



*Deze kam heeft een statische elektrische lading gekregen door bijvoorbeeld het kammen van hoofdhaar of doordat hij met een doek of een papieren handdoek opgewreven werd. De elektrische lading op deze kam veroorzaakt een polarisatie (scheiding van lading) in snippers papier, waardoor ze aangetrokken worden. In onze inleiding over elektriciteit in dit hoofdstuk bespreken we geleiders en isolatoren en de wet van Coulomb, die de krachten tussen twee puntladingen beschrijft als functie van hun onderlinge afstand. Ook introduceren we het belangrijke concept 'elektrisch veld'.*

## Hoofdstuk

# 21

## Elektrische lading en elektrische velden

### Openingsvraag: Wat denk jij?

Twee identieke minuscule bollen hebben dezelfde elektrische lading. Als hun onderlinge afstand wordt verdubbeld, dan zal de kracht die ze op elkaar uitoefenen

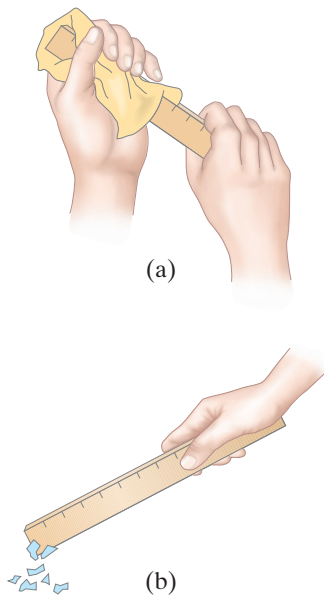
- (a) halveren,
- (b) verdubbelen,
- (c) vier keer groter worden,
- (d) vier keer kleiner worden,
- (e) onveranderd blijven.

Als je denkt aan het woord 'electriciteit', denk je waarschijnlijk direct aan complexe moderne technologie: verlichting, motoren, elektronica en computers. Maar de elektrische kracht speelt in veel meer aspecten van het dagelijks leven een rol. Volgens de atoomtheorie zijn het elektrische krachten die atomen en moleculen bij elkaar houden zodat er vloeistoffen en vaste stoffen kunnen zijn. En ook bij de stofwisselingsprocessen in je eigen lichaam spelen elektrische krachten een rol. Het grootste deel van de krachten waar we het tot nu toe over gehad hebben, zoals elastische krachten, de normaalkracht en wrijving en andere contactkrachten (druk- en trekkrachten), worden nu beschouwd als de gevolgen van elektrische aantrekkingskrachten op atomair niveau. De zwaartekracht daarentegen, is een afzonderlijke kracht.\*

\* Zoals we in paragraaf 6.7 gezien hebben, zijn de natuurkundigen in de twintigste eeuw tot de slotsom gekomen dat er vier verschillende fundamentele krachten in de natuur voorkomen: (1) de zwaartekracht, (2) de elektromagnetische kracht (we zullen later zien dat elektrische en magnetische krachten nauw aan elkaar gerelateerd zijn), (3) de sterke kernkracht en (4) de zwakke kernkracht. De laatste twee krachten werken op het niveau van

### Inhoud

- 21.1 Statische elektriciteit; elektrische lading en het behoud daarvan
- 21.2 Elektrische lading in het atoom
- 21.3 Isolatoren en geleiders
- 21.4 Geïnduceerde lading; de elektroscop
- 21.5 De wet van Coulomb
- 21.6 Het elektrisch veld
- 21.7 Berekeningen van het elektrisch veld voor continue ladingverdelingen
- 21.8 Veldlijnen
- 21.9 Elektrische velden en geleiders
- 21.10 Beweging van een geladen deeltje in een elektrisch veld
- 21.11 Elektrische dipolen
- \*21.12 Elektrische krachten in de moleculaire biologie; DNA-structuur en -repliatie

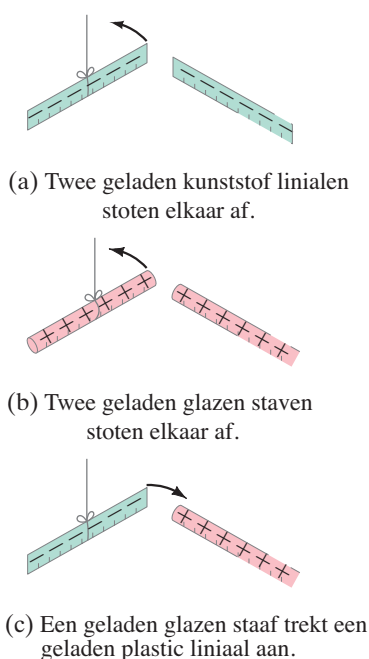


**FIGUUR 21.1** (a) Wrijf een kunststof liniaal op met een stoffen of papieren doek en (b) houd de liniaal vervolgens in de buurt van kleine stukjes papier.

De allereerste onderzoeken op het gebied van elektriciteit werden al in de oudheid uitgevoerd, maar pas het eind van de 18e eeuw werd het onderzoek gedetailleerder. In de volgende elf hoofdstukken zullen we de ontwikkeling van de ideeën over elektriciteit, de bijbehorende praktische apparaten, en de relatie tussen elektriciteit en magnetisme bespreken.

## 21.1 Statische elektriciteit; elektrische lading en het behoud daarvan

Het woord *elektriciteit* stamt af van het Griekse woord *elektron*, dat ‘amber’ betekent. Amber is versteende boomhars en al in de oudheid was het bekend dat een stukje amber, wanneer dat opgewreven werd met een doek, kleine stukjes bladeren en stof aantrekt. Een met een doek opgewreven stuk hard rubber, glazen staaf of plastic liniaal zal ook dit ‘ambereffect’ hebben. We noemen dit effect tegenwoordig **statische elektriciteit**. Je kunt gemakkelijk kleine stukjes papier oppakken met een plastic kam of liniaal die je even daarvoor met een (papieren) handdoekje hebt opgewreven. Het effect is te zien op de foto aan het begin van het hoofdstuk en in fig. 21.1. Waarschijnlijk heb je zelf ook wel eens statische elektriciteit ervaren bij het kammen van je haar of wanneer je een synthetisch kledingstuk uit de wasdroger haalde. Ook de schok die je kunt krijgen als je een metalen deurklink vastpakt nadat je een poosje bewogen hebt op een autostoel of over een kunststof tapijt gelopen hebt, zul je wel eens gevoeld hebben. In elk van deze gevallen wordt een voorwerp ‘geladen’ als gevolg van opwrijven. Het voorwerp krijgt daardoor een **elektrische lading**. Is er maar één soort elektrische lading of zijn er meer? Om precies te zijn, zijn er *twee* soorten elektrische lading, wat we met het volgende eenvoudige experiment aan kunnen tonen. Een plastic liniaal die aan een draad is opgehangen, wordt krachtig opgewreven met een doek en wordt daardoor geladen. Wanneer een tweede plastic liniaal, die op dezelfde manier geladen is, bij de eerste gehouden wordt, blijkt dat de ene liniaal *de andere afstoot*. Dit is weergegeven in fig. 21.2a. Ook wanneer een opgewreven glazen staaf bij een andere geladen glazen staaf gebracht wordt, kun je een afstotende kracht zien, fig. 21.2b. Maar als de geladen glazen staaf in de buurt van de geladen plastic liniaal gebracht wordt, zie je dat ze *elkaar aantrekken*, fig. 21.2c. De lading op het glas moet dus verschillend zijn van die op het plastic. Uit experimenten is gebleken dat alle geladen voorwerpen in één van twee mogelijke categorieën ingedeeld kunnen worden. Ofwel ze worden aangetrokken tot het plastic en afgestoten door het glas; of ze worden afgestoten door het plastic en aangetrokken tot het glas. Er lijken dus maar twee, en niet meer dan twee, soorten elektrische lading te zijn. Elke soort lading stoot dezelfde soort af, maar trekt de tegengestelde soort aan. Dat wil zeggen: **ongelijksoortige ladingen trekken elkaar aan; gelijksoortige ladingen stoten elkaar af**.



**FIGUUR 21.2** Gelijksoortige ladingen stoten elkaar af; ongelijksoortige ladingen trekken elkaar aan. (Let op de kleuren: we kleuren positief geladen voorwerpen roze of rood, en negatieve ladingen blauwgroen. We gebruiken deze kleuren expliciet voor puntladingen, en meestal voor echte voorwerpen.)

De twee soorten elektrische lading werden door de Amerikaanse politicus, filosoof en wetenschapper, Benjamin Franklin (1706-1790) *positief* en *negatief* genoemd. De keuze van de naam voor elke soort lading was willekeurig. Franklin noemde de lading op de opgewreven glazen staaf de positieve lading en de lading op een opgewreven plastic liniaal (of amber) de negatieve lading. Deze conventie wordt ook nu nog gebruikt.

Franklin beargumenteerde dat wanneer er een bepaalde hoeveelheid lading op een voorwerp geproduceerd wordt, er een gelijke hoeveelheid van de tegengestelde soort op een ander voorwerp geproduceerd moet worden. De positieve en negatieve ladingen moeten *algebraïsch* opgeteld worden, dus tijdens een willekeurig proces is de netto verandering van de geproduceerde hoeveelheid lading nul. Wanneer

de kern van een atoom. In de recente theorie worden de elektromagnetische kracht en de zwakke kernkracht gecombineerd, omdat ze verondersteld worden een gemeenschappelijke oorsprong te hebben, die de elektrozwakke kracht genoemd wordt. In latere hoofdstukken komen we op deze krachten terug.

bijvoorbeeld een plastic liniaal met een papieren handdoek opgewreven wordt, krijgt het plastic een negatieve lading terwijl de handdoek een even grote positieve lading krijgt. De ladingen worden gescheiden, maar de som van de twee is nul.

Dit is een voorbeeld van een wet die nu onomstreden is: de **wet van behoud van elektrische lading**, die stelt dat

**de nettohoeveelheid elektrische lading die geproduceerd wordt in een willekeurig proces altijd nul is;**

of, anders gezegd,

**het is niet mogelijk om netto elektrische lading te genereren of te vernietigen.**

Als een voorwerp (of een deel van de ruimte) een positieve lading krijgt, zal een gelijke hoeveelheid negatieve lading aanwezig zijn in omliggende gebieden of voorwerpen. Er zijn geen situaties aangetoond waarin deze wet niet geldt en daarom is de wet van behoud van elektrische lading net zo onomstreden als die voor behoud van energie en impuls.

## 21.2 Elektrische lading in het atoom

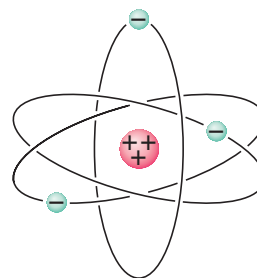
Pas in de afgelopen eeuw is het duidelijk geworden dat de oorsprong van elektrische lading binnen het atoom zelf ligt. In de laatste hoofdstukken zullen we uitgebreid ingaan op de atoomstructuur en op de ideeën die geleid hebben tot de huidige inzichten op dat gebied. Maar voor een beter begrip van wat elektriciteit is, zullen we daar hier al een korte bespreking over geven.

In een vereenvoudigd model heeft een atoom een minuscule, maar zware, positief geladen kern die omringd wordt door een of meer negatief geladen elektronen (fig. 21.3). De kern bevat protonen, die positief geladen zijn, en neutronen, die geen netto elektrische lading hebben. Alle protonen en alle elektronen hebben een exact even grote elektrische lading, maar de tekens ervan zijn tegengesteld. Neutrale atomen bevatten dus, aangezien ze geen nettolading hebben, evenveel protonen als elektronen. Soms kan een atoom een of meer van zijn elektronen verliezen of een of meer elektronen ontvangen. In dat geval zal het een netto positieve of negatieve lading hebben en wordt het een **ion** genoemd.

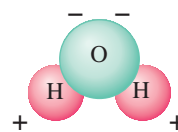
In vaste stoffen hebben de kernen de neiging om op hun plaats te blijven, terwijl sommige elektronen redelijk vrij kunnen bewegen. Wanneer een voorwerp *neutraal* is, bevat het gelijke hoeveelheden positieve en negatieve lading. Het laden van een massief voorwerp door opwrijven kan verklaard worden via de overdracht van elektronen van het ene voorwerp naar het andere. Wanneer een plastic liniaal negatief geladen wordt door opwrijven met een papieren handdoek, ontstaat door de overdracht van elektronen van de handdoek naar het plastic een positieve lading op de handdoek die gelijk is in grootte aan de negatieve lading die het plastic gekregen heeft. In vloeistoffen en gassen kunnen kernen of ionen evenzeer bewegen als elektronen.

Gewoonlijk houden voorwerpen die geladen zijn door opwrijven hun lading maar gedurende een beperkte tijd vast en keren na verloop van tijd terug naar de neutrale toestand. Maar waar blijft de lading? Meestal 'lekt' de overtollige lading weg via watermoleculen in de lucht. Dit komt doordat watermoleculen **polair** zijn, dat wil zeggen dat hun lading niet gelijkmatig verdeeld is ondanks dat ze neutraal zijn, fig. 21.4. De extra elektronen op bijvoorbeeld een geladen plastic liniaal kunnen 'weglekken' in de lucht, omdat ze aangetrokken worden door het positieve uiteinde van watermoleculen. Een positief geladen voorwerp kan echter geneutraliseerd worden door de overdracht van losjes gebonden elektronen uit watermoleculen in de lucht. Op droge dagen kun je statische elektriciteit veel beter opmerken, omdat de lucht minder watermoleculen bevat waarlangs lading zou kunnen 'weglekken'. Op vochtige

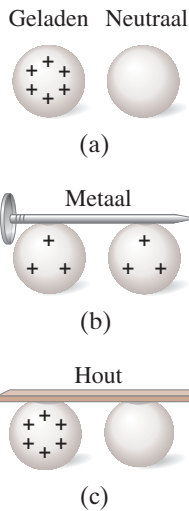
*Wet van behoud van elektrische lading*



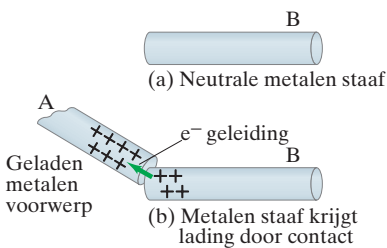
**FIGUUR 21.3** Eenvoudig model van het atoom.



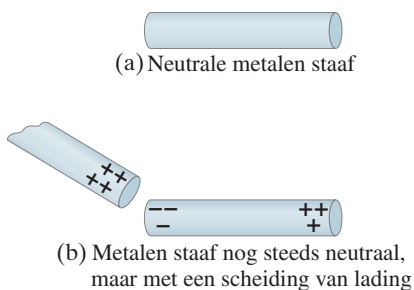
**FIGUUR 21.4** Diagram van een watermolecuul. Omdat het tegengesteld geladen is aan zijn uiteinden, wordt dit een 'polaire' molecuul genoemd.



**FIGUUR 21.5** (a) Een geladen metalen bol en een neutrale metalen bol. (b) De twee bollen verbonden door een geleider (een metalen spijker), die lading geleidt van de ene bol naar de andere. (c) De oorspronkelijke twee bollen, verbonden door een isolator (hout); er is nagenoeg geen geleiding van lading.



**FIGUUR 21.6** Een neutrale metalen staaf in (a) zal een positieve lading krijgen als deze in contact gebracht wordt (b) met een positief geladen metalen voorwerp. (De elektronen bewegen op de manier zoals in de figuur is weergegeven door de groene pijl.) Dit wordt laden door geleiding genoemd.



**FIGUUR 21.7** Laden door inductie: als de staaf in (b) in twee delen wordt gesneden, zal elk deel een nettolading hebben.

of regenachtige dagen is het erg lastig om een voorwerp gedurende langere tijd een lading te laten behouden.

## 21.3 Isolatoren en geleiders

Veronderstel dat we twee metalen bollen hebben, waarvan er een sterk geladen is en de andere elektrisch neutraal is (fig. 21.5a). Als we nu een metalen voorwerp, bijvoorbeeld een spijker, tussen de bollen plaatsen, zodanig dat deze beide bollen raakt (fig. 21.5b), zal de oorspronkelijk ongeladen bol snel geladen worden. Als we echter de bollen met elkaar verbonden zouden hebben met een houten stok of een stuk rubber (fig. 21.5c), zou de ongeladen bol niet of nauwelijks geladen worden. Materialen zoals de ijzeren spijker, worden **geleiders** van elektriciteit genoemd; hout en rubber zijn **niet-geleiders** of **isolatoren**.

Metalen zijn over het algemeen goede geleiders, terwijl de meeste andere materialen isolatoren zijn (hoewel zelfs isolatoren een beetje elektriciteit geleiden). Nagenoeg alle natuurlijke materialen passen in een van deze twee verschillende categorieën. Er zijn echter enkele materialen (waaronder silicium en germanium) die in een tussencategorie thuishoren: de **halfgeleiders**.

Vanuit atomair standpunt gezien zijn de elektronen in een isolerend materiaal erg sterk gebonden aan de kernen. In een goede metalen geleider zijn een deel van de elektronen maar heel erg los gebonden zodat ze nagenoeg vrijelijk kunnen bewegen binnen het metaal (hoewel ze het metaal niet zo gemakkelijk kunnen *verlaten*). Deze elektronen worden vaak *vrije elektronen* of *geleidingselektronen* genoemd. Wanneer een positief geladen voorwerp in de buurt komt van een geleider of deze zelfs raakt, worden de vrije elektronen in de geleider aangetrokken door dit positief geladen voorwerp en zullen snel in de richting daarvan bewegen. Als een negatief geladen voorwerp dicht bij de geleider wordt gebracht, bewegen de vrije elektronen in de geleider er snel vandaan. In een halfgeleider zijn er veel minder vrije elektronen en in een isolator nagenoeg geen.

## 21.4 Geïnduceerde lading; de elektroscop

Veronderstel een positief geladen metalen voorwerp A dat in de buurt van een ongeladen metalen voorwerp B wordt gebracht. Als de twee elkaar raken, worden de vrije elektronen in het neutrale voorwerp aangetrokken door het positief geladen voorwerp, waarbij sommige elektronen van het ene voorwerp naar het andere zullen gaan, fig. 21.6. Omdat voorwerp B, dat in eerste instantie neutraal was, nu enkele van zijn negatieve elektronen mist, zal het een netto positieve lading hebben. Dit proces wordt **‘laden door geleiding’** of ‘door contact’ genoemd en de twee voorwerpen zullen uiteindelijk beide een lading met hetzelfde teken verkrijgen.

Veronderstel nu dat een positief geladen voorwerp in de buurt van een neutrale metalen staaf gebracht wordt, zonder dat de twee elkaar raken. Hoewel de vrije elektronen de metalen staaf niet verlaten, bewegen ze toch binnen in het metaal in de richting van de uitwendige positieve lading, waardoor een positieve lading achterblijft aan het tegenoverliggende uiteinde van de staaf (fig. 21.7b). Er wordt in dat geval gezegd dat er een lading wordt *geïnduceerd* aan de beide uiteinden van de metalen staaf. Er wordt geen nettolading geproduceerd in de staaf: de ladingen zijn alleen maar *gescheiden*. De nettolading op de metalen staaf is nog steeds nul. Als we het metaal echter in twee stukken zouden snijden, zouden we twee geladen voorwerpen hebben: een positief geladen stuk en een negatief geladen stuk. Dit is **laden door inductie**.

Een andere manier om een nettolading op een metalen voorwerp te genereren is dat eerst met een geleidende draad te verbinden met de grond (of een geleidende buis die in de grond gestoken is) op de manier zoals is weergegeven in fig. 21.8a (het symbool  $\perp$  betekent verbonden met ‘aarde’). Het voorwerp wordt in dat geval **‘geaard’** genoemd. De aarde kan, omdat die zo groot is en geleidt, gemakkelijk elektronen opnemen of afstaan; de aarde fungeert dus als het ware als een reservoir voor lading.



Als een geladen voorwerp, laten we ervan uitgaan dat dit deze keer negatief geladen is, in de buurt van het metalen voorwerp gebracht wordt, worden de vrije elektronen in het metaal afgestoten, waardoor een groot deel ervan via de kabel naar de aarde zal bewegen, fig. 21.8b. Hierdoor wordt het metaal positief geladen. Als de draad nu onderbroken wordt, zal het metalen voorwerp een positieve geïnduceerde lading bezitten (fig. 21.8c). Als de draad onderbroken zou worden nadat we het negatief geladen voorwerp weer wegnemen, zouden de elektronen vanaf de aarde weer in het metalen voorwerp teruggestroomd zijn en zou dat weer neutraal geworden zijn.

Ladingscheiding is ook mogelijk in niet-geleiders. Als je een positief geladen voorwerp in de buurt van een neutrale niet-geleider brengt, op de manier zoals is weergegeven in fig. 21.9, zullen er nagenoeg geen elektronen vrij kunnen bewegen binnen de niet-geleider. Maar ze kunnen wel enigszins bewegen binnen hun eigen atomen of moleculen. Elk ovaal in fig. 21.9 stelt een molecule voor (niet op schaal); de negatief geladen elektronen, aangetrokken tot de uitwendige positieve lading, hebben de neiging daarheen te bewegen binnen hun moleculen. Omdat de negatieve ladingen in de niet-geleider zich dichterbij de uitwendige positieve lading bevinden, zal de niet-geleider als geheel aangetrokken worden door de uitwendige positieve lading (zie de foto aan het begin van het hoofdstuk).

Een **elektroscoop** is een apparaat dat kan worden gebruikt om lading te detecteren. Zoals weergegeven in fig. 21.10 bestaat deze uit een metalen behuizing met daarin twee beweegbare metalen strips, vaak van goudfolie, bevestigd aan een metalen staaf met een knop aan de buitenkant. (Soms is slechts één strip beweegbaar.)

Wanneer een positief geladen voorwerp in de buurt van de knop gebracht wordt, zal er een scheiding van lading optreden: elektronen worden aangetrokken naar de knop toe, waardoor de strips positief geladen worden, fig. 21.11a. De twee strips stoten elkaar af op de manier zoals is weergegeven in de figuur, omdat ze allebei positief geladen zijn. Als de knop echter geladen wordt door geleiding (aanraking), krijgt het hele apparaat een nettolading, zoals is weergegeven in fig. 21.11b. In beide gevallen geldt dat naarmate de hoeveelheid lading groter is, de strips verder uit elkaar zullen gaan.

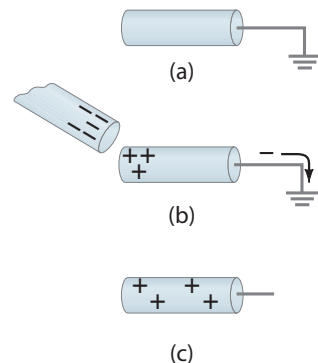
Merk op dat het niet mogelijk is om op die manier het teken van de lading te bepalen, omdat negatieve lading de strips even ver uit elkaar drijft als een even grote hoeveelheid positieve lading; in beide gevallen stoten de twee strips elkaar af. Een elektroscoop kan echter gebruikt worden om het teken van de lading te bepalen als deze eerst geladen wordt door geleiding, bijvoorbeeld zoals in fig. 21.12a, met een negatieve lading. Wanneer er nu een negatief geladen voorwerp in de buurt gebracht wordt, zoals in fig. 21.12b, worden meer elektronen afgestoten en 'geïnduceerd' om dieper de bladen in te bewegen, die verder uit elkaar gaan. Als echter een positieve lading in de buurt van de knop wordt gebracht, worden de elektronen gedwongen om omhoog te stromen, waardoor de strips minder negatief worden en ze dichterbij elkaar toe bewegen, fig. 21.12c.

De elektroscoop werd gebruikt in de eerste onderzoeken op het gebied van elektriciteit. Hetzelfde principe, aangevuld met wat elektronica, wordt gebruikt in de moderne, veel gevoeliger **elektrometers**.

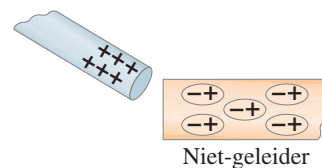
## 21.5 De wet van Coulomb

We hebben gezien dat een elektrische lading een aantrekkende of afstotende kracht uitoefent op andere elektrische ladingen. Welke factoren beïnvloeden de grootte van deze kracht? Om het antwoord daarop te vinden, onderzocht de Franse natuurkundige Charles Coulomb (1736-1806) omstreeks 1780 elektrische krachten met behulp van een torsiebalans (fig. 21.13) die veel leek op die waarmee Cavendish zijn onderzoeken op het gebied van de zwaartekracht (hoofdstuk 6) deed.

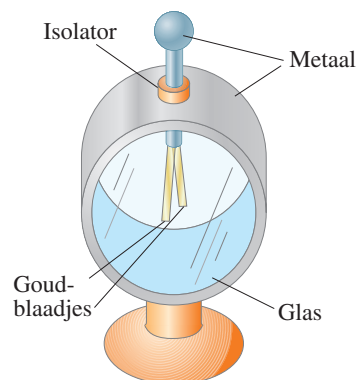
In de tijd van Coulomb waren er nog geen nauwkeurige instrumenten voor het meten van elektrische lading. Toch kon Coulomb kleine bollen met verschillende



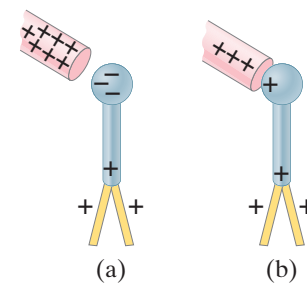
**FIGUUR 21.8** Een lading induceren op een voorwerp dat verbonden is met aarde.



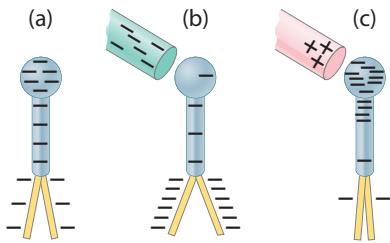
**FIGUUR 21.9** Een geladen voorwerp dat bij een niet-geleider gehouden wordt, veroorzaakt een ladingscheiding binnen de moleculen van de niet-geleider.



**FIGUUR 21.10** Elektroscoop.

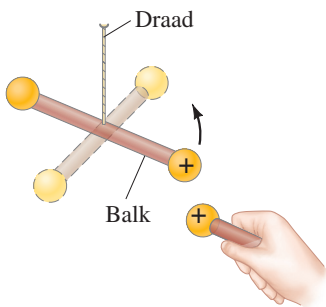


**FIGUUR 21.11** Elektroscoop geladen (a) door inductie, (b) door geleiding.

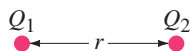


**FIGUUR 21.12** Een eerder geladen elektroscoop kan gebruikt worden om het teken van de lading van een geladen voorwerp te bepalen.

### Wet van Coulomb



**FIGUUR 21.13** Apparaat van Coulomb: Wanneer een uitwendig geladen bol in de buurt van de geladen bol aan de opgehangen balk gebracht wordt, zal de balk een klein beetje roteren. De ophangdraad verzet zich tegen de rotatiebeweging en de verdraaiingshoek is recht evenredig met de uitgeoefende kracht. Met dit apparaat onderzocht Coulomb hoe de elektrische kracht varieert als functie van de grootte van de ladingen en de onderlinge afstand.



**FIGUUR 21.14** De wet van Coulomb, vergelijking 21.1, geeft de grootte van de kracht tussen twee puntladingen,  $Q_1$  en  $Q_2$ , op een afstand  $r$  van elkaar.

hoeveelheden lading prepareren, waarbij hij de *verhouding* van de ladingen kende.\* Hoewel hij wat problemen had met geïnduceerde ladingen, kon Coulomb beredeneren dat de elektrische kracht die een geladen minuscule voorwerp uitoefent op een tweede geladen minuscule voorwerp, recht evenredig is met de lading op elk van de twee voorwerpen. Dat wil zeggen, als de lading op een van de twee voorwerpen verdubbeld wordt, verdubbelt ook de kracht en als de lading op beide voorwerpen verdubbeld wordt, neemt de kracht die ze op elkaar uitoefenen met een factor vier toe. Dit was het geval als de afstand tussen de twee ladingen gelijk bleef. Als hij de afstand tussen de twee ladingen groter maakte, stelde Coulomb vast dat de kracht afnam met het *kwadraat van de afstand*. Dat wil zeggen, als de afstand werd verdubbeld, namen de krachten met een factor vier af ten opzichte van de oorspronkelijke waarde. Dus concludeerde Coulomb dat de grootte van de kracht  $F$  die een klein geladen voorwerp uitoefent op een tweede voorwerp recht evenredig is met het product van de grootte van de lading op het ene voorwerp,  $Q_1$ , met de grootte van de lading op het andere voorwerp,  $Q_2$ , en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand  $r$  tussen de voorwerpen (fig. 21.14). Geschreven als een vergelijking, is de **wet van Coulomb**

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad [\text{groottes}]^{**} \quad (21.1)$$

waarin  $k$  een evenredigheidsconstante is.\*\*\*

Vergelijking 21.1 beschrijft deze de *grootte* van de elektrische kracht die elke lading uitoefent op de andere. De *richting* van de elektrische kracht is *altijd langs de verbindinglijn tussen de twee ladingen*. Als de twee ladingen hetzelfde teken hebben, is de kracht op elke lading gericht van de andere lading af (ze stoten elkaar af). Als de twee ladingen tegengestelde tekens hebben, is de kracht op de ene lading gericht naar de andere lading toe (ze trekken elkaar aan). Zie fig. 21.15. Merk op dat de kracht die een lading uitoefent op de tweede even groot, maar tegengesteld is aan de kracht die uitgeoefend wordt door de tweede op de eerste, in overeenstemming met de derde wet van Newton. De SI-eenheid van lading is de **coulomb** (C),\*\*\*\* die is gedefinieerd in termen van elektrische stroom en magnetisch veld en wordt in paragraaf 28.3 besproken. In SI-eenheden heeft de constante  $k$  in de wet van Coulomb de waarde

$$k = 8,99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

of, wanneer we maar twee significante cijfers nodig hebben,

$$k \approx 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2.$$

Ladingen zo groot als een coulomb komen we zelden tegen. Ladingen die geproduceerd worden door het opwrijven van gewone voorwerpen (zoals een kam of een plastic liniaal) hebben meestal een grootte van ongeveer een microcoulomb ( $1\mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ ) of minder. Alledaagse voorwerpen met een positieve lading hebben een tekort aan elektronen, terwijl negatief geladen voorwerpen een overschot

\* Coulomb beredeneerde dat als een geladen geleidende bol tegen een identieke ongeladen bol geplaatst zou worden, de lading op de eerste gelijk verdeeld zou worden over de twee bollen, vanwege de symmetrie. Op die manier was hij dus in staat om ladingen te produceren met een grootte van  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$  enzovoort van de oorspronkelijke lading.

\*\* In deze formule voor de *grootte* van de elektrische kracht worden dus de *groottes* van de ladingen gebruikt, met andere woorden hun absolute waarde.

\*\*\* De geldigheid van de wet van Coulomb berust op precisiemetingen die veel geavanceerder zijn dan de oorspronkelijke experimenten van Coulomb. De exponent 2 van  $r$  in de wet van Coulomb is aantoonbaar nauwkeurig tot 1 deel op  $10^{16}$  [dat wil zeggen,  $2 \pm (1 \times 10^{-16})$ ].

\*\*\*\* In het ooit gebruikelijke cgs-eenhedenstelsel had  $k$  de waarde 1 en werd de eenheid van elektrische lading de *elektrostatische eenheid* of de statcoulomb genoemd. Een elektrostatische eenheid is gedefinieerd als de lading op twee puntvormige voorwerpen op een afstand van 1 cm van elkaar die een kracht op elkaar uitoefenen van 1 dyne.

aan elektronen hebben. De lading op een elektron heeft een grootte van ongeveer  $1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$  en is negatief. Dit is de kleinste lading die in de natuur wordt waargenomen,\* en omdat deze fundamenteel is, heeft deze lading het symbool  $e$  gekregen. De lading van het elektron wordt vaak de **elementaire lading** genoemd:

$$e = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C} \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}.$$

Merk op dat  $e$  gedefinieerd is als een positief getal, dus de lading op het elektron is  $-e$ . Omdat een voorwerp geen deel van een elektron kan verwerven of kwijtraken, moet de nettolading op een willekeurig voorwerp gelijk zijn aan een geheel maal deze lading. Elektrische lading is dus **gekwantiseerd**; elektrische lading bestaat alleen in discrete hoeveelheden:  $1e$ ,  $2e$ ,  $3e$  enzovoort). Omdat  $e$  zo klein is, is dit onderscheid in de praktijk in macroscopische ladingen nauwelijks merkbaar (voor  $1 \mu\text{C}$  zijn ongeveer  $10^{13}$  elektronen nodig), zodat lading continu lijkt. De lading van een proton, een elementair bestanddeel in de atoomkern (paragraaf 21.2), is exact  $+e$ , dezelfde lading als een elektron maar met een tegengesteld teken. (De massa van een proton is bijna 2000 maal zo groot als die van een elektron.)

De wet van Coulomb lijkt sterk op de *wet van de universele zwaartekracht*,  $F = Gm_1m_2 / r^2$ , die de zwaartekracht beschrijft die een massa  $m_1$  uitoefent op een massa  $m_2$  (vgl. 6.1). Beide zijn omgekeerd **kwadratische wetten** ( $F \propto 1/r^2$ ). Beide hebben ook een evenredigheidsrelatie met een eigenschap van elk voorwerp: met de massa voor de zwaartekracht, met de elektrische lading voor elektriciteit. En beide werken over een afstand (dat wil zeggen, er is geen contact nodig). Een belangrijk verschil tussen de twee wetten is echter dat de zwaartekracht altijd een aantrekkingskracht is, terwijl de elektrische kracht zowel aantrekkend als afstotend kan zijn. Elektrische lading bestaat in twee soorten, positief en negatief; zwaartekrachtmassa is alleen positief.

De constante  $k$  in vgl. 21.1 wordt vaak geschreven in termen van een andere constante,  $\epsilon_0$ , die de **permittiviteit van vrije ruimte** genoemd wordt. De relatie ertussen is  $k = 1/4\pi\epsilon_0$ . De wet van Coulomb kan dus ook geschreven worden als

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1Q_2}{r^2}, \quad [\text{groottes}] \quad (21.2)$$

waarin\*\*

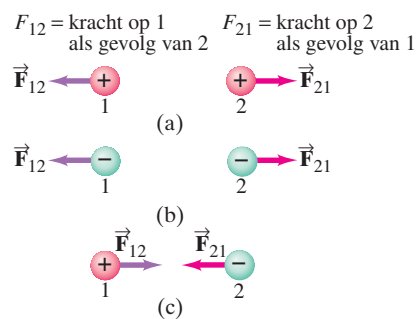
$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2.$$

Vergelijking 21.2 lijkt complexer dan vergelijking 21.1, maar andere elementaire vergelijkingen die we nog niet behandeld hebben, zullen, zoals je zult zien, eenvoudiger zijn in termen van  $\epsilon_0$  dan in termen van  $k$ . Het maakt echter niet uit welke variant je gebruikt, aangezien de vergelijkingen 21.1 en 21.2 gelijkwaardig zijn. (De nauwkeurige waarde van  $\epsilon_0$  kun je voor in het boek vinden.)

De vergelijkingen 21.1 en 21.2 zijn van toepassing op voorwerpen waarvan de grootte veel kleiner is dan hun onderlinge afstand. In het ideale geval gelden ze voor **puntladingen** (ruimtelijke grootte verwaarloosbaar in vergelijking tot andere afstanden). Voor voorwerpen met een eindige grootte is het niet altijd duidelijk welke waarde voor  $r$  gebruikt moet worden, met name omdat het kan zijn dat de lading niet gelijkmatig verdeeld is op het voorwerp. Als de twee voorwerpen bollen zijn en de lading op beide bollen gelijkmatig verdeeld mag worden verondersteld, is  $r$  de afstand tussen de middelpunten van de bollen (we zien dit in de voorbeelden 22.3 en 22.4).

\* Kijk achterin het boek voor een nauwkeurige waarde. (In het nieuwe SI, paragraaf 1.4, wordt de lading op het elektron  $e$  gedefinieerd als exact, en de Coulomb in termen van  $e$ , details die voor ons hier niet van belang zijn.)

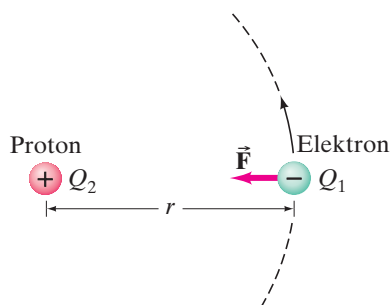
\*\* Onze conventie voor eenheden, zoals  $\text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$  voor  $\epsilon_0$ , betekent dat  $\text{m}^2$  in de noemer staat. Dat wil zeggen,  $\text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$  betekent  $\text{C}^2 / (\text{N} \cdot \text{m}^2)$  en *niet*  $(\text{C}^2/\text{N}) \cdot \text{m}^2 = \text{C}^2 \cdot \text{m}^2/\text{N}$ .



**FIGUUR 21.15** De statische elektrische kracht die een puntlading uitoefent op een andere is altijd gelegen langs de verbindinglijn van de twee ladingen. De richting ervan is afhankelijk van het teken van de ladingen; als beide hetzelfde teken hebben stoten ze elkaar af zoals in (a) en (b); als beide een verschillend teken hebben trekken ze elkaar aan, zoals in (c).

*De wet van Coulomb (in termen van  $\epsilon_0$ )*

De wet van Coulomb beschrijft de kracht die een elektrisch geladen deeltje ( $Q_1$ ) uitoefent op een tweede ( $Q_2$ ), wanneer ze in rust zijn. We noemen dit de **elektrostatiche kracht** of de **coulombkracht**. Wanneer de ladingen in beweging zijn, spelen ook andere krachten een rol. We komen daar later in het boek op terug. In dit hoofdstuk bespreken we alleen ladingen in rust, de **elektrostatica**.



FIGUUR 21.16 Voorbeeld 21.1.

### Opgave A

Bekijk de openingsvraag aan het begin van het hoofdstuk nog een keer en beantwoord de vraag opnieuw. Probeer uit te leggen waarom je antwoord eerst eventueel anders was.

### Voorbeeld 21.1 Elektrische kracht op een elektron door een proton

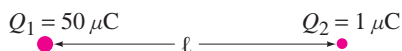
Bepaal de grootte en richting van de elektrische kracht op het elektron van een waterstofatoom uitgeoefend door het enkele proton ( $Q_2 = +e$ ) dat de atoomkern vormt. Neem aan dat gemiddelde afstand tussen het omwentelende elektron en het proton is  $r = 0,53 \times 10^{-10}$  m, fig. 21.16.

**Aanpak** Om de grootte van de kracht te bepalen gebruiken we de wet van Coulomb,  $F = k Q_1 Q_2 / r^2$  (vgl. 21.9.1), met  $r = 0,53 \times 10^{-10}$  m. Het elektron en het proton hebben dezelfde *ladingsgrootte*,  $e$ , dus  $Q_1 = Q_2 = 1,6 \times 10^{-19}$  C.

**Oplossing** De grootte van de kracht is

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(1,6 \times 10^{-19})(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0,53 \times 10^{-10} \text{ m})^2} = 8,2 \times 10^{-10} \text{ N}.$$

De richting van de kracht op het elektron is naar het proton toe, omdat de ladingen tegengestelde tekens hebben zodat de kracht aantrekkend is.



FIGUUR 21.17 Conceptvoorbeeld 21.2.

### Conceptvoorbeeld 21.2 Welke lading oefent de grootste kracht uit?

Twee positieve puntladingen,  $Q_1 = 50 \mu\text{C}$  en  $Q_2 = 1 \mu\text{C}$  bevinden zich op een afstand  $l$  van elkaar, fig. 21.17. Welke kracht is het grootst, de kracht die  $Q_1$  uitoefent op  $Q_2$  of de kracht die  $Q_2$  uitoefent op  $Q_1$ ?

**Antwoord** Met de wet van Coulomb berekenen we de kracht die op  $Q_1$  uitgeoefend wordt door  $Q_2$ :

$$F_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{l^2}.$$

De kracht op  $Q_2$ , uitgeoefend door  $Q_1$  is

$$F_{21} = k \frac{Q_2 Q_1}{l^2}$$

en die is even groot. De vergelijking is symmetrisch voor de twee ladingen, dus  $F_{21} = F_{12}$ .

**Opmerking** Door de derde wet van Newton weten we ook dat deze twee krachten even groot moeten zijn.

### Oplossingsstrategie

Gebruik groottes in de wet van Coulomb; bepaal de richting van de kracht met behulp van de tekens van de ladingen



## Opgave B

Wat is in conceptvoorbeeld 21. 2 de richting van  $F_{12}$  ten opzichte van die van  $F_{21}$ ?

De wet van Coulomb, vgl. 21.1 of 21.2, geeft de kracht op een lading die veroorzaakt wordt door enkel één andere lading. Deze coulombkracht is een vector, met grootte en richting. Als er meerdere (of veel) ladingen aanwezig zijn, is de *resulterende kracht op een willekeurige lading de vectorsom van de krachten die door alle andere ladingen erop uitgeoefend worden*. Dit **superpositieprincipe** is gebaseerd op experimenten en leert dat elektrische krachtvectoren opgeteld kunnen worden net als alle andere vectoren. Als je bijvoorbeeld een systeem hebt van vier ladingen, is de netto kracht op lading 1 de vectorsom van de krachten die op lading 1 worden uitgeoefend door de ladingen 2, 3 en 4:  $\vec{F}_{1\text{net}} = \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$ . De groottes van deze drie krachten worden bepaald uit de wet van Coulomb, en worden vervolgens vectorieel opgeteld zoals besproken in hoofdstuk 3. Bij een continue verdeling van lading wordt de som een integraal (paragraaf 21.7).

Zoals bij het oplossen van alle problemen, is het belangrijk om voor elk voorwerp een krachtenschema (vrijlichaamsschema, zie deel 1, hoofdstuk 4) te tekenen, waarbij alle krachten die *op* dat voorwerp werken, worden weergegeven. Bij het toepassen van de wet van Coulomb, kunnen we om de *grootte* van elke kracht te bepalen beginnen met uitsluitend de ladingsgroottes (mintekens weglaten). Bepaal vervolgens via natuurkundig redeneren de *richting* van de kracht (langs de verbindinglijn tussen de twee deeltjes: gelijke ladingen stoten elkaar af, tegengestelde ladingen trekken elkaar aan), en geef de kracht weer in het schema. Tel ten slotte alle krachten op een voorwerp als vectoren bij elkaar op om zo de resulterende kracht op dat voorwerp te verkrijgen. Het kan handig zijn om bij elk van de betrokken krachten dubbele indices te gebruiken. De eerste index staat voor het deeltje *waarop* de kracht werkt; de tweede voor het deeltje dat de kracht uitoefent. Bijvoorbeeld bij drie ladingen betekent  $\vec{F}_{31}$  de *door* deeltje 1 *op* deeltje 3 uitgeoefende kracht.

### Voorbeeld 21.3 Drie ladingen op een rij

Drie geladen deeltjes bevinden zich op een lijn, op de manier zoals is weergegeven in fig. 21.18a. Bereken de resulterende elektrostatistische kracht op deeltje 3 (de lading van  $-4,0 \mu\text{C}$  rechts) als gevolg van de andere twee ladingen.

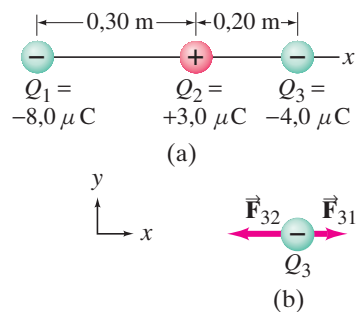
**Aanpak** De resulterende kracht op deeltje 3 is de vectorsom van de kracht  $\vec{F}_{31}$  die op 3 uitgeoefend wordt door deeltje 1 en de kracht  $\vec{F}_{32}$  die op 3 uitgeoefend wordt door deeltje 2:  $\vec{F} = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32}$ .

**Oplossing** De groottes van deze twee krachten kunnen we berekenen met behulp van de wet van Coulomb, vgl. 21.1:

$$\begin{aligned} F_{31} &= k \frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^2} \\ &= \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(4,0 \times 10^{-6} \text{ C})(8,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,50 \text{ m})^2} = 1,2 \text{ N}, \end{aligned}$$

waarin  $r_{31} = 0,50 \text{ m}$  de afstand is van  $Q_3$  tot  $Q_1$ . Op dezelfde manier geldt:

$$\begin{aligned} F_{32} &= k \frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} \\ &= \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(4,0 \times 10^{-6} \text{ C})(3,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,20 \text{ m})^2} = 2,7 \text{ N}. \end{aligned}$$



FIGUUR 21.18 Voorbeeld 21.3.

Omdat we de grootte van de krachten wilden weten, hebben we de tekens van de ladingen genegeerd. Maar het is wel belangrijk om rekening te houden met de tekens om de richting van elke kracht te bepalen. We noemen de lijn tussen de deeltjes de  $x$ -as, en we definiëren de richting naar rechts als positief. In dat geval zijn, omdat  $\vec{F}_{31}$  afstotend is en  $\vec{F}_{32}$  aantrekkend, de richtingen van de krachten zoals is weergegeven in fig. 21.18b:  $\vec{F}_{31}$  is gericht in de positieve  $x$ -richting (van  $Q_1$  af) en  $\vec{F}_{32}$  is gericht in de negatieve  $x$ -richting (naar  $Q_2$  toe). De  $x$ -component van de resulterende kracht op deeltje 3 is dus

$$F_x = -F_{32} + F_{31} = -2,7\text{ N} + 1,2\text{ N} = -1,5\text{ N}.$$

De grootte van de resulterende kracht is 1,5 N en hij is naar links gericht.

**Opmerking** Lading  $Q_1$  oefent op lading  $Q_3$  een kracht uit alsof  $Q_2$  er niet is (dit is het superpositieprincipe). Dat wil zeggen dat de lading in het midden,  $Q_2$ , op geen enkele manier het effect van lading  $Q_1$  op  $Q_3$  beïnvloedt. Natuurlijk oefent  $Q_2$  zijn eigen kracht uit op  $Q_3$ .

### Opgave C

Bereken de grootte en richting van de resulterende kracht op  $Q_1$  in fig. 21.18a.

### Voorbeeld 21.4 Elektrische kracht met behulp van vectorcomponenten

Bereken de resulterende elektrostatistische kracht op lading  $Q_3$  in fig. 21.19a als gevolg van de ladingen  $Q_1$  en  $Q_2$ .

**Aanpak** We gebruiken de wet van Coulomb om de grootte van de afzonderlijke krachten te bepalen. De richting van elke kracht komt overeen met de lijn tussen  $Q_3$  en  $Q_1$  of  $Q_2$ . De krachten  $\vec{F}_{31}$  en  $\vec{F}_{32}$  hebben de richtingen zoals die zijn weergegeven in fig. 21.19a, omdat  $Q_1$  een aantrekkende kracht uitoefent op  $Q_3$  en  $Q_2$  een afstotende kracht uitoefent. In fig. 21.19a zijn ook de  $x$ - en  $y$ -componenten weergegeven van  $\vec{F}_{31}$  en  $\vec{F}_{32}$  is langs de  $+y$ -as gericht en heeft dus geen  $x$ -component.  $\vec{F}_{31}$  en  $\vec{F}_{32}$  zijn *niet* gericht langs dezelfde lijn, dus moeten we, om de resulterende kracht op  $Q_3$  te bepalen, de  $x$ - en  $y$ -componenten van  $\vec{F}_{31}$  en  $\vec{F}_{32}$  afzonderlijk bepalen en die vectorieel optellen.

**Oplossing** De groottes van  $\vec{F}_{31}$  en  $\vec{F}_{32}$  zijn (we negeren de tekens van de ladingen, omdat we de richtingen kennen)

$$F_{31} = k \frac{Q_3 Q_1}{r_{31}^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(6,5 \times 10^{-5} \text{ C})(8,6 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,60 \text{ m})^2} = 140 \text{ N},$$

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r_{32}^2} = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(6,5 \times 10^{-5} \text{ C})(5,0 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,30 \text{ m})^2} = 325 \text{ N}.$$

(We houden tot aan het eind drie significante cijfers, en bewaren er vervolgens twee omdat er slechts twee gegeven zijn.) We bepalen uitsluitend de  $x$ - en  $y$ -componenten van  $\vec{F}_{31}$  (fig. 21.19a) met behulp van goniometrische functies (zoals besproken in paragraaf 3.4):

$$F_{31x} = F_{31} \cos 30^\circ = (140 \text{ N}) \cos 30^\circ = 120 \text{ N},$$

$$F_{31y} = -F_{31} \sin 30^\circ = -(140 \text{ N}) \sin 30^\circ = -70 \text{ N}.$$

### ! Let op

Elke lading oefent een eigen kracht uit.

Een lading beïnvloedt het effect van de andere ladingen niet.