire stroming	297
13.2	Wet van Bernoulli	299
13.3	Toepassingen op de wet van Bernoulli	302
13.3.1	<i>De venturimeter</i>	302
13.3.2	<i>De Pitotbuis</i>	303
13.4	Viscositeit	304
13.5	Wet van Poiseuille	307
13.6	Het getal van Reynolds	311
13.7	Sedimentatiesnelheid	311
13.8	Ultracentrifuge, bepaling van moleculair gewicht	314
13.9	Beweging van eencelligen en bacteriën in water	315
13.10	Elektroforese	316



Fysica voor farmaceutisch onderzoek en technologie



Fysica en farmacie... hebben die iets met elkaar te maken? Als je latexsfeertjes (die je gebruikt in medicijnen) centrifugeert, gaan dan de grote of de kleine eerst naar de bodem? Zijn laserstralen gevaarlijk in een tijdsgeresolveerde spectrometer die je gebruikt om chemische reacties te volgen? Geeft de polarimeter die je gebruikt om suikerconcentraties in een hoestsiroop te bepalen, altijd juiste waarden aan, of zijn er valkuilen? Kan je het effect van een geneesmiddel op levende cellen onderzoeken onder een gewone microscoop, of bestaat daar een speciale soort microscoop voor? Volstaat het een medicijn traag door een dikke suikerstroop te roeren om een goede bereiding te krijgen? Als een patiënt raad vraagt over de gevaren van zijn mp3-speler, hoe leg je dan uit dat 90 decibel weinig kwaad kan terwijl amper 20 decibel meer onherstelbare gehoorschade kan berokkenen? Waarom gaat een medicijn uit een aerosoltoestel zoveel verder in de luchtwegen dan een gewone spray? Wat doet dat knopje *low pass frequency* op de versterker die je gebruikt om zenuwresponsen te meten? Waarom kan je een stukje weefsel niet zomaar bekijken in een elektronenmicroscoop? Word je zelf ziek als je ooit moet werken met radiofarmaca? Waarop moet je letten om jezelf te beschermen tegen die radioactieve straling? Hoe komt het dat de ene radioactieve stof geschikt is voor diagnose, en de andere voor therapie? Wat zeg je tegen de patiënt die raad komt vragen over de naturopathiebehandeling met magnetische monopolen?

Vele technieken in de farmaceutische analyse en in het farmaceutisch onderzoek zijn gebaseerd op basisprincipes uit de fysica: massabepaling van een nieuw gesynthetiseerde molecule met de massaspectrometer, radioactieve straling uit radiofarmaca in de

oncologie, kleurenspectrometrie gebruikmakend van diffractieroosters, concentratiebepalingen gebruikmakend van polarisatie en optische activiteit... Als universitair gevormde wetenschapper moet je de dingen begrijpen waarmee je bezig bent: je voert immers niet zomaar routinewerk uit, je wil vooruitgang maken. In deze cursus leer je een aantal basisbegrippen die je later nodig zal hebben in andere vakken, of bij het gebruikmaken van onderzoekstechnieken die gebaseerd zijn op fysica. Soms is het verband met de farmacie heel direct: polarimetrie gebruik je om de concentratie van een suikersiroop te meten, de biologische halfwaardetijd en het soort straling uit een radioactieve stof maken ze al dan niet geschikt als diagnosemiddel. Soms is de relevantie eerder op het gebied van een generische meettechniek die ook gebruikt wordt in de farmacie: met de massaspectrometer kan je de massa bepalen van een nieuw gesynthetiseerde molecule, en om de resultaten inzichtelijk te kunnen interpreteren, moet je begrijpen hoe het toestel werkt. Nog andere basisbegrippen hebben op zich geen directe relevantie voor de farmacie, maar je hebt ze nodig omdat andere farmaceutisch relevante applicaties erop steunen. Niemand kan je bijvoorbeeld uitleggen waarom een bepaalde polarimeter wel werkt voor sommige stoffen en niet voor andere, als je niet eerst geleerd hebt wat elektromagnetische golven zijn.

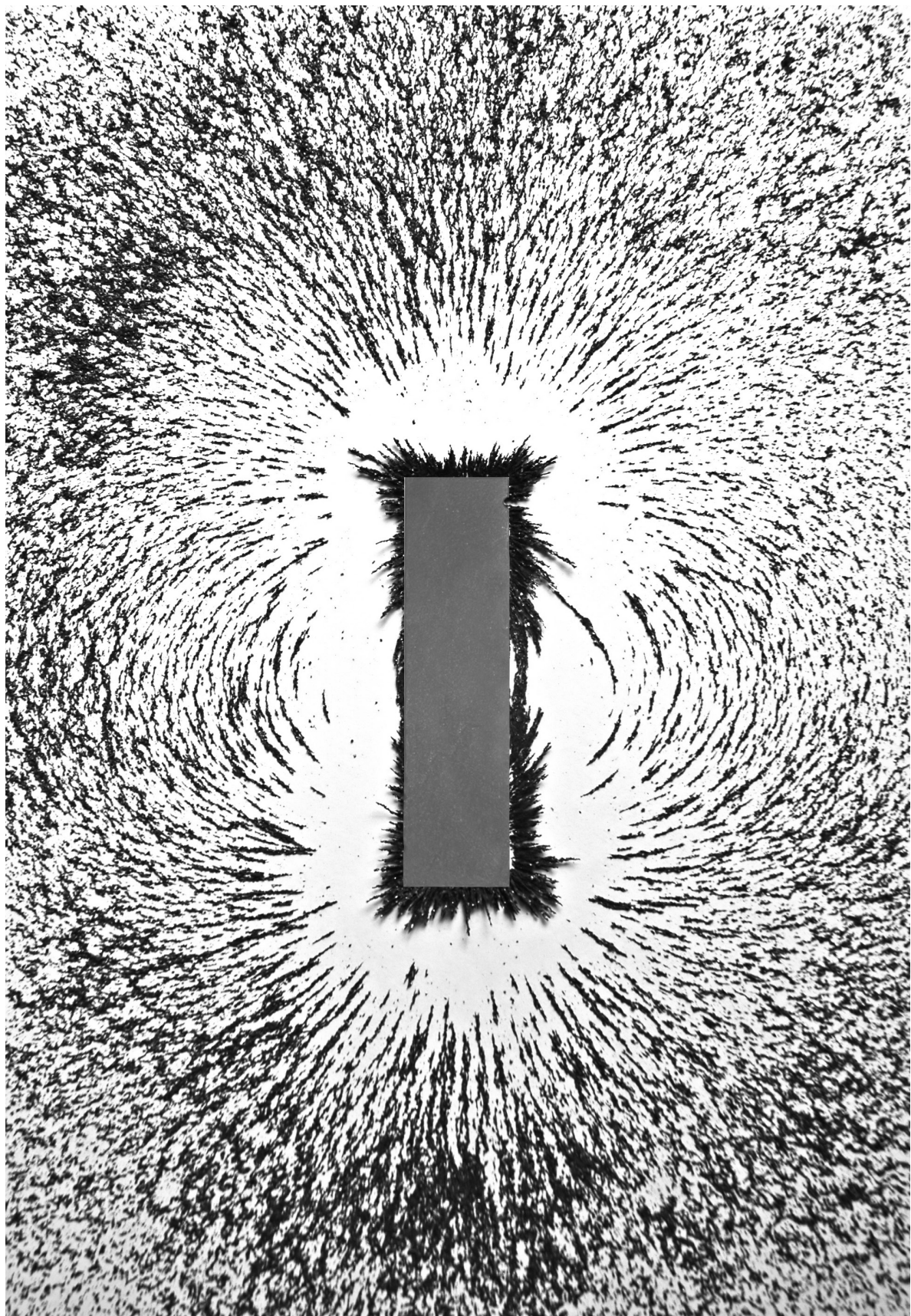
Aan het begin van ieder hoofdstuk in deze cursus staat er een korte introductie, aangeduid met de 'esculaap', waarin uitgelegd wordt waarom het hoofdstuk relevant is voor de farmacie.

Zulke inleiding is geen 'examenleerstof', maar maak er een gewoonte van om dat stukje even door te nemen vóór je aan het hoofdstuk begint: het zal je duidelijker maken waarom formules en begrippen uit de fysica zó belangrijk zullen zijn in je latere loopbaan als farmaceutisch wetenschapper. Denk er bovendien aan dat de toepassingsvoorbeelden slechts anekdotes zijn: technieken en toestellen evolueren snel, de voorbeelden van vandaag zijn morgen misschien voorbijgestreefd, maar de basisprincipes blijven dezelfde en die draag je mee om later ook heel andere technieken met inzicht te kunnen gebruiken.

De cursus begint met drie hoofdstukken over elektromagnetisme. Sommige delen van die hoofdstukken zijn vrij fundamenteel, zonder directe farmaceutische toepassingen op zichzelf. Je hebt ze echter nodig om nadien de werking van een laser of een microscoop te begrijpen. Nadien volgt een hoofdstuk over wisselstroom en impedantie: daarmee krijg je te maken wanneer je bijvoorbeeld metingen doet in de elektrofysiologie. Voor je kan spreken over optica, moet je een basiskennis hebben van golven en interferentie, en daaraan gekoppeld de basisbegrippen van geluid(sgolven). Daarna volgt de fysische optica, met al haar toepassingen in spectroscopie, microscopie, polarimetrie en bij vele

andere analysetoestellen. Aan de laser wordt een hoofdstuk apart besteed, omdat dit toestel het essentiële onderdeel geworden is van vele moderne meetapparaten. Inzicht in polarisatieverschijnselen is nodig om effecten die direct samenhangen met stereochemische structuur van moleculen, zoals optische activiteit, te begrijpen. Ten slotte volgt een overzicht van de belangrijkste types microscopen die onmisbaar zijn om het effect van geneesmiddelen op cellen en weefsels te bestuderen. De twee laatste hoofdstukken van de cursus gaan over atoomkernen en radioactiviteit, en hoe die straling interageert met materie. Radioactieve stoffen hebben vele toepassingen, zowel in diagnose als bij therapie. Als apotheker moet je de toepassingen en gevaren van die producten kennen. Daarvoor moet je eerst weten welke soorten radioactieve straling er bestaan, vanwaar de straling komt. Daarna kan je begrijpen wanneer die straling wel of niet gevaarlijk is voor levende cellen.

Aan het eind van de cursus volgt een stukje hydrodynamica dat belangrijk is voor farmaceutische bereidingen, met al haar toepassingen in stromingsgedrag van bloed en stropen, sedimentatie, centrifuges, DNA-sequencing enzovoort.



1. Magnetische velden en bewegende ladingen



Tussen je grootmoeders spullen vind je misschien een 'magnetische armband': een voorwerp dat jaren geleden verkocht werd als behandeling van reuma. Zou jij die in vertrouwen aanbieden in de apotheek? Zou zo'n armband inderdaad een effect kunnen hebben, of is het zuivere kwakzalverij? Moeilijk te zeggen zolang je niet weet wat magnetisme precies is.

Magnetisme fascineert de mensen al duizenden jaren, maar pas tegen het eind van de negentiende eeuw begon men goed te begrijpen wat magnetisme is. In dit hoofdstuk leer je het verband tussen magnetisme en elektriciteit. Elektrische ladingen ondervinden geen invloed van magnetisme zolang ze stilstaan. Bewegende ladingen in een magnetisch veld ondervinden wel een kracht, en dat heeft meteen allerlei gevolgen en toepassingen.

In de farmaceutische wetenschap is magnetisme van belang omdat het een invloed heeft op het gedrag van atomen en moleculen, en op die manier erg belangrijk is om een aantal verschijnselen in de chemie te begrijpen. De magnetische kracht heeft directe toepassingen in enkele toestellen: het cyclotron (waarmee je deeltjes versnelt om er tumoren mee te behandelen), de massaspectrometer (waarmee je isotopen kan scheiden en de massa kan bepalen van moleculen), meettoestellen zoals de Hallsensor (dat toestel wordt o.a. gebruikt om in de kliniek de sterkte van een MRI-scanner magneet te meten) enzovoort. Je moet eerst begrijpen wat magnetisme en magnetische velden zijn om later te kunnen begrijpen wat elektromagnetische golven zijn.

1.1 | Historische inleiding

Voor de ontdekking van het magnetisme moet je terugkeren tot Thales van Milete, de vader van de Griekse wetenschappers. Aristoteles schreef dat Thales geloofde dat sommige stenen een ziel hadden waarmee ze een aantrekkingskracht konden uitoefenen. Ze werden Herculesstenen genoemd wegens de grote kracht die ze bijvoorbeeld op ijzer konden uitoefenen. De latere namen, magneet en magneetsteen, ontstonden uit de naam van de stad Magnesia in Klein-Azië waar het mineraal magnetiet werd gedolven. Ook de Chinezen kenden de eigenschappen van magnetische mineralen die ze 'liefhebbende stenen' noemden "omdat ze ijzer aantrekken zoals een moeder haar kind tot zich trekt". Die kennis gaat terug tot ongeveer de tweede eeuw voor Christus. De richtingaanwijzende eigenschappen werden al vroeg gebruikt in de geomantiek (bepalen van de optimale oriëntatie van gebouwen in overeenstemming met sommige bijgelovige praktijken). Het eigenlijke kompas als navigatietoestel op schepen dateert van ergens tussen het jaar 1000 tot 1100, meer dan honderd jaar voor het in Europa werd ingevoerd (\pm 1200). Zeker is dat in 1269 Petrus Pelegrinus (Fransman, \pm 1240) in een brief aan een vriend schrijft over zijn studie van magneten. Hij beschrijft onder andere dat het hem niet lukt een noord- of zuidpool te isoleren door een magneetsteen te breken. Hij vermeldt ook dat het beter is een naald te laten draaien op een pin in plaats van te laten drijven op een kurk op water. Een uitvoerig onderzoek gebeurde door William Gilbert (Engelsman, 1544) in zijn Latijns werk *De Magnete* waarin zowel de inclinatie als de declinatie van de magneetnaald wordt vermeld. Hij bedacht ook als eerste dat de aardbol een grote magneet was en beschreef methoden om staafmagneten te maken.

Tussen het jaar 1600, de publicatiedatum van *De Magnete*, en 1819 is er alleen nog een minieme vooruitgang gerealiseerd op het gebied van het aardmagnetisme.

Het verband tussen magnetisme en elektriciteit werd pas in 1819 ontdekt door Christian Oersted (Deen, 1777) en gepubliceerd in 1820. Voordien werden interacties tussen stromen en magneten wel opgemerkt door de wetenschappelijke wereld, maar als een onverklaarbaar en totaal onbelangrijk feit vergeten.

De ontdekking van het elektromagnetisme, het verband tussen magnetisme en elektriciteit, kwam in 1820 voor de toenmalige wetenschappelijke wereld als een totale verrassing. Had niet Charles Augustijn de Coulomb (Fransman, 1736), als een van de eminentste geleerden van het einde van de achttiende eeuw, verkondigd dat er geen verband kon bestaan tussen die twee totaal verschillende natuurverschijnselen? De publicatie op 21 juli 1820 waarin Oersted stelde dat een elektrische stroom een kompasnaald doet afwijken, was dan ook een donderslag bij heldere hemel. Er volgden enkele stormachtige maanden in de Académie des Sciences te Parijs. Dominique Arago (1786) demonstreerde er op 4 september 1820 het

experiment van Oersted. In de maanden die volgden, onderzochten Jean Baptiste Biot (1774) en Felix Savart (1791) intensief het nieuwe natuurverschijnsel, maar vooral André Marie Ampère (1775) startte onmiddellijk een grondige experimentele studie van dat nieuwe verschijnsel. Hij deelde zijn eerste resultaten al mee op 9 oktober 1820 en vervolgens op 30 oktober, 6 november, 4, 11 en 26 december. Ampère beschreef de krachten tussen draden waar stroom door liep en het ontstaan van magneetvelden rond elektrische stromen. Dat was een essentiële bijdrage tot de nieuwe discipline die later de naam **elektromagnetisme** zou krijgen.

In 1831 zette Michael Faraday (Engelsman 1791) de volgende grote stap. De inductiewet van Faraday, in een modernere versie geformuleerd, zegt dat een veranderlijke magnetische flux in een keten een elektromotorische kracht (spanning) induceert. Faraday introduceerde het begrip 'tijd' als onafhankelijke veranderlijke in de reeks van elektromagnetische wetten.

Gelijktijdig en onafhankelijk ontdekte ook de Amerikaanse natuurkundige Joseph Henry (1791) die inductiewet: hij publiceerde ze echter pas later. De voornaamste puzzelstukken zijn nu al aanwezig. Karl Friedrich Gauss (1777), William Weber (1804), Heinrich Lenz (1804-1865), Hermann Helmholtz (1821) en anderen zullen nog experimentele en theoretische bijdragen leveren. Het elektromagnetische zal het aanschijn van de negentiende en zeker dat van de twintigste eeuw grondig wijzigen. Denk maar aan de elektriciteitsvoorziening en al het comfort dat die met zich meebrengt.

De Schotse professor James Maxwell (1831) zette in 1863 de kroon op het werk. Zijn vier mathematische wetten van het elektromagnetisme vormden de aanloop tot de natuurkunde van de twintigste eeuw. Die vier formules beschrijven niet alleen elektromagnetisme en elektriciteit, ze voorspellen onder ander ook de radiogolven (H. Hertz, 1888), zetten de eerste stap naar de eenmaking van alle natuurkrachten, leggen de brug tussen optica en elektromagnetisme en zijn ten slotte de eerste formules die al in zich de relativiteitstheorie van Albert Einstein bevatten. Terecht noemt men de theoretische natuurkundige Maxwell in één adem samen met Newton en Einstein.

Dit hoofdstuk volgt om didactische redenen niet de historische gang van zaken. Het start met het einde van de negentiende eeuw en de invoering van het begrip 'magnetisch veld', via de lorentzkracht. Hendrik Antoon Lorentz (Arnhem 1853) was professor theoretische fysica aan de universiteit van Leiden. Hij kreeg, samen met P. Zeeman, in 1902 de Nobelprijs voor het Zeemaneffect, een effect te wijten aan de lorentzkracht.

1.2 | De magnetische inductie en de lorentzkracht

Een vectorveld kan je definiëren via de kracht die dat veld uitoefent op een geschikt testobject. Het gravitatieveld \vec{g} kan je bijvoorbeeld meten of definiëren via de kracht uitgeoefend door dat veld op een massa. Het verband tussen het vectorveld \vec{g} en de kracht \vec{F}_m is $\vec{F}_m = m\vec{g}$.

Ook bij elektriciteit is er een verband tussen het elektrische veld \vec{E} en de elektrostatistische kracht \vec{F}_q . Het veld \vec{E} oefent een kracht \vec{F}_q uit op een lading q volgens de formule $\vec{F}_q = q\vec{E}$.

Nu blijken ladingen wanneer ze bijvoorbeeld bewegen in de ruimte rond een permanente magneet of in de buurt van een doorstroomde geleider of zelfs gewoon in de buurt van het aardoppervlak, ook een zijdelingse kracht \vec{F} te ondervinden die erop wijst dat in die ruimte ook een veld heerst van magnetische aard (want het treedt op rond permanente magneten). Je kan dat vectorveld karakteriseren met behulp van de grootheid \vec{B} . Die kracht is experimenteel vastgesteld als:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

1.1

waarbij \vec{F} die kracht is die loodrecht staat op de snelheid \vec{v} van de lading q en loodrecht op \vec{B} . \vec{B} is de **magnetische inductie**. De kracht \vec{F} heet de lorentzkracht. Zoals bij de gravitatiekracht en de elektrische kracht de diepere oorzaak nooit verklaard werd en slechts als experimenteel feit is vastgesteld, wordt ook hier de diepere oorzaak van dat ontstaan van \vec{F} niet verklaard.

Omdat \vec{F} gegeven wordt via een vectorieel product (zin volgens kurkentrekker- of rechterhandregel), bezit die kracht enkele merkwaardige eigenschappen:

- \vec{F} is onbestaand als \vec{v} en \vec{B} evenwijdig zijn ($\sin(0^\circ) = \sin(180^\circ) = 0$).
- \vec{F} levert nooit arbeid op q want \vec{v} en \vec{F} staan loodrecht op elkaar, dus $\vec{F} \cdot \vec{v} = \vec{F} \cdot d\vec{l} = dW = 0$.
- \vec{F} kan de kinetische energie van een geladen deeltje niet veranderen.

Statische magneetvelden kunnen op ladingen nooit arbeid leveren; je zal later zien dat variabele velden wel stroom kunnen induceren (wet van Faraday). Je kan zoals bij elektrische velden ook hier veldlijnen of **inductielijnen** invoeren waar in ieder punt de

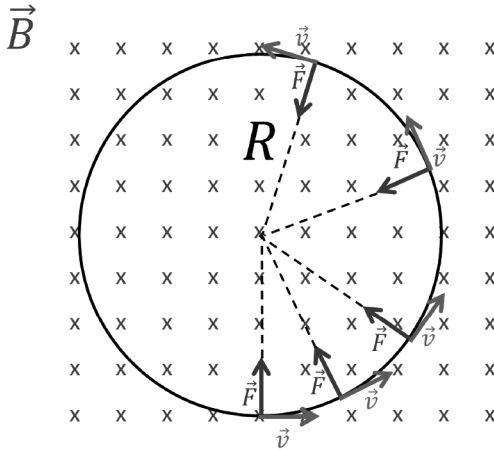
magnetische inductie \vec{B} gericht is volgens de raaklijn aan de inductielijn in dat punt. In het volgende hoofdstuk zal je enkele merkwaardige verschillen tussen elektrische en magnetische velden ontdekken.

In het SI-stelsel is de eenheid van magnetische inductie de **tesla (T)**. Reken na dat $T = \frac{N}{Am}$. Elektrische en magnetische velden kunnen samen op een bewegende lading werken. De uiteindelijke kracht wordt dan gegeven door de vectorsom van de twee krachten:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad 1.2$$

1.3 | Baan van geladen deeltje in een magnetisch veld

Beschouw een deeltje met positieve lading q , dat in een homogeen magnetisch veld met inductie \vec{B} , een snelheid \vec{v} heeft loodrecht op \vec{B} (Figuur 1-1).



Figuur 1-1

Het deeltje ondervindt een kracht \vec{F} , met grootte $F = qvB$, in een richting loodrecht op \vec{v} en op \vec{B} . Die kracht, en dus ook de versnelling die het deeltje ondervindt, is constant in grootte maar met veranderlijke richting want altijd loodrecht op \vec{v} . Het deeltje beweegt langs een cirkelbaan. Aangezien de centripetale versnelling $a = \frac{v^2}{R}$, waarbij R de straal van de **cirkelbaan** is, heb je voor een deeltje met massa m :

$$F = ma = m \frac{v^2}{R} \Leftrightarrow qvB = m \frac{v^2}{R} \Leftrightarrow$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

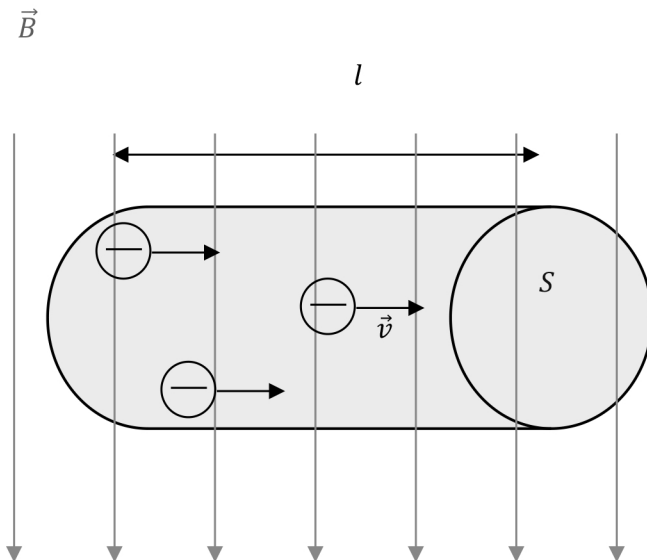
1.3

Merk op dat R evenredig is met de impuls mv van het deeltje.

Als \vec{v} niet loodrecht staat op \vec{B} , zal het deeltje een schroeflijn beschrijven (zie ook demonstratieproef) en moet je in (1.3) de component van \vec{v} loodrecht op \vec{B} nemen.

1.4 | Magnetische kracht op een stroom

Een stroom kan je beschouwen als een verzameling van bewegende ladingen. Omdat een magnetisch veld een kracht uitoefent op bewegende geladen deeltjes zal ook een doorstroomde geleider een kracht ondervinden. Figuur 1-2 toont een draad met doorsnede oppervlakte S waarvan een lengte l zich bevindt in een magnetisch veld \vec{B} loodrecht op de draad.



Figuur 1-2

De totale lading in het deel van de draad dat zich in het magneetveld bevindt is:

$$q = Sln(-e)$$

met Sl het volume van de draad, n het aantal vrije elektronen in dit volume en $-e$ de lading van één elektron. De gemiddelde snelheid van de ladingen is de driftsnelheid $-v_d$ (want negatieve ladingen bewegen tegengesteld aan de conventionele stroomzin). De grootte van lorentzkracht (positief!) wordt dus:

$$F = qvB = Sln(-e)(-v_d)B = Slnv_dB \quad 1.4$$

Het verband tussen stroomsterkte I en driftsnelheid v_d (zie cursus Fysica I) is: $I = Snev_d$.

Invullen in (1.4) geeft

$$F = IlB \quad 1.5$$

In het algemene geval dat \vec{B} niet loodrecht op de draad staat en de draad zelf niet rechtlijnig is, leidt dezelfde redenering toegepast op een elementaire lengte \vec{dl} tot:

$$\vec{dF} = I(\vec{dl} \times \vec{B}) \quad 1.6$$

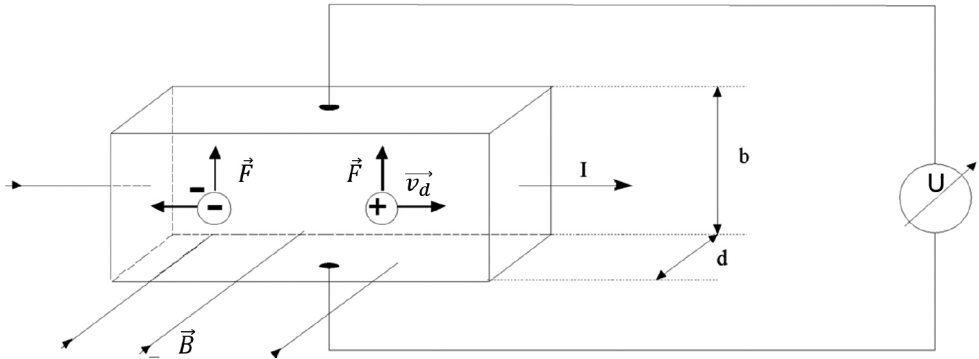
Voor een rechte geleider met lengte l in het magneetveld wordt dat:

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B}) \quad 1.7$$

Let erop dat je aan een elektrische stroom I geen vectoreigenschappen toekent. De positieve zin van de vectoren \vec{dl} en \vec{l} wordt wel bepaald door de zin waarin de stroom loopt.

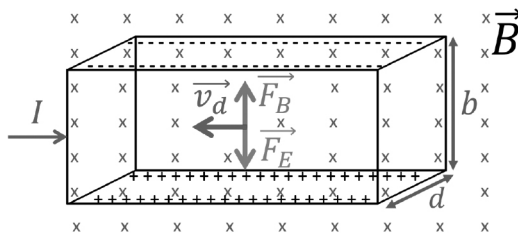
1.5 | Bewegings-emk, Halleffect

Beschouw een blokvormige geleider zoals voorgesteld in Figuur 1-3. De stroom gaat in het voorbeeld van links naar rechts (elektronen bewegen van rechts naar links).



Figuur 1-3

Leg je een veld \vec{B} aan, loodrecht op de richting van stroom I door de geleider (Figuur 1-3), dan ondervinden de ladingsdragers in de geleider (rechterhandregel) een lorentzkracht $\vec{F} = q(\vec{v}_d \times \vec{B})$ naar boven, wat ook de ladingsdragers zijn, negatieve of positieve deeltjes, want q en \vec{v}_d hebben hetzelfde teken. In die blokvormige geleider zal er dus bovenaan een ophoping zijn van negatieve ladingen omdat de ladingsdragers in een metaal elektronen zijn. Het feit dat de bovenzijde negatief geladen wordt, is dus het experimentele *bewijs* dat de ladingsdragers in een metaal wel degelijk elektronen zijn. Door de ophoping van lading ontstaat een elektrostatisch veld \vec{E}_H dat verdere ophoping tegenwerkt. Er ontstaat een evenwicht tussen de elektrostatische kracht $\vec{F}_e = e\vec{E}_H$ en de niet-elektrostatische lorentzkracht \vec{F}_B (zie Figuur 1-4).



Figuur 1-4