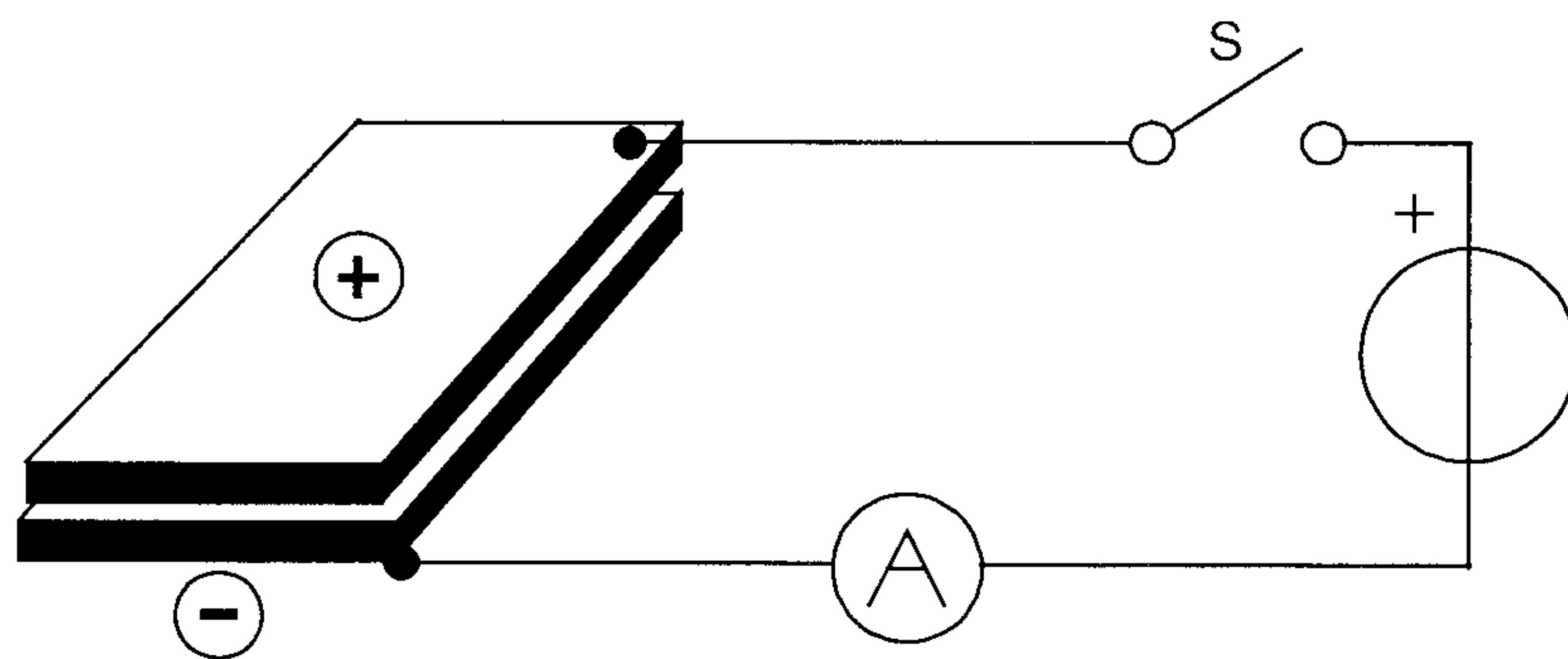


## 3. CONDENSATOREN EN SPOELEN

### 3.1 Condensatoren

#### Inleiding

We verbinden, door twee leidingen waarin een schakelaar S en een ampèremeter A zijn opgenomen, een energiebron met twee metalen platen, welke evenwijdig aan elkaar zijn opgesteld (zie figuur 3.1-1). Zodra de schakelaar wordt gesloten zullen elektronen van de ene plaat worden weggezogen door de bron en gedrukt naar de andere plaat. Door het verschil in potentiaal tussen de platen, dat even groot wordt als de bronspanning, ontstaat dus een verschil in lading.



Figuur 3.1-1. Condensatorplaten

#### Capaciteit en lading

De bovenste plaat is positief, de onderste negatief geladen. Wanneer de schakelaar wordt geopend, blijft de positieve plaat een elektronentekort en de negatieve plaat een overschot houden. Daaruit volgt, dat het potentiaalverschil tussen de platen blijft bestaan (de elektronen kunnen niet weg). We zeggen dan dat de platen *geladen* zijn. Wanneer contact wordt gemaakt tussen beide platen, door ze met een draad te verbinden, dan zal het overschot elektronen van de onderste plaat naar de bovenste vloeien. Deze had immers een tekort! Het evenwicht wordt hierdoor hersteld en beide platen zijn weer neutraal, de platen zijn ontladen.

#### De condensator

Twee geleiders (platen) gescheiden door een isolator, noemen we een condensator. Zoals uit het voorgaande blijkt bezit een condensator de eigenschap elektrische lading te kunnen vasthouden, alsof het een reservoir is. Er vloeit stroom bij het laden of ontladen van de condensator. Dit noemen we de laad- of ontladstroom van de condensator. De hoeveelheid elektronen welke in een condensator kunnen worden verzameld noemen we de lading, symbool  $Q$ . De eenheid van lading is de coulomb. Wanneer we gedurende enige tijd een stroom in de condensator laten vloeien krijgen we een lading. Een stroom van 1 ampère verplaatst in 1 seconde een hoeveelheid lading van 1 coulomb.

De formule hiervoor luidt:

$$Q = \text{laadstroom} \cdot \text{tijd} = I \cdot t$$

waarbij:

$Q$  in coulomb (C)

$I$  in ampère (I)

$t$  in seconden (s)

De hoeveelheid lading welke we in een condensator kunnen verzamelen hangt nauw samen met de capaciteit en de spanning tussen de platen. In formule:

$$Q = C \cdot U$$

$Q$  in coulomb (C)

$C$  in Farad (F)

$U$  in volt (V)

Net als de Wet van Ohm kunnen we hier ook verwisselen:

$$C = \frac{Q}{U} \text{ of } U = \frac{Q}{C}$$

De capaciteit van een condensator wordt vermeld in Farad (F). Deze eenheid uit de natuurkunde is voor ons veel te groot. We gebruiken meestal  $\mu\text{F}$ ,  $\text{nF}$  en  $\text{pF}$ . Hoe groter het plaatoppervlak, hoe kleiner de afstand tussen de platen en hoe hoger de toegepaste spanning, hoe meer lading kan worden opgenomen.

### Diëlectricum

De capaciteit blijkt ook af te hangen van het isolatiemateriaal tussen de platen. Deze is het kleinst met lucht en het vervangen van de lucht door andere materialen kan de capaciteit vele malen vergroten. Bij een micacondensator (mica tussen de platen) is de capaciteit 8 maal zo groot als bij lucht. Die tussenstof noemen we het diëlectricum. Mica heeft een diëlectrische constante  $K = 8$ .

De capaciteit van een condensator berekenen we met de formule

$$C = 0,0885 \cdot K \cdot \frac{A}{d}$$

$C$  capaciteit in p

$K$  diëlectrische constante

$d$  plaatafstand in centimeters

$A$  werkzaam oppervlak van de plaat in  $\text{cm}^2$  (de zijde welke tegenover de andere plaat ligt).

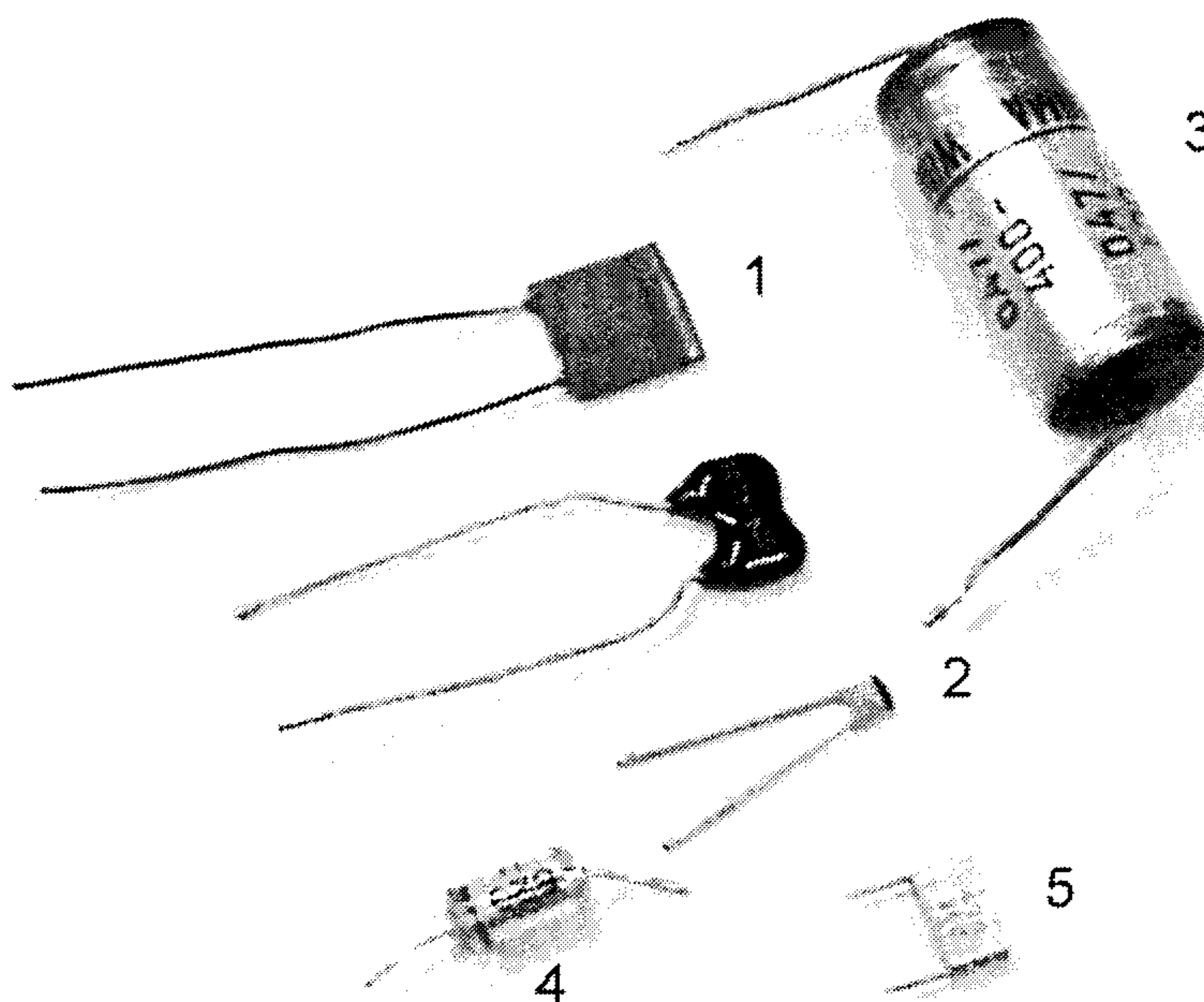
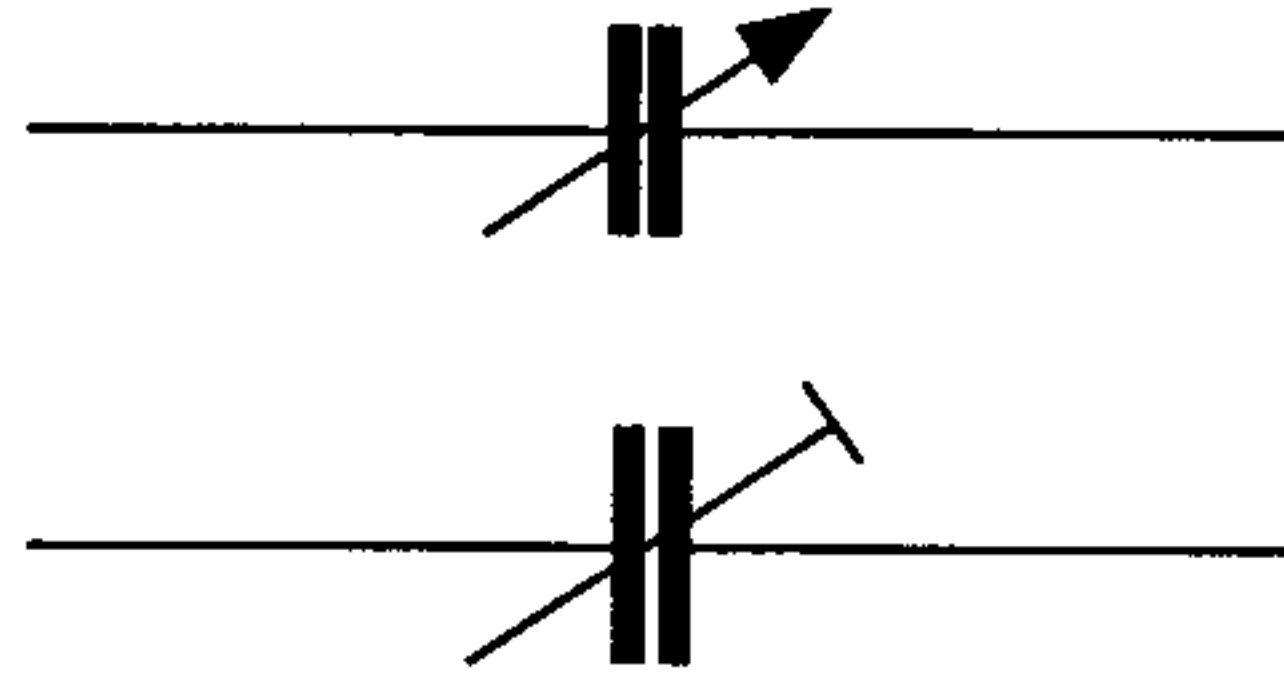


Foto 3-1. Enkele uitvoeringen van vaste condensatoren. 1 en 2 zijn keramische types, 3 is een polyester type, 4 is een styroflex type en 5 is een polyethyleen type (MKT).

Enkele materialen en hun diëlectrische constante.

<b>Materiaal</b>	<b>K</b>
<b>Bakeliet (papier)</b>	3,8 - 5,5
<b>Bakeliet (mica)</b>	5 - 6
<b>Celluloid</b>	4 - 16
<b>Fiber</b>	5 - 7,8
<b>Glas (venster)</b>	7,6 - 7,8
<b>Glas (pyrex)</b>	4,2
<b>Hout (droog eiken)</b>	2,5 - 6,8
<b>Lucht</b>	1
<b>Mica</b>	2,5 - 8
<b>Olie</b>	4,5 - 7
<b>Papier</b>	2 - 2,4
<b>Pertinax</b>	4,8
<b>Polyethyleen</b>	2,3 - 2,4
<b>Polystyreen</b>	2,4 - 2,9
<b>Steatiet (keramiek)</b>	4,4



Figuur 3.1-2. Schema symbool voor een variabele (boven) en een instelbare condensator (onder)

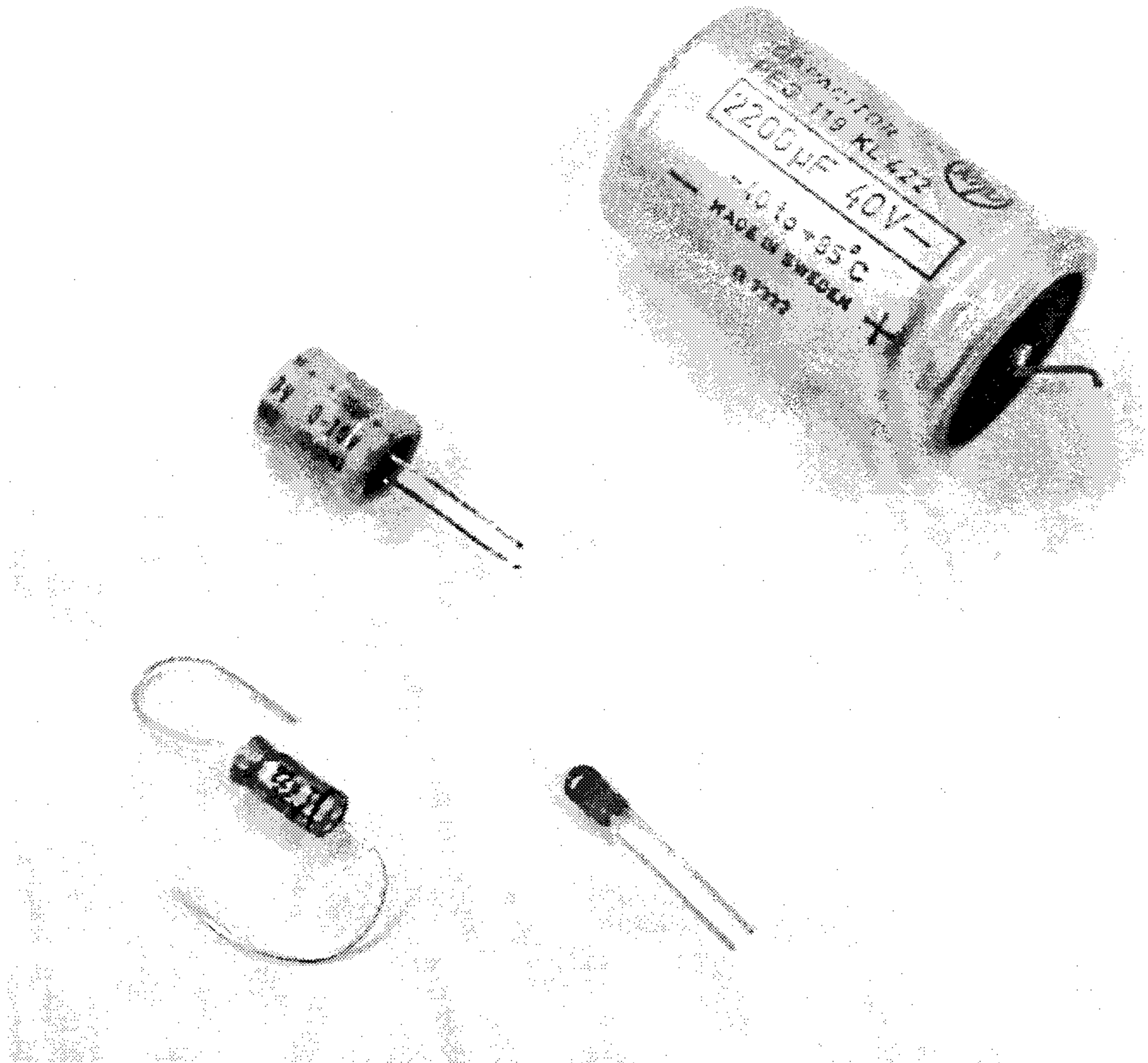


Foto 3-2. Enkele voorbeelden van electrolitische condensatoren. De kleine condensator rechtsonder heeft een tantalium elektrode. De andere condensatoren hebben een aluminium elektrode

### Condensatoren bij radio

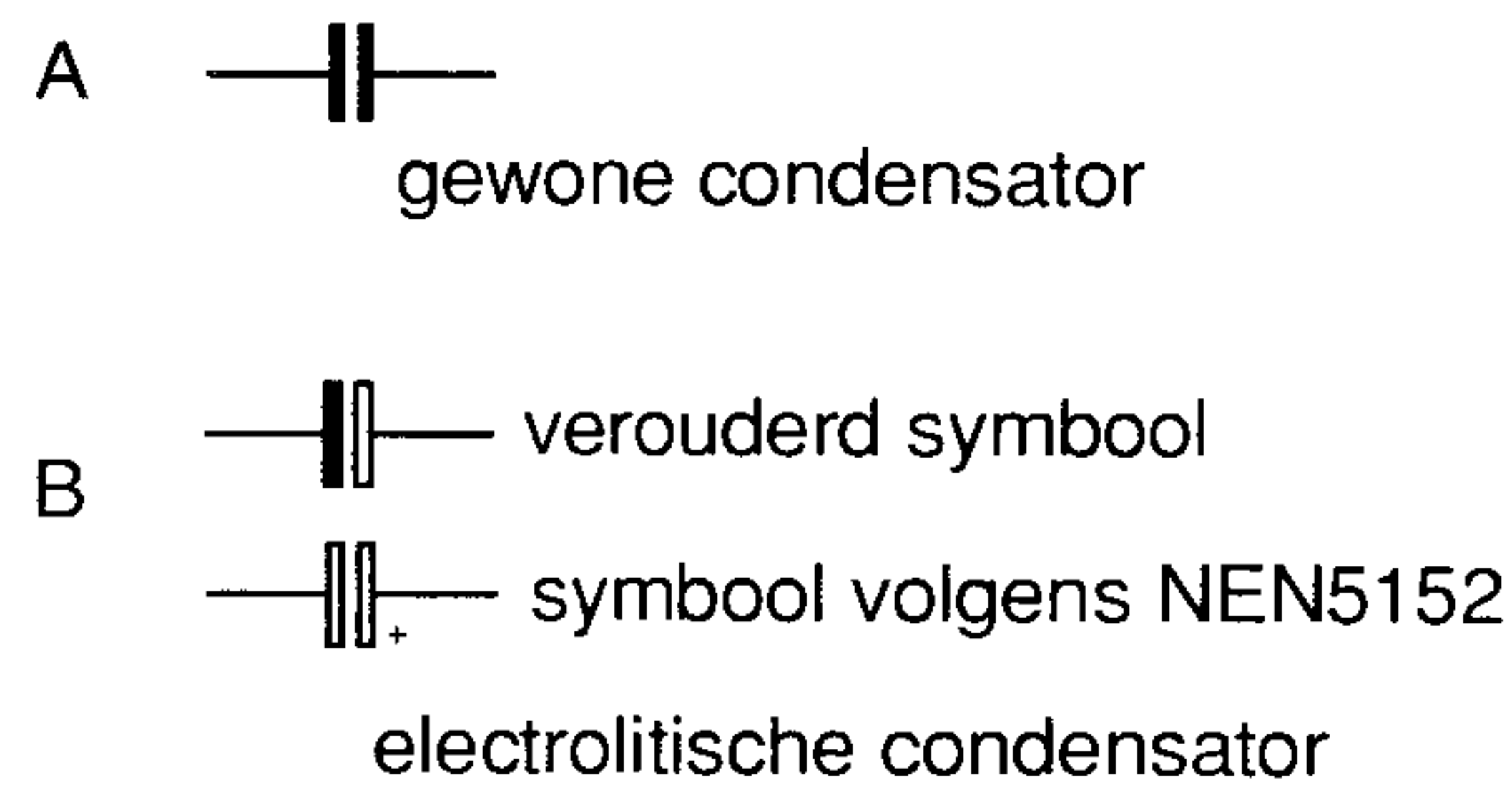
In ons radiotoestel komen we condensatoren in allerlei vorm en formaat tegen, al naar gelang het doel waarvoor ze worden gebruikt.

### Variabele condensatoren

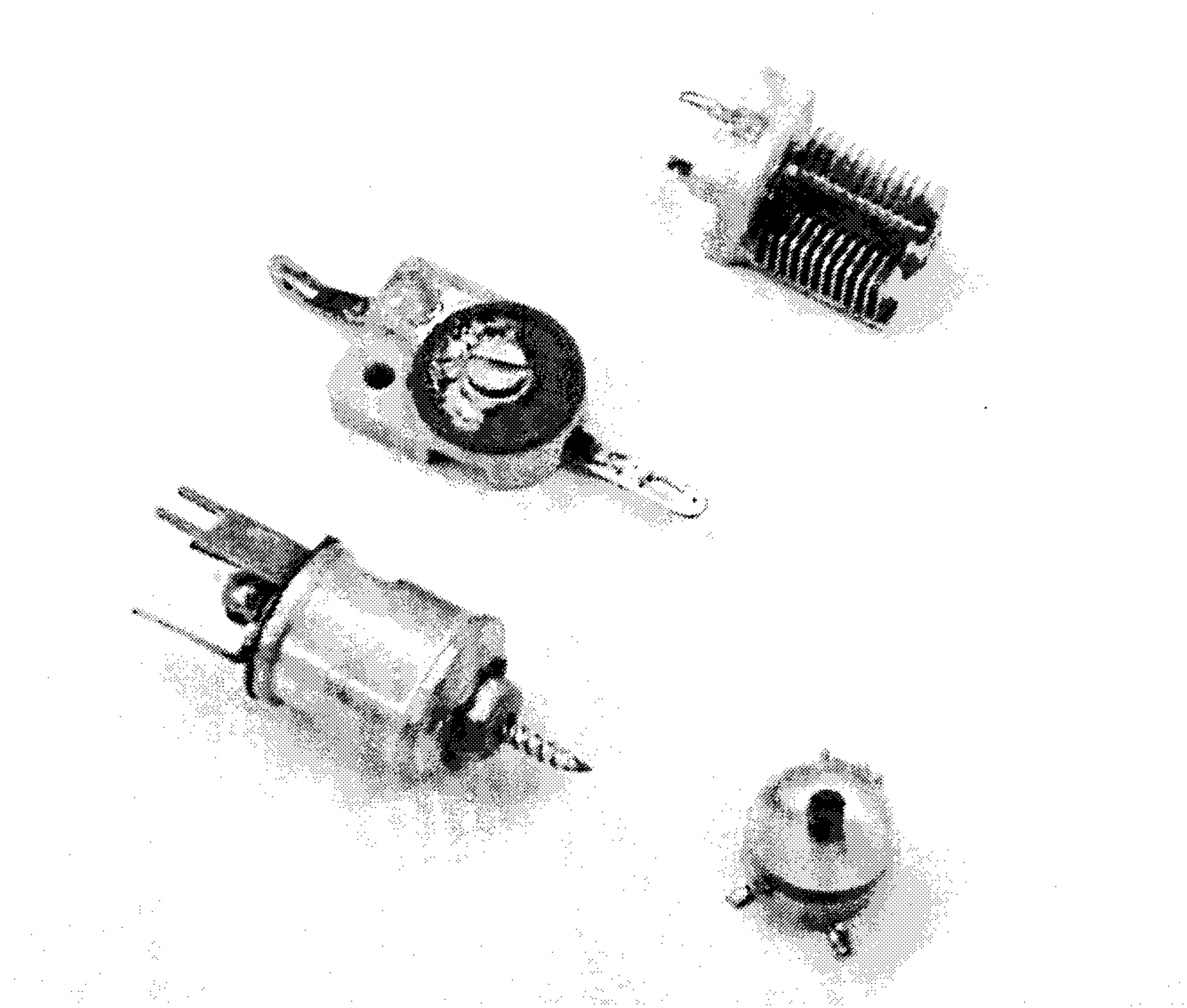
Deze hebben meestal lucht als diëlectricum, en een beweegbaar stel platen, zodat de capaciteit instelbaar is (zie foto 3-3). Figuur 3.1-2 geeft enkele symbolen voor variabele condensatoren zoals ze in schema's worden gebruikt. Variabele condensatoren worden gebruikt om een resonantiekring op de gewenste frequentie af te stemmen. Wanneer het niet nodig is continu de capaciteit te kunnen veranderen, is een as niet nodig. We gebruiken dan



een schroevendraaier instelling. We noemen dit dan een trimmer (afregelaar).



*Figuur 3-1-3. Schema symbool voor een gewone- en een electrolytische condensator.*



*Foto 3-3. Enkele voorbeelden van variabele condensatoren*

### **Vaste condensatoren**

Condensatoren met een vaste capaciteit (foto 3-1) kunnen veelal op de printplaat worden gesoldeerd. Het dielectricum is vaak erg dun, soms zelfs vloeibaar, zodat een betrekkelijk grote capaciteit in een kleine behuizing kan worden ondergebracht. Enkele schemasymbolen staan in figuur 3.1-3.

### **Keramische condensatoren**

Deze bestaan meestal uit een keramisch kokertje waarop de zilveren platen zijn gedampt. Ze zijn niet geschikt voor hoge spanningen maar ze hebben goede eigenschappen en zijn voordelig.

### Mica condensatoren

Dit type bestaat uit metalen plaatjes met mica ertussen als diëlectricum. Soms zijn de plaatjes van opgedampt zilver. De eigenschappen van deze condensatoren zijn uitmuntend. De mica condensator is minder gevoelig voor temperatuurveranderingen dan alle overige soorten vaste condensatoren.

### Kunststof condensatoren

Deze types worden vaak toegepast waar met hoge spanningen wordt gewerkt. Er worden vele soorten kunststof toegepast, elk met zijn eigen speciale eigenschappen. De voortschrijdende ontwikkeling in de techniek levert een steeds grotere capaciteit in steeds kleinere behuizing (o.a. polyester condensatoren).

### Elektrolytische condensatoren

Deze types hebben als diëlectricum een oxidelaagje op de plaat zelf (foto 3-3). Ze kunnen gewend worden aan hoge spanningen (het oxidelaagje past zich aan). Er bestaan drie typen.

- a) Twee lagen aluminiumfolie met een laagje papier ertussen waarin het elektrolyt is opgenomen.
- b) Een busje met metalen cylinders welke om en om verbonden zijn. Hierdoor ontstaat een grote capaciteit (wel tot 10.000  $\mu\text{F}$ ).
- c) Tantaal condensatoren. Deze zijn maar voor een zeer beperkte spanning geschikt ( $< 25 \text{ v}$ ). Overspanning doet ze direct ontploffen.

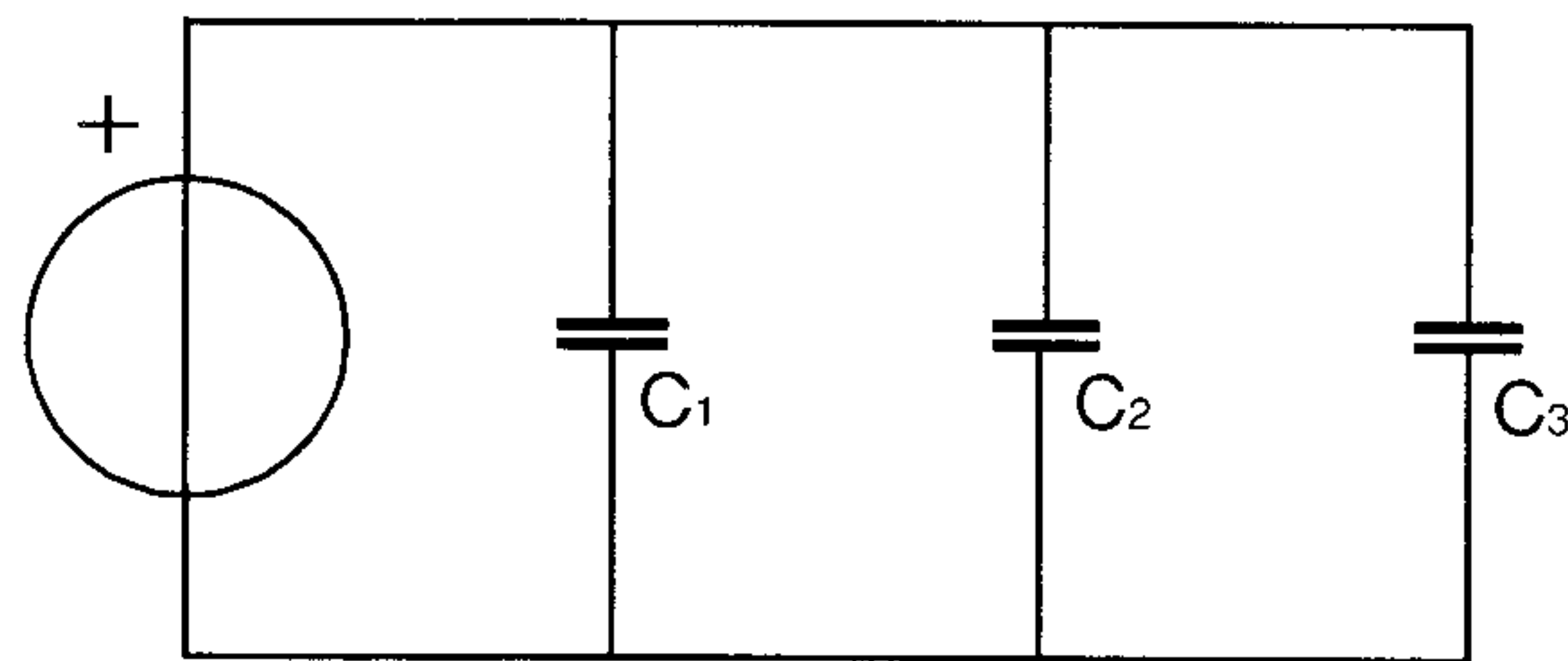
### Doorslagspanning

Uit de formule  $Q = C \cdot U$  volgt dat de lading groter wordt naarmate we meer spanning op de condensator aansluiten. Omdat het diëlectricum een isolator is, laten de elektronen hun atomen niet zo snel los als in geleiders. Wanneer we dus een hoge spanning aansluiten wordt een aanzienlijke kracht uitgeoefend op de elektronen en kernen van het diëlectricum. Als de uitgeoefende kracht maar groot genoeg is zal het diëlectricum doorslaan en zal er een stroom gaan vloeien. De spanning waarbij dit kan gebeuren noemen we de doorslagspanning. Deze is niet voor alle materialen en materiaaldiktes gelijk. Lucht zal eerder doorslaan dan olie of mica. De werkspanning welke op de condensatoren wordt vermeld, is ruim beneden de doorslagspanning.

## 3.2 Schakelingen van condensatoren

### Parallelschakeling

In figuur 3.1-4 geven we een parallelschakeling van 3 condensatoren  $C_1$ ,  $C_2$  en  $C_3$ .



*Figuur 3.1-4 Parallel schakeling van condensatoren*

Alle drie zullen ze lading opnemen totdat de bronspanning is bereikt. De som van de ladingen:

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Bij parallel geschakelde condensatoren is de totaalcapaciteit gelijk aan de som van de capaciteiten:

$$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3$$

precies andersom als bij weerstanden (weerstand in serie komt overeen met condensatoren parallel)! Bij parallelschakeling wordt de doorslagspanning bepaald door de condensator welke de laagste doorslagspanning heeft.

### **Serieschakeling**

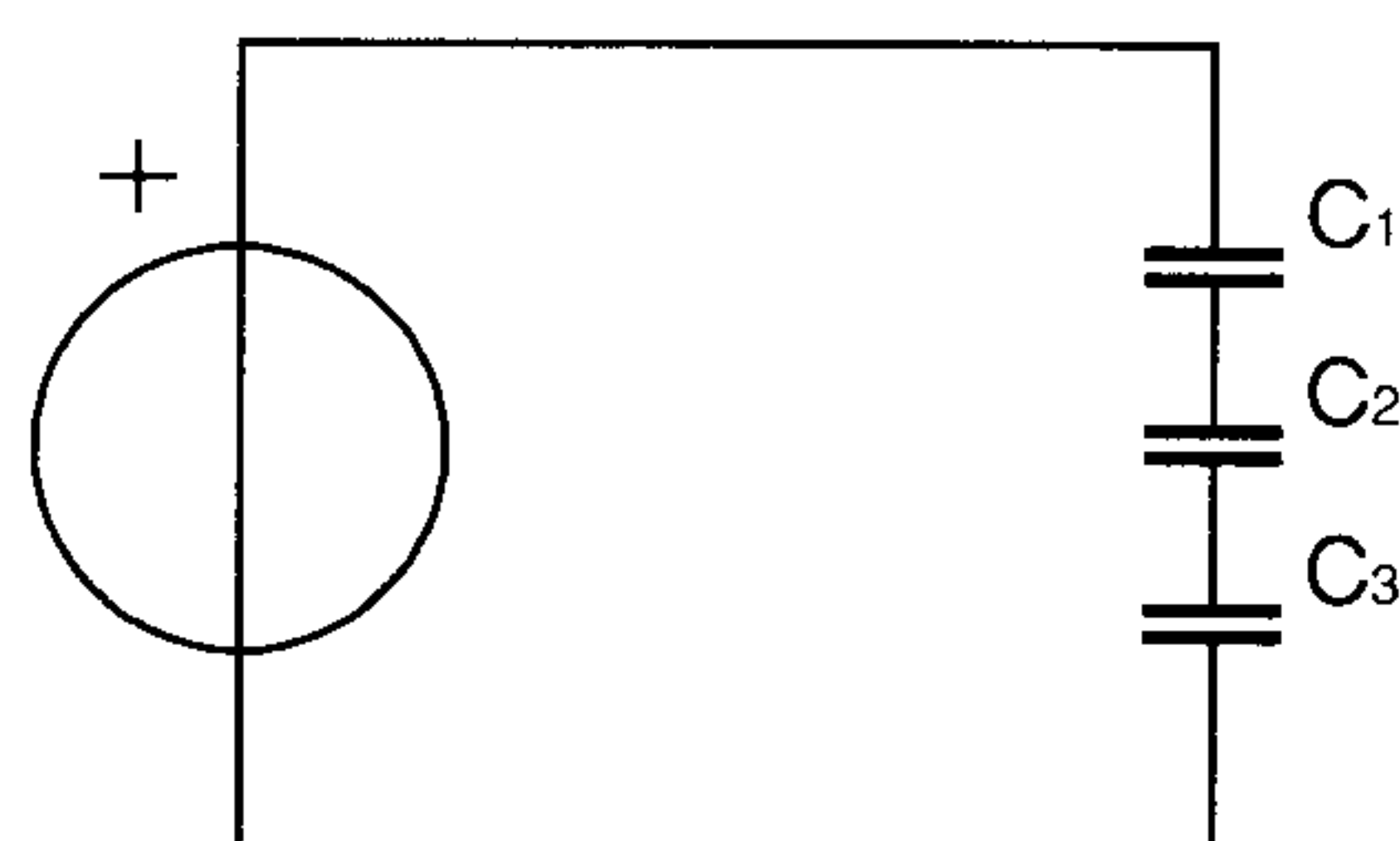
Bij serieschakelingen (zie figuur 3.1-5) is de vervangende capaciteit altijd kleiner dan de kleinste condensator. De lading welke de batterij uit de eerst aangesloten condensator wegtrekt wordt door deze weer uit de volgende weggetrokken. Zo zien we dat bij alle condensatoren dezelfde verplaatsing van lading optreedt:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Voor seriegeschakelde condensatoren geldt vervolgens:

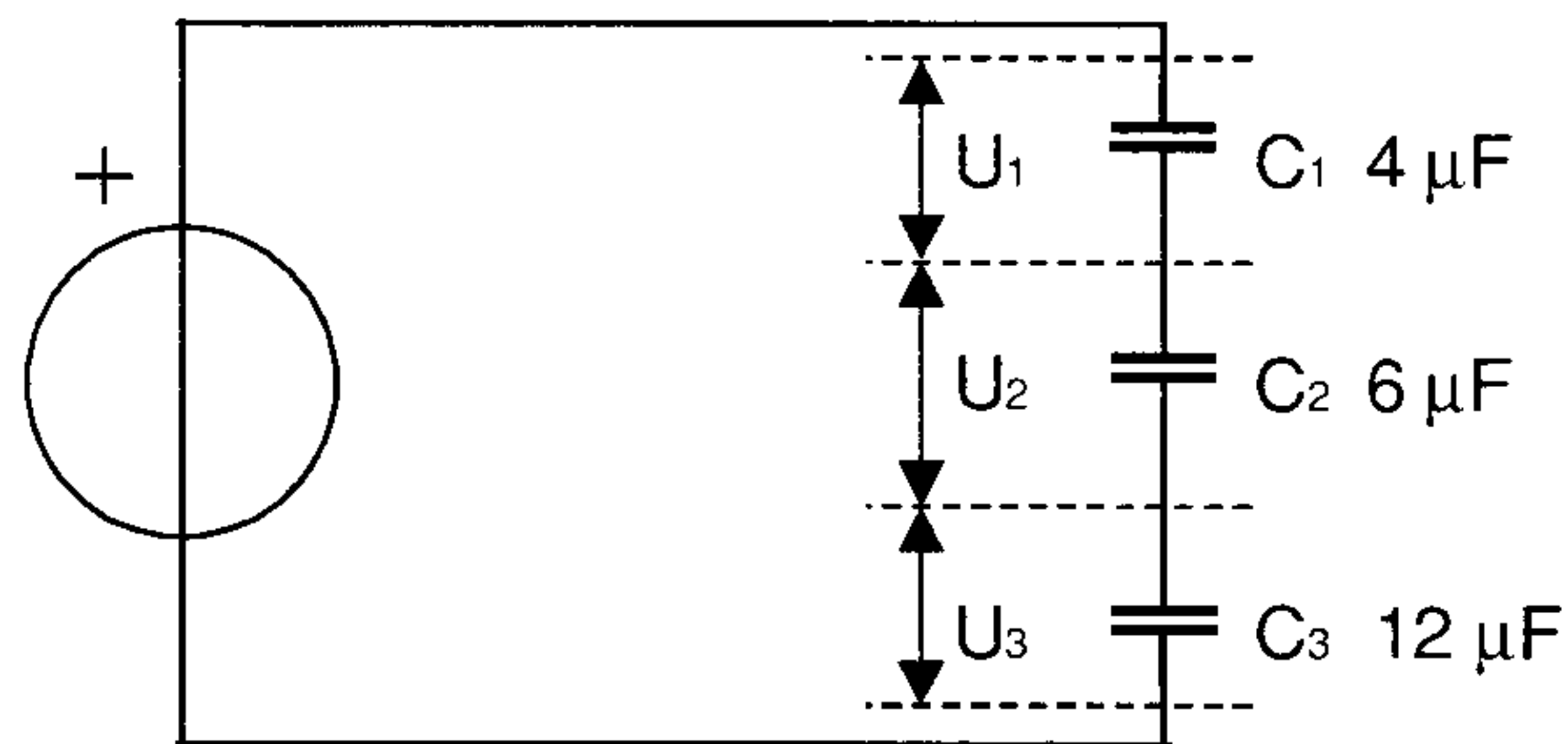
$$\frac{1}{C_{verv}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Ook hier juist andersom als bij weerstanden (weerstand parallel komt overeen met condensatoren serie).



*Figuur 3.1-5 Serie schakeling van condensatoren*

We moeten er goed op letten dat we bij berekeningen altijd dezelfde eenheden gebruiken. Alles bijv. in mF of alles in pF.



Figuur 3.1-6 Serie schakeling van condensatoren

### Vervangende capaciteit

In figuur 3.1-6:

$$\frac{1}{C_{\text{verv}}} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{12} \text{ of } \frac{3}{12} + \frac{2}{12} + \frac{1}{12} = \frac{6}{12}$$

$$\text{Dus } C_{\text{verv}} = \frac{12}{6} = 2 \mu\text{F}$$

Bij serieschakeling wordt de aangelegde spanning verdeeld over de condensatoren, maar pas op want de ladingen zijn gelijk dus de kleinste condensator heeft het grootste deel van de spanning. Wanneer over de schakeling 300 V staat verdeelt de spanning zich in omgekeerde verhouding over de condensatoren:

$$U_{c1} : U_{c2} : U_{c3} = 3 : 2 : 1$$

$$\text{Over } C_1 \text{ staat dan } \frac{3}{6} = 0,5 \cdot 300 \text{ V} = 150 \text{ V}$$

$$\text{terwijl over } C_2 \frac{2}{6} = 100 \text{ V} \text{ en over } C_3 \frac{1}{6} = 50 \text{ V} \text{ staat.}$$

We kunnen dit ook berekenen met de formule

$$Q_{\text{tot}} = C_{\text{verv}} \cdot U = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ coulomb}$$

Deze lading staat over elke C waaruit volgt:

$$U_{c1} = \frac{Q}{C_1} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^2 = 150 \text{ V}$$

$$U_{c2} = \frac{Q}{C_2} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^2 = 100 \text{ V}$$



$$U_{c3} = \frac{Q}{C_3} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \cdot 10^2 = 50V$$

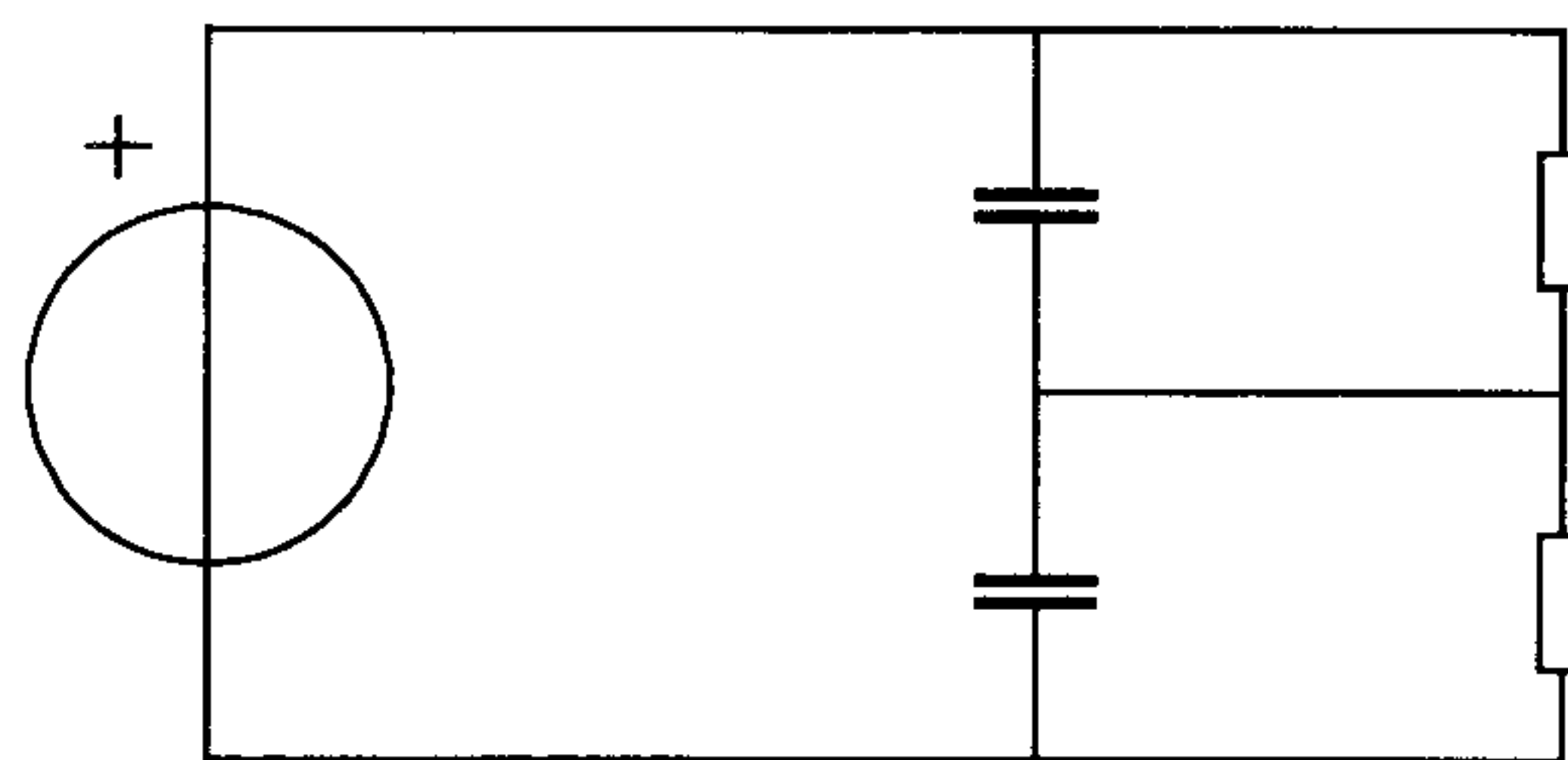
Wanneer de toegepaste spanning te groot is voor een condensator, kunnen we er meer in serie schakelen. Hiermede wordt de totaalcapaciteit verminderd maar de totaal toe te passen spanning is hoger dan de doorslagspanning van elk der condensatoren. Nogmaals: de kleinste capaciteit krijgt de hoogste spanning zoals uit de formule  $Q = C \cdot U$  volgt. De doorslagspanning van twee gelijke condensatoren in serie geschakeld is gelijk aan de dubbele doorslagspanning van elk der condensatoren.

### Lekstroom

In al onze voorbeelden hebben we het diëlectricum als ideaal beschouwd. Dat wil zeggen met een oneindig hoge weerstand. In werkelijkheid heeft elk diëlectricum een weerstand waardoorheen een lekstroom vloeit.

### Isolatiweerstand

Bij goede keramische of mica condensatoren is de isolatiweerstand circa 200 à 500 MΩ, bij papiercondensatoren 5 à 10 MΩ en bij electrolytische condensatoren vaak minder dan 1 MΩ. Door deze isolatiweerstand lekt de lading weg. Een goede condensator behoudt zijn lading dus langer dan een slechte. Bij het serieschakelen moeten we met deze isolatiweerstand rekening houden. Volgens de Wet van Ohm komt aan elke condensator tengevolge van het isolatielek een spanning te staan van  $U = I \cdot R$ . Hoe groter de isolatiweerstand, hoe groter de spanning over deze weerstand. Zijn de isolatiwestanden niet gelijk dan zal de spanning over de condensator met de hoogste isolatiweerstand bij gelijke capaciteiten de hoogste zijn. Deze zal dus het eerste doorslaan. Dan krijgt de andere condensator de hoogste spanning en slaat ook door. Om dat doorslaan te voorkomen verdelen we de spanning over de condensatoren door weerstanden van 1 à 2 MΩ parallel aan elke seriegeschakelde condensator te plaatsen. Daarmede wordt de spanning nagenoeg gelijk verdeeld over de condensatoren (zie figuur 3.1-7).



Figuur 3.1-7 Serie geschakelde condensatoren met lekweerstand

### Diëlectrische verliezen

De lading van een condensator vertoont de neiging in het diëlectricum achter te willen blijven, een soort traagheids verschijnsel. Dit is als volgt te demonstreren: We nemen een olie- of papiercondensator van 2 à 4 μF en laden deze op met een spanning van tussen de 100 en 250 V. Wanneer we de

condensator even kortsluiten springt er een vonk over. Dat is de ontlading. Na verwijderen van de kortsluiting, springt er bij hernieuwde kortsluiting nog een vonk over. Bij de eerste ontlading bleek een deel van de lading te zijn achter gebleven. Op plaatsen waar condensatoren worden gebruikt voor snelle lading en ontlading, zoals in hoogfrequent kringen, verdient daarom het gebruik van lucht, mica of keramische condensatoren aanbeveling. De diëlectrische verliezen zijn minder dan van olie-, papier- of electrolytische condensatoren.

### 3.3 Magnetisme en inductie

#### Inleiding

Magnetisme en elektriciteit zijn nauw met elkaar verwant. In een dynamo of een elektromotor bijvoorbeeld zitten magneten. Een zendantenne veroorzaakt een z.g. elektromagnetisch veld. Dat is, gelet op de naam, iets dat met zowel elektriciteit als magnetisme te maken moet hebben. Verderop in deze cursus zullen we nader ingaan op de aard ervan. In deze paragraaf zullen we kennis maken met de belangrijkste eigenschappen van magneten en de verbinding met de elektriciteit leggen.

#### Eigenschappen van magneten

Een magneet trekt ijzeren voorwerpen aan. Magnetisme is niet rechtstreeks met de zintuigen waar te nemen. Er is magnetisch gevoelig materiaal voor nodig om de aanwezigheid ervan vast te stellen.

Wanneer we een magneet door een bakje ijzervijlsel of fijne spijkertjes halen, blijkt het meeste materiaal aan de uiteinden vast te plakken. In het midden zit niets of bijna niets. Deze uiteinden noemen we de *polen* van de magneet. Het midden wordt wel de neutrale zone genoemd.

Een magneet heeft altijd twee polen. Als we de polen van twee magneten in elkaars buurt houden, dan trekken ze elkaar aan of ze stoten elkaar met even grote kracht af. Blijkbaar zijn er twee soorten polen, anders zouden ze elkaar niet beurtelings aantrekken en afstoten. Het blijkt nu, dat twee polen van dezelfde soort elkaar afstoten en twee polen van verschillende soort elkaar aantrekken.

Als we een staafvormige magneet vrij draaibaar in het horizontale vlak opstellen, dan blijkt dat de magneet een voorkeur heeft voor één stand. Hierop berust de werking van het kompas. De aarde heeft namelijk zelf een magnetisch veld en is dus op te vatten als een magneet van reusachtige omvang. De polen van de aardmagneet liggen in de buurt van (niet op) de noord- en zuidpool. De voorkeursstand van een vrij opgehangen magneet is dus ongeveer noord-zuid. De pool die naar het noorden wijst noemen we de noordpool, de pool die naar het zuiden wijst de zuidpool. Om de zaken ingewikkeld te maken: de magnetische noordpool van de aarde is dus een zuidpool en de magnetische zuidpool van de aarde een noordpool!

IJzer is niet het enige materiaal met magnetische eigenschappen. Ook de metalen nikkel en kobalt hebben zulke eigenschappen, evenals sommige ijzeroxyden (verbindingen van ijzer en zuurstof). Deze komen ook in de

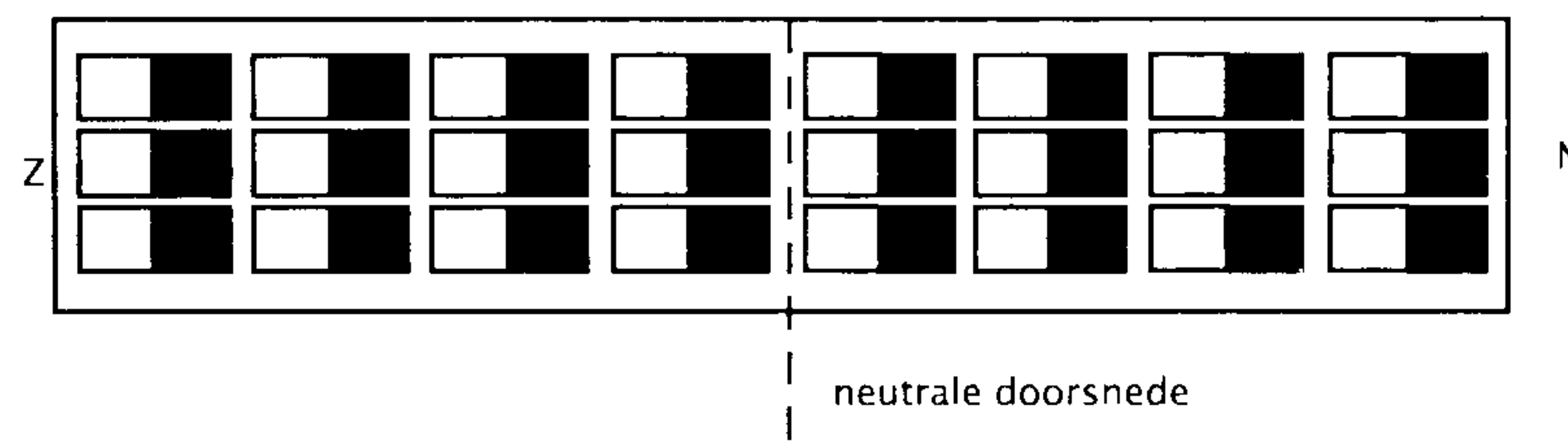
natuur voor in de vorm van het mineraal magnetiet. Het wordt o.a. gevonden in Siberië in de omgeving van de stad Magnitogorsk. Verder zijn er kunstmatige (keramische) stoffen met magnetische eigenschappen, z.g. Ferrieten. Doorgaans bevatten ze ijzeroxyden. Ferrieten worden in de elektronica veel toegepast. In dit hoofdstuk zullen we het echter verder alleen over ijzer hebben.

### Hypothesen van Weber

Wanneer we een magneet in twee stukken breken, dan blijken beide stukken magneten te zijn met elk een noord- en een zuidpool. Het is dus niet zo dat we van een magneet de noordpool af kunnen halen om de zuidpool over te houden (of omgekeerd). Een magneetpool gaat altijd vergezeld van zijn tegenpool. Als we door zouden gaan met het in stukken breken van een magneet zouden er steeds meer en steeds kleinere magneetjes ontstaan. Tenslotte komen we uit bij ijzeratomen en als we die zouden splitsen (gesteld dat we dat zouden kunnen), dan hebben we geen ijzer meer en dus ook geen magneetjes. De kleinst mogelijke magneetjes noemen we elementair-magneetjes. De eerste hypothese (= veronderstelling) van Weber luidt:

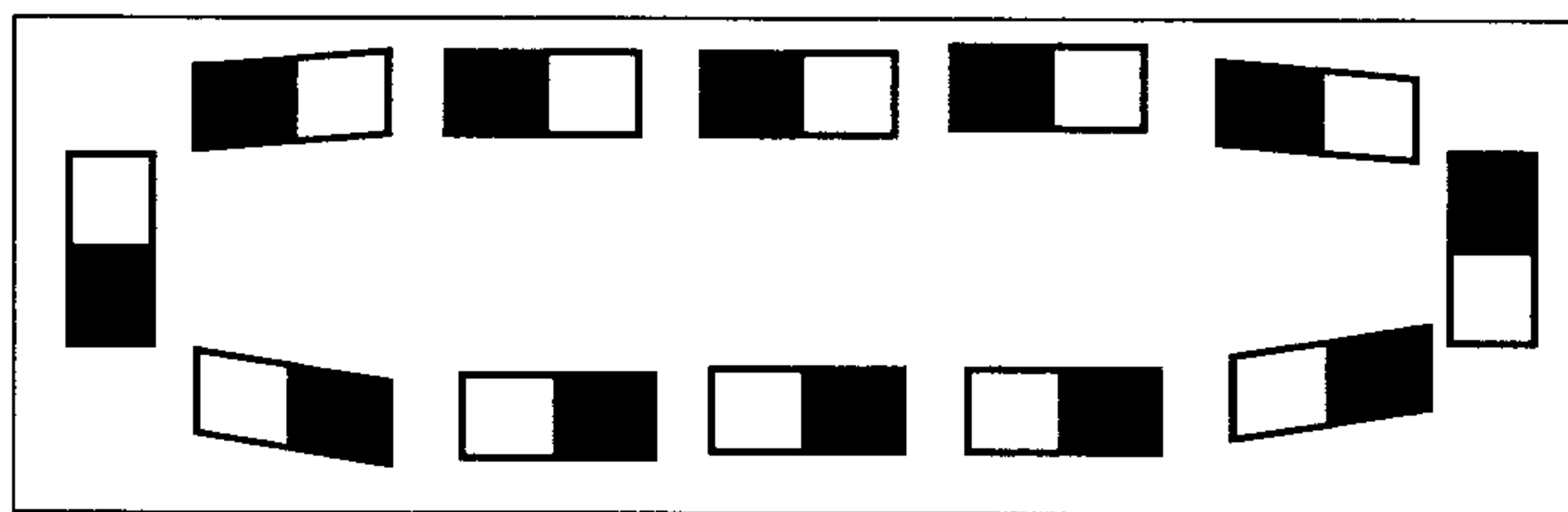
*Iedere magneet is opgebouwd uit een zeer groot aantal elementair-magneetjes die volgens de as van de magneet gericht zijn.*

Met andere woorden: in een magneet liggen de elementair-magneetjes kop aan staart in lange rijen. Aan de uiteinden ligt dan een aantal gelijknamige pooltjes naast elkaar, waardoor de magneet daar een noord- of zuidpool heeft (figuur 3.2-1).



*Figuur 3.2-1 Magnetisch ijzer*

Nu is niet ieder stuk ijzer magnetisch. Toch moet ook niet-magnetisch ijzer elementair-magneetjes bevatten, want ijzeratomen zijn elementair-magneetjes. Verondersteld wordt dat in niet magnetisch staal of ijzer de elementair-magneetjes niet in rijen maar in ringen liggen (figuur 3.2-2), zodat alle polen



*Figuur 3.2-2 Niet Magnetisch ijzer*

geneutraliseerd worden door hun tegenpolen. De tweede hypothese van Weber luidt daarom:

*In niet-magnetisch ijzer liggen de elementair-magneetjes in gesloten banen.*

Het is mogelijk een niet-magnetisch stuk ijzer magnetisch te maken. Men kan bijvoorbeeld met een magneet over het oppervlak in één richting strijken. Daardoor worden de gesloten banen verbroken en de rijen elementair-magneetjes, althans voor een deel, gericht. Vaak verdwijnt dat kunstmatig aangebrachte magnetisme na verloop van kortere of langere tijd, soms ook niet of nauwelijks. Dat hangt af van het soort materiaal.

In z.g. weekijzer is ingebracht magnetisme vrijwel ogenblikkelijk weer verdwenen, in staal duurt dat veel langer. Dit wordt toegeschreven aan de draaibaarheid van de elementair-magneetjes. De derde hypothese van Weber luidt daarom:

*In weekijzer zijn de elementair-magneetjes gemakkelijk draaibaar en in staal moeilijk draaibaar.*

Het magnetisme dat overblijft na kunstmatige magnetisering noemt men remanent magnetisme. Om dit remanent magnetisme weer ongedaan te maken is een magnetische tegenkracht nodig. Deze wordt aangeduid met de term coërcitiefkracht.

### **Magnetisch veld**

Een magneet heeft een magnetisch veld. Je zou dit ook kunnen omschrijven als invloedssfeer. Het woord veld is echter gebruikelijk. Het veld manifesteert zich door de beïnvloeding op afstand, bijvoorbeeld als we een kompas in de buurt van een magneet brengen. De kompasnaald zal dan onder invloed van de magneet van stand veranderen. Op grote afstand van de magneet is het veld zwakker dan dichtbij. Het veld heeft dus een sterkte die plaats afhankelijk is.

### **Veldlijnen**

Behalve een plaats afhankelijke sterkte heeft het veld ook een plaats afhankelijke richting, want de richting van de kompasnaald verandert als we de magneet (of de kompasnaald) verplaatsen. Een magnetisch veld heeft dus



een sterkte en een richting die beide afhangen van de plaats ten opzichte van de magneet.

We zouden nu een denkbeeldige losse noordpool bij de noordpool van de magneet kunnen loslaten. Het zal zich dan van de noordpool vandaan bewegen. Waar de losse pool zich vervolgens ook bevindt, zijn verplaatsingsrichting zal steeds worden bepaald door de richting van het magneetveld ter plaatse. Uiteindelijk zal het uiteraard op de zuidpool van de magneet belanden. De baan die de denkbeeldige losse pool beschrijft heet een veldlijn.

Een veldlijn is eigenlijk een stroomlijn: de denkbeeldige noordpool uit ons voorbeeld stroomt langs een veldlijn van de noord- naar de zuidpool. We kunnen ons ook een heleboel noordpolen indenken die gelijktijdig bij de noordpool van de magneet worden losgelaten. We zouden dan zien dat ze allemaal verschillende banen naar de zuidpool volgen. Veel zullen een korte weg volgen, weinig komen via een wijde boog op de zuidpool terecht. Al deze banen zijn veldlijnen. Het zal duidelijk zijn dat een magneet een oneindig aantal veldlijnen heeft.

Het patroon van de veldlijnen van een magneet kan zichtbaar worden gemaakt door ijzervijlsel uit te strooien op een blad papier en er een magneet onder te houden. De ijzerdeeltjes raken gemagnetiseerd en gaan, zonodig geholpen door tegen het papier te tikken, noordpool aan zuidpool liggen in een patroon dat enigszins dat van de veldlijnen benadert.

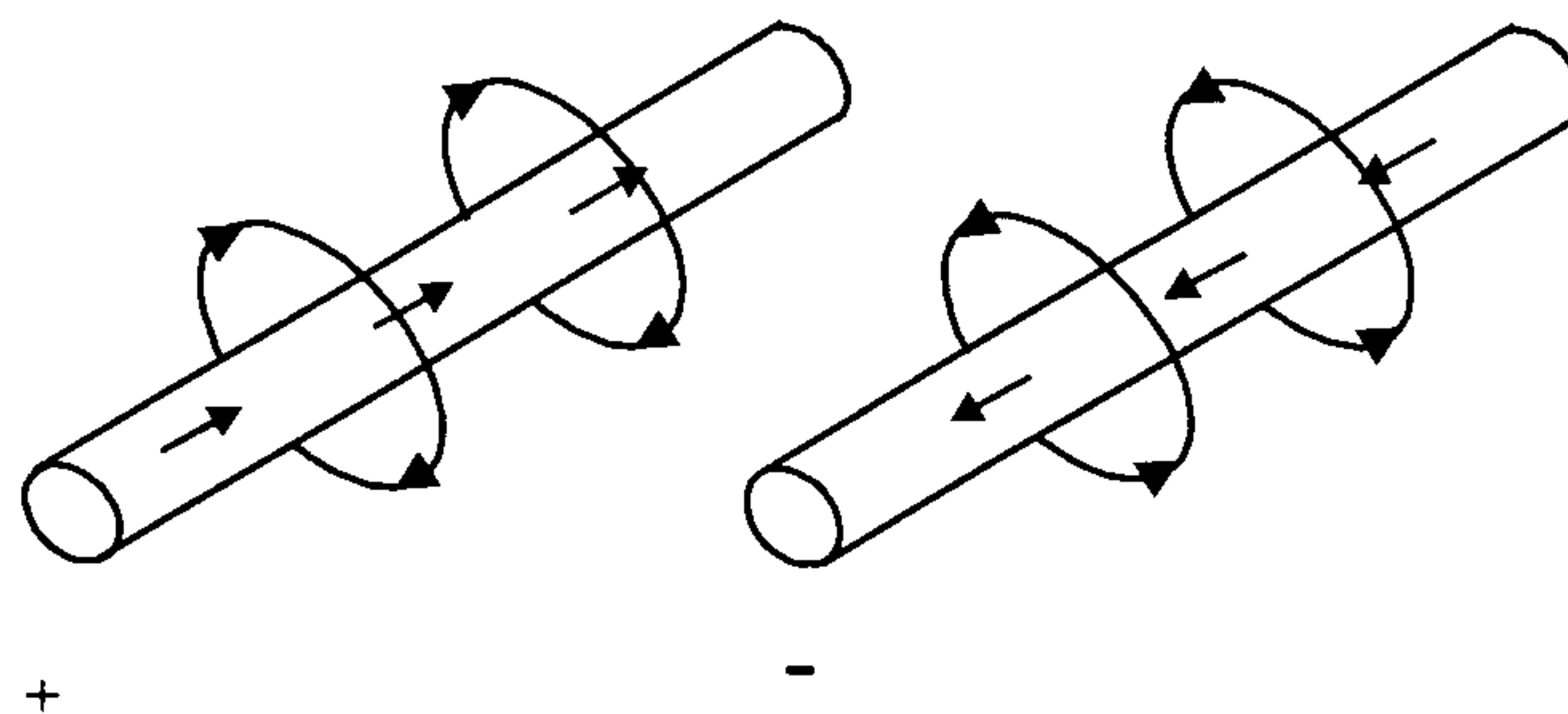
De richting van de veldlijnen buiten een magneet is volgens afspraak die, waarin een losse noordpool zich zou bewegen, dus van noord- naar zuidpool. In een magneet lopen ze net andersom: van zuidpool naar noordpool. Hoewel het aantal veldlijnen van een magneet oneindig is, wordt toch vaak van veldlijndichtheid gesproken als de sterkte van het magnetisch veld op een bepaalde plaats wordt bedoeld. Deze veldsterkte is bij de polen het grootst. Magnetische veldsterkte wordt uitgedrukt in ampère/meter (A/m) en meestal aangeduid met de hoofdletter  $H$ . De grootte die de totale sterkte van een magneet aangeeft is de magnetische flux, uitgedrukt in Weber (Wb).

### **Magnetische inductie**

Een derde grootte is magnetische inductie. Deze kan men zich het best voorstellen als het aantal veldlijnen dat door een eenheid van oppervlakte gaat, loodrecht op de richting van het veld. Waar het veld zwak is, is de magnetische inductie klein, waar het veld sterk is, is de magnetische inductie groot. Magnetische inductie wordt uitgedrukt in  $\text{Wb/m}^2$ . Voor het examen is het niet nodig deze drie grootheden in detail te begrijpen. Wel wordt kennis gevraagd van het begrip magnetische veldsterkte en dus ook van het feit dat een magnetisch veld een plaats afhankelijke veldsterkte en richting heeft.

### Elektromagnetisme

Een elektrische stroom veroorzaakt een magnetisch veld. De door een stroom veroorzaakte flux is in grootte evenredig met de stroomsterkte. Als we de stroom 2 maal zo groot maken, wordt dus ook de magnetische flux 2 maal zo groot. Dit geldt uiteraard ook voor de magnetische veldsterkte. De richting van het veld verandert er echter niet door. De veldlijnen van een veld om een geleider zijn cirkelvormig. De geleider bevindt zich in het middelpunt van die cirkels. De richting van de veldlijnen, dus de verplaatsingsrichting van een denkbeeldige noordpool, is met de klok mee als we met de stroomrichting mee (stroomafwaarts) kijken en tegen de klok in als we tegen de stroomrichting in (stroomopwaarts) kijken (figuur 3.2-4).



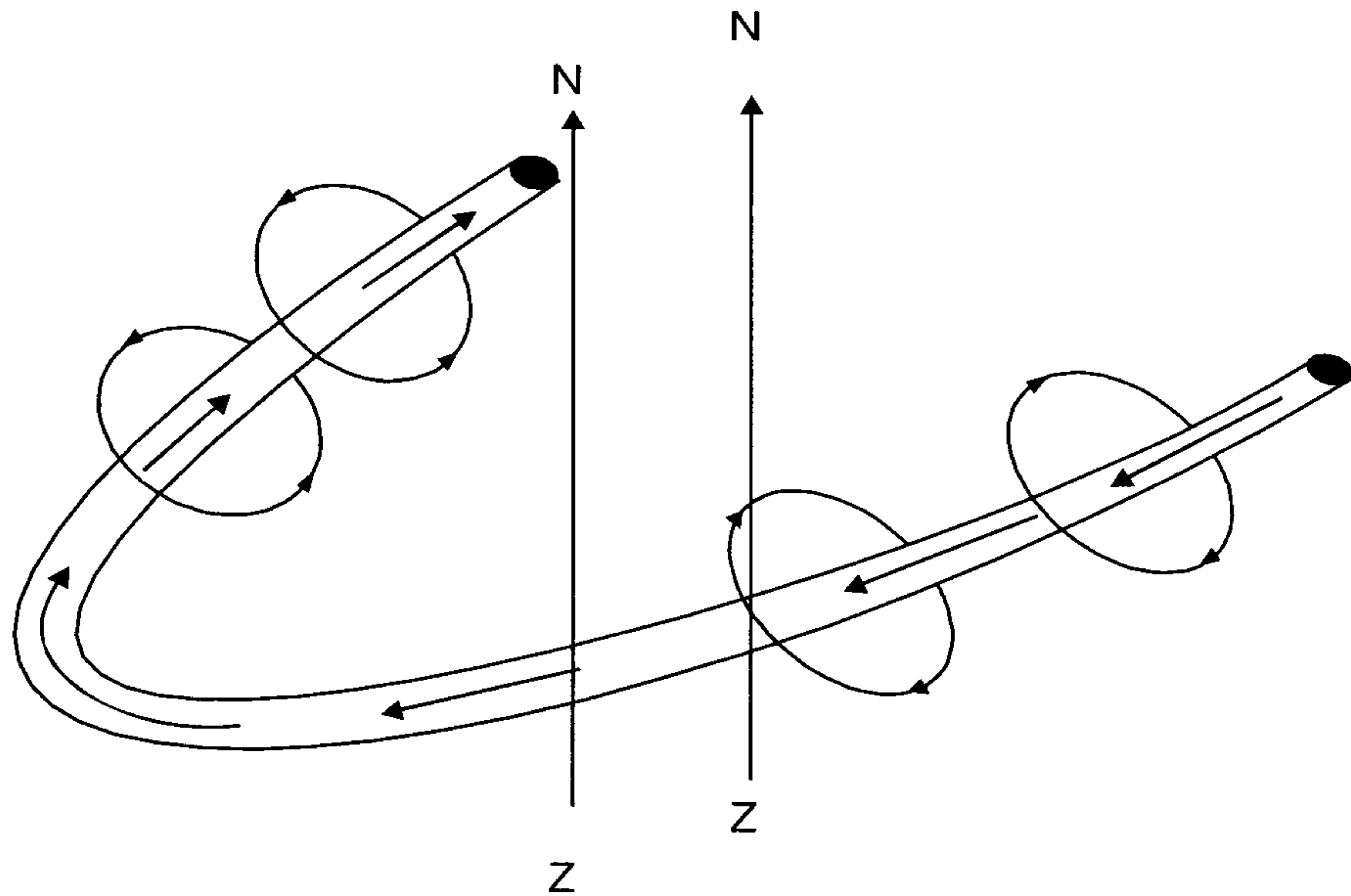
Figuur 3.2-4 Het magnetisch veld om een stroomgeleider

Behalve met pijlen is in figuur 3.2-4 de stroomrichting (van plus naar min!) ook aangegeven op de doorsnede van de draad. Van de waarnemer af is aangegeven met een '+' en naar de waarnemer toe met een '-'. We zullen deze wijze van aangeven van de stroomrichting ook bij verdere illustraties gebruiken.

### 3.4 Spoelen

Leggen we de geleider van figuur 3.2-4 in een lus, dan gebeurt er iets bijzonders. Binnen de lus is de richting van de veldlijnen één kant op en buiten de lus lopen de lijnen in tegengestelde richting (figuur 3.2-5).

Dat is dus precies als bij een magneet. We kunnen de lus daarom opvatten als een soort elementair-magneet. Als we een aantal van zulke lussen achter elkaar leggen in de vorm van een spoel, dan hebben we een rij elementair-magneetjes en dus een magneet (figuur 3.2-6). Bij uitschakelen van de stroom verdwijnt uiteraard het magnetisme. Binnen een spoel is de magnetische veldsterkte overal nagenoeg gelijk (erbuiten uiteraard niet). Bepalend voor de veldsterkte in de spoel zijn de stroomsterkte en het aantal windingen. Hoe groter de stroom en hoe meer windingen, des te groter is de veldsterkte. Het produkt van beide noemt men het aantal ampèrewindingen (AW). Een spoel van 100 windingen, waar 0,3 A doorheen loopt, heeft dan 30 AW.



Figuur 3.2-5 Het magnetisch veld in een spoel.

### Kurkentrekkerregel

De richting van het veld in een spoel is te beredeneren aan de hand van de regel die we eerder gaven voor de richting van de veldlijnen om een stroomvoerende geleider. Een gemakkelijker ezelsbruggetje is de kurkentrekkerregel: draai een kurkentrekker rond in de richting waarin de stroom door de spoel loopt. De verplaatsingsrichting van de kurkentrekker is dan dezelfde als de richting van de veldlijnen binnen de spoel (figuur 3.2-6). De kurkentrekker verplaatst zich onder de gegeven omstandigheden dus in de richting van de noordpool.

### Permeabiliteit

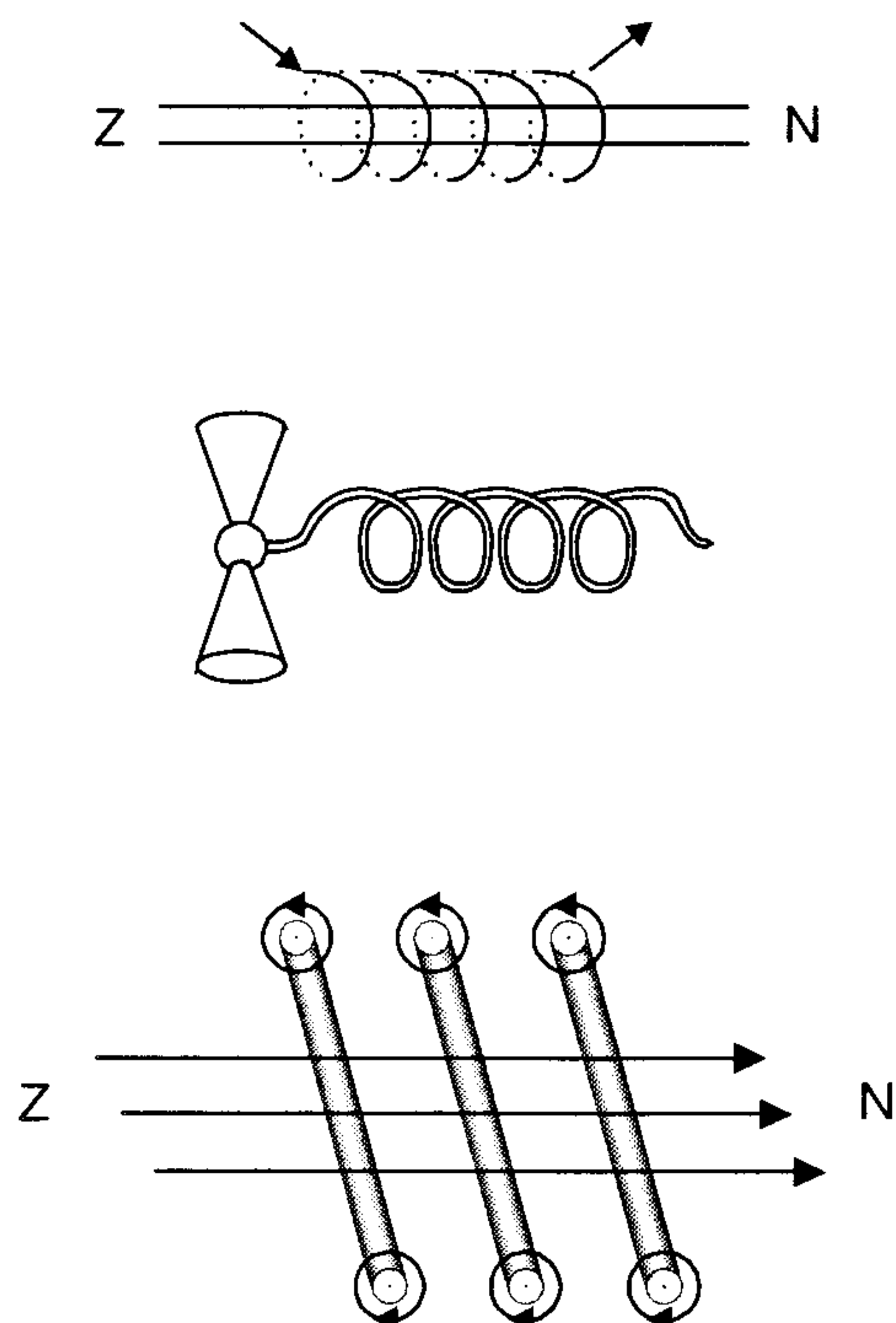
In het voorgaande hebben we kennisgemaakt met de veldsterkte  $H$  en de magnetische inductie  $B$ . De veldsterkte hangt af van het aantal ampère-windingen van de spoel. De inductie hangt af van  $H$  en van het materiaal dat de spoel omgeeft. Tussen  $B$  en  $H$  bestaat de volgende betrekking:

$$B = \mu \cdot H$$

De evenredigheidsfactor  $\mu$  (spreek uit mu) noemen we de magnetische permeabiliteit van het gebruikte materiaal. De spoel uit figuur 3.2-6 is geheel omgeven met lucht of vacuüm, dat is in magnetisch opzicht hetzelfde. De permeabiliteit van vacuüm geven we aan met het symbool  $\mu_0$ . Door de spoel sturen we een bepaalde stroom, waardoor een betrekkelijk kleine inductie ontstaat, zeg  $0,01 \text{ Wb/m}^2$ . Vervolgens omsluiten we de spoel geheel met ijzer (ook van binnen). We noemen dat een gesloten magnetisch circuit. We zullen nu merken dat de inductie veel groter is geworden, zeg  $1 \text{ Wb/m}^2$ . Kennelijk is de permeabiliteit van ijzer 100 maal groter dan die van vacuüm. Het is gebruikelijk om de factor  $\mu$  te splitsen in twee factoren, nl.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$





Figuur 3.2-6 De werking van de kurkentrekker regel.

Hierin stelt  $\mu_r$  de relatieve permeabiliteit van het magnetische materiaal t.o.v. vacuüm voor ( $\mu_r$  vacuüm = 1). In dit voorbeeld geldt dus:  $\mu_r = 100$ . De toename van de inductie wordt veroorzaakt door de elementaire magneetjes in het ijzer, die door de veldsterkte worden gericht en zodoende de inductie versterken.

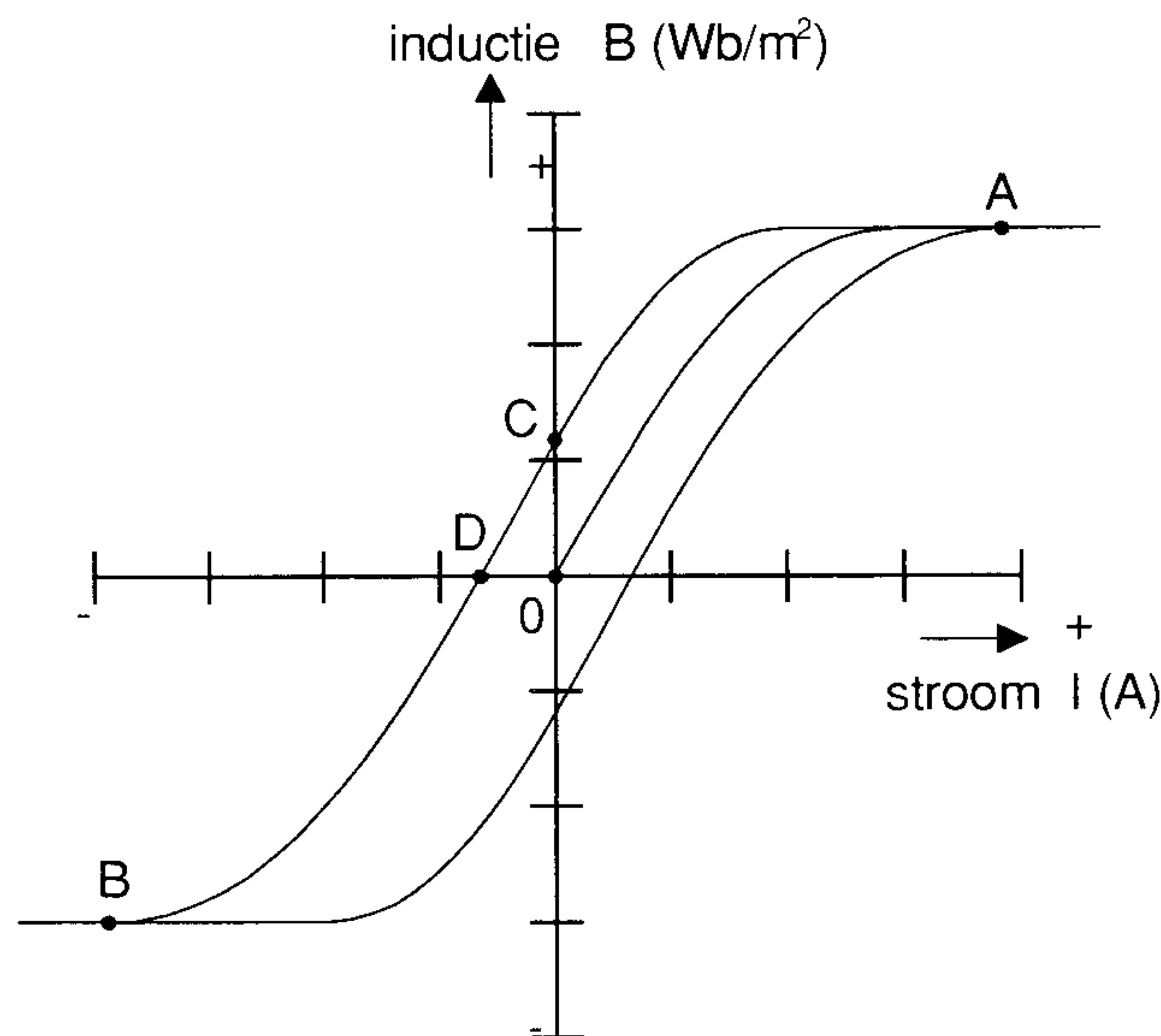
### Verzadiging

Als we de stroom door onze met ijzer gevulde spoel geleidelijk groter maken, neemt de inductie aanvankelijk vrijwel evenredig toe. Dat is te zien in figuur 3.2-7 (we beginnen in punt 0). Naarmate er meer elementaire magneetjes gericht zijn, wordt het moeilijker om de resterende magneetjes ook te richten. De toename van de inductie (dus niet de grootte) wordt op den duur steeds kleiner. Dit betekent dat  $\mu_r$ , die aanvankelijk 100 was, steeds kleiner wordt. In het extreme geval dat alle magneetjes gericht zijn, is  $\mu_r$  teruggelopen tot 1. In figuur 3.2-7 is dat het geval in punt A. We zeggen dan: het magnetisch materiaal (de kern) is verzadigd.

### Hysteresis

Stuurt men door een spoel met kern een stroom, waarvan de richting voortdurend verandert (een wisselstroom), dan doet zich een opmerkelijk verschijnsel voor (zie figuur 3.2-7). Laten we uitgaan van een begintoestand, waarin zowel stroom als inductie 0 zijn. Op de horizontale as staat de stroomsterkte  $I$ , op de verticale as de inductie  $B$ . Ons beginpunt ligt dus in het snijpunt van de beide assen, punt 0.





Figuur 3.2-7 Verzadiging en hysteresis

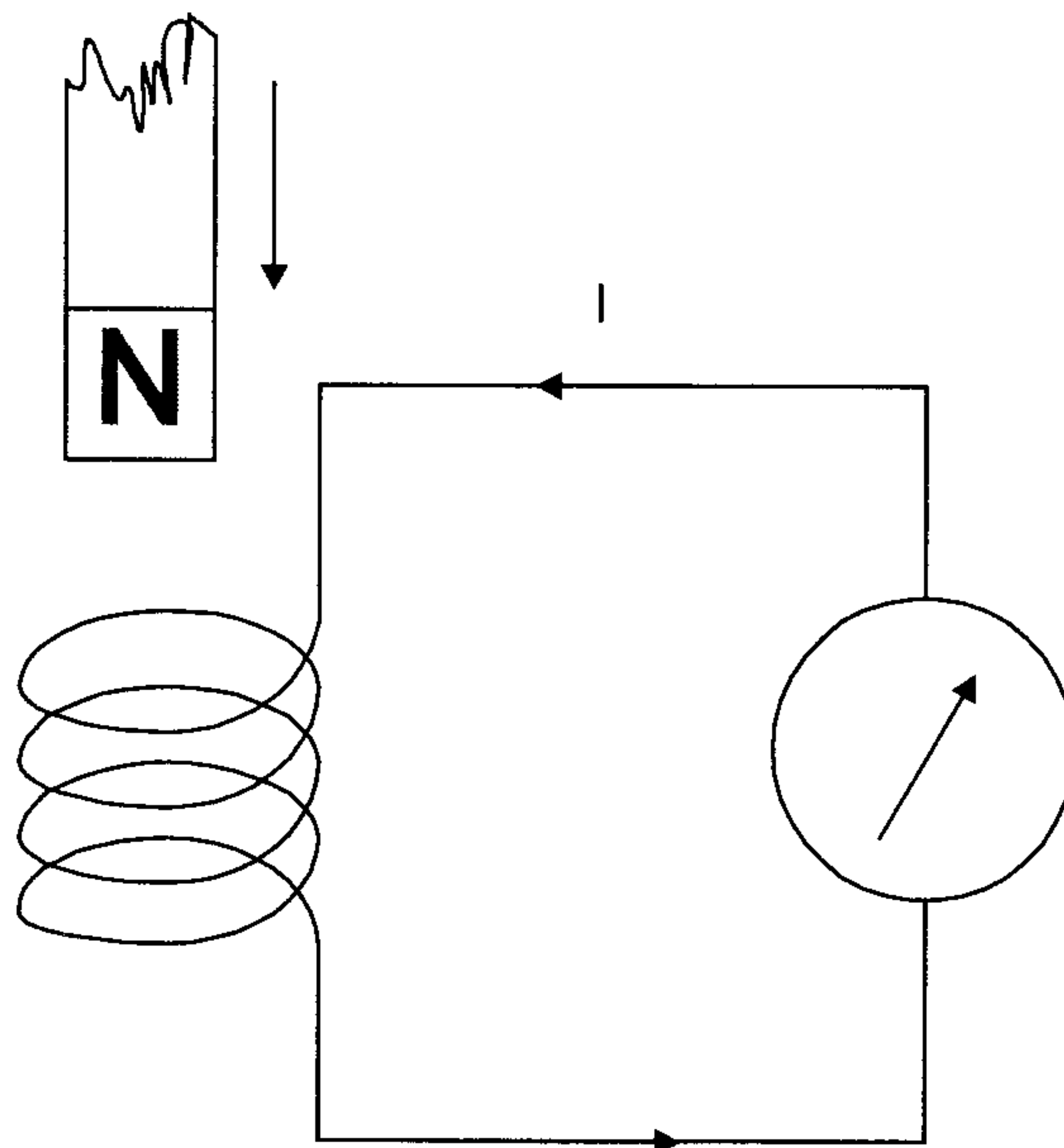
We laten nu de stroom geleidelijk toenemen. De magnetische inductie in de spoel neemt dan eveneens toe (curve 0A). Als de kern in verzadiging raakt (de verzadiging treedt niet plotseling, maar geleidelijk in), dan neemt met toenemende stroom de inductie nog maar weinig toe en de curve verloopt daardoor veel minder steil. Nu laten we de stroom weer afnemen tot 0 en vervolgens toenemen in tegengestelde richting. We zien dan dat de curve die de inductie aangeeft niet door punt 0 gaat, maar door punt C. Dit is het gevolg van remanent magnetisme in de kern: als de stroom weer 0 is, is er nog steeds een magnetische inductie. De grootte van deze overblijvende inductie wordt aangegeven door de lengte van 0C. Laten we nu de stroom in tegengestelde richting toenemen, dan zal het oorspronkelijke magnetische veld geen stand kunnen houden en de richting van het veld keert om tot opnieuw verzadiging optreedt (punt B in de grafiek).

Wanneer we nu hetzelfde spelletje in omgekeerde richting herhalen, dan zal bij een stroomsterkte 0 opnieuw een veld aanwezig zijn als gevolg van remanent magnetisme. Het is alleen andersom gericht. Bij het weer laten toenemen van de stroom in de oorspronkelijke richting komen we uiteindelijk via de onderste curve in de grafiek weer bij A uit. Deze situatie, waarbij een systeem beurtelings van een toestand A in een toestand B wordt gebracht en waarbij de situatie onderweg ervan afhangt of het systeem van A naar B of van B naar A wordt gebracht heet hysteresis. De bijbehorende grafiek van (zie figuur 3.2-7) een hysteresislus. De hysteresis hangt in dit geval samen met het eerder genoemde remanent magnetisme. Hoe sterker het remanente magnetisme, des te wijder wordt de hysteresislus. Met hysteresis in een ijzerkern is energie gemoeid, omdat het ongedaan maken van een magnetisch veld (ook het opbouwen) arbeid inhoudt. De kern wordt er dan ook warm door. Omdat bij elke doorlopen lus die arbeid geleverd moet worden, zal de kern warmer worden naarmate de stroom sneller van richting verandert. Hoe sneller de stroom van richting verandert (hoe hoger de frequentie van de wisselstroom), des te hoger zijn de eisen die we aan de eigenschappen v.w.b. remanent magnetisme moeten stellen bij het

kernmateriaal van spoelen met kernen. Je kunt echter ook gebruik maken van het remanent magnetisme. Het remanent magnetisme van ferriet kernen werd vroeger in computer geheugens gebruikt. Dit waren de zogenaamde ringkern geheugens, of in het Engels 'core-memory'.

### Inductie

We sluiten een galvanometer aan op een spoel. Een galvanometer is een instrument waarmee (zwakke) stromen kunnen worden gemeten. We steken vervolgens een magneet in de spoel (figuur 3.2-8). We zien dan dat de meter even een uitslag vertoont en vervolgens weer op 0 terugvalt. Nemen we de magneet weer uit de spoel, dan zien we opnieuw een uitslag van de meter, maar nu de andere richting uit. De meter slaat niet uit als we in plaats van de magneet een staaf weekijzer gebruiken. Daarmee is aangetoond dat de stroom die de meter deed uitslaan werd veroorzaakt door het veld van de magneet en niet door de aanwezigheid van ijzer.



Figuur 3.2-8 Inductie.

Dit verschijnsel noemen we inductie. Voor het onderscheid met magnetische inductie spreekt men ook wel van elektro-magnetische inductie.

De stroom die in het voorbeeld door het verplaatsen van de magneet werd veroorzaakt heet inductiestroom en de erbij behorende spanning heet inductiespanning. Men zegt ook wel dat de stroom respectievelijk spanning wordt geïnduceerd. In een geleider die zich in een magnetisch veld bevindt, waarvan de sterkte verandert, ontstaat altijd een inductiespanning. Als een rondlopende stroom mogelijk is, zoals in figuur 3.2-8 via de galvanometer, dan ontstaat er ook een stroom.

### De grootte van de inductiespanning, wet van Faraday

De grootte van de inductiespanning (we beperken ons nu even tot de spanning) is afhankelijk van het aantal windingen van de spoel en de snelheid, waarmee de elektrische veldsterkte in de spoel verandert. Hoe sneller de veldsterkte verandert, des te groter is de geïnduceerde spanning.

Als we in het voorbeeld van figuur 3.2-8 de magneet langzaam verplaatsen, dan zal de meter minder ver uitslaan dan wanneer we de magneet snel zouden verplaatsen. Dit is geformuleerd in de wet van Faraday:

*De geïnduceerde spanning is recht evenredig met de snelheid waarmee de magnetische inductie ter plaatse van de geleider verandert.*

Hoe groter het aantal windingen, des te hoger wordt de geïnduceerde spanning. Dat valt gemakkelijk als volgt in te zien.

In iedere winding wordt door de verandering van de magnetische veldsterkte een spanning geïnduceerd. Een winding is daarom op te vatten als een (kleine) spanningsbron. Alle windingen staan in serie. We moeten dus de spanningen van alle windingen optellen om de in de totale spoel geïnduceerde spanning te vinden.

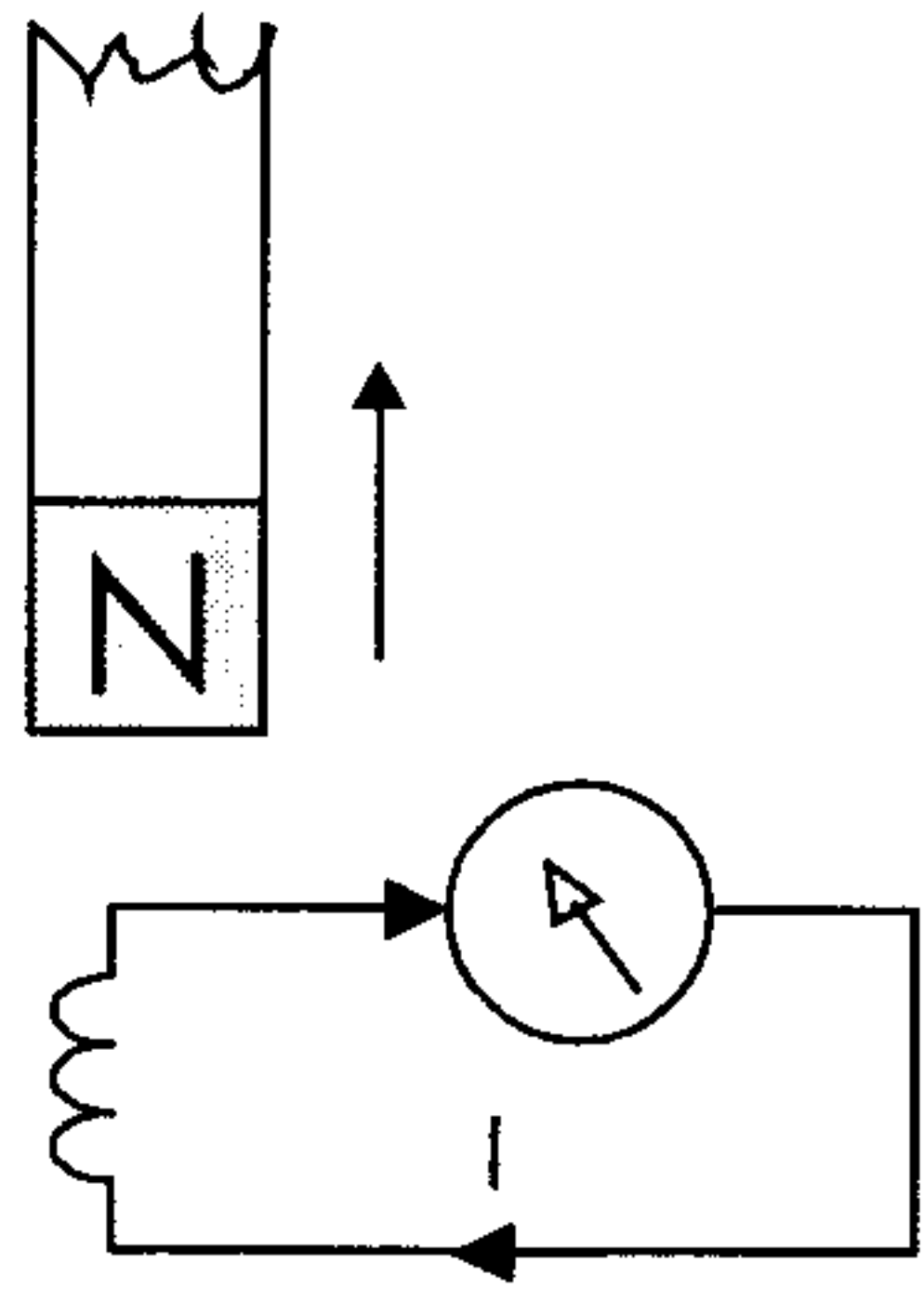
### **De wet van Lenz**

We hebben het nog niet gehad over de richting van de inductiestroom. Die is niet willekeurig. In het voorgaande hebben we gezien dat een stroom in een spoel (of in een geleider van een andere vorm) een magnetisch veld veroorzaakt waarvan de richting afhangt van de richting van de stroom. De geïnduceerde stroom moet dus ook een magnetisch veld veroorzaken. De wet van Lenz zegt nu, dat dit magnetisch veld zo gericht is, dat hij de oorzaak van zijn ontstaan tegenwerkt.

Laten we dit eens bekijken voor figuur 3.2-8. De noordpool van de magneet wordt naar de bovenkant van de spoel gebracht. In het door de magneet in de spoel veroorzaakte veld zal de richting van de veldlijnen van de noordpool af zijn. De stroom in de spoel zal nu zo zijn gericht, dat hij veldlijnen in omgekeerde richting veroorzaakt die (een deel van) de veldlijnen van de magneet ongedaan maken (wet van Lenz). De door deze stroom veroorzaakte veldlijnen in de spoel lopen dus naar de noordpool toe (ga dit na met de kurkentrekkerregel). Omdat in de spoel de richting van de veldlijnen van zuid naar noord is, zorgt de stroom in de spoel voor een noordpool aan de bovenkant van de spoel. De naderende magneet wordt daardoor als het ware teruggeduwd. Met andere woorden er moet arbeid worden verricht om de magneet naar de spoel te verplaatsen. Deze mechanische arbeid wordt omgezet in elektrische arbeid in de vorm van de stroom. Eigenlijk is dit het principe van de dynamo. Halen we de magneet weg, dan treedt het omgekeerde effect op en zal de stroom de andere kant uitlopen. Dit is weergegeven in figuur 3.2-9.

Het is niet nodig bij dit soort zaken uitvoerig de richting van de veldlijnen te beredeneren. Als we ervan uitgaan dat de spoel altijd de verplaatsing van de magneet zal hinderen (niet verhinderen!), is het duidelijk dat bij de nadering van een noordpool tot een uiteinde van een spoel op dat uiteinde een noordpool zal ontstaan en bij de nadering van een zuidpool uiteraard een zuidpool. Bij verwijdering van een noordpool zal evenwel een zuidpool ontstaan, enz. Dichterbij brengen van een noordpool heeft dus hetzelfde effect als verder weg brengen van een zuidpool (en omgekeerd).

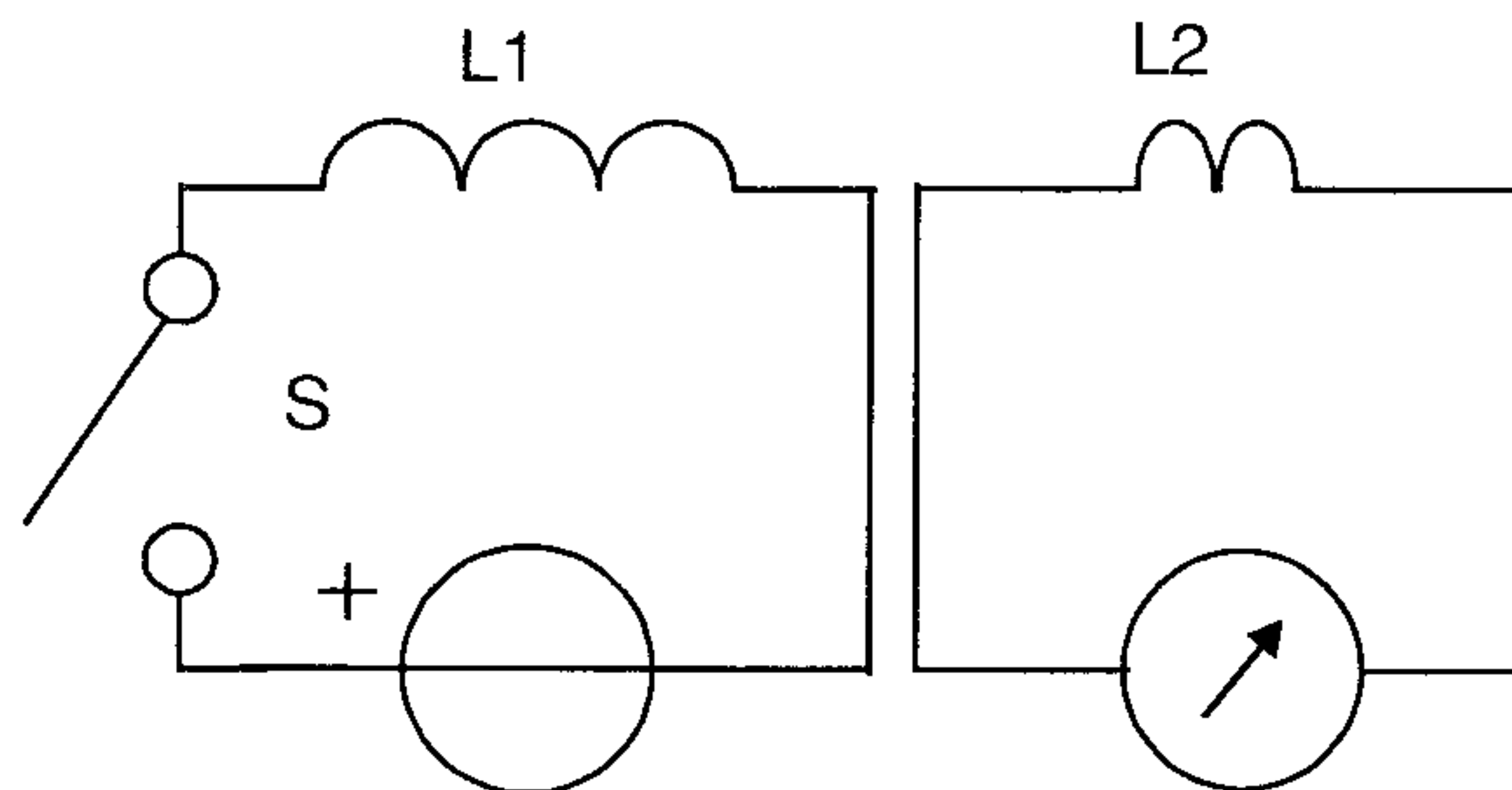




Figuur 3.2-9 Inductie.

### Inductie door een tweede spoel

Om een stroom of spanning in een spoel te induceren hebben we niet beslist een magneet nodig. We kunnen dat magnetische veld ook opwekken met behulp van een tweede spoel. Dit is weergegeven in figuur 3.2-10. Als de schakelaar wordt gesloten, dan zal de batterij in de linkerspoel een stroom veroorzaken (als een schakelaar contact maakt, dan zeggen we dat hij gesloten wordt). Daardoor ontstaat in de rechter spoel een magnetisch veld. Als gevolg daarvan zal in de rechterspoel een stroom gaan lopen in een richting, tegengesteld aan die in de linker. Immers, die stroom moet de oorzaak van zijn ontstaan tegenwerken. Als de stroom in de linker spoel een magnetisch veld veroorzaakt, moet de stroom in de rechter spoel er een in tegengestelde richting veroorzaken. Anders wordt niet voldaan aan de wet van Lenz. Hieruit blijkt dat we in het geval van twee spoelen niet eerst de richting van het magnetisch veld hoeven te beredeneren. We kunnen volstaan met de stroomrichtingen te bekijken!



Figuur 3.2-9 Inductie door een tweede spoel.

Nu lijkt er in figuur 3.2-10 een foutje te zitten. De stromen zijn dezelfde kant op getekend. Toch zijn er twee gevallen waarin dat kan:

1. de schakelaar S is net geopend in plaats van gesloten;
2. de schakelaar S is zojuist gesloten en de spoelen zijn in tegengestelde richting gewikkeld (de één rechtsom, de ander linksom).



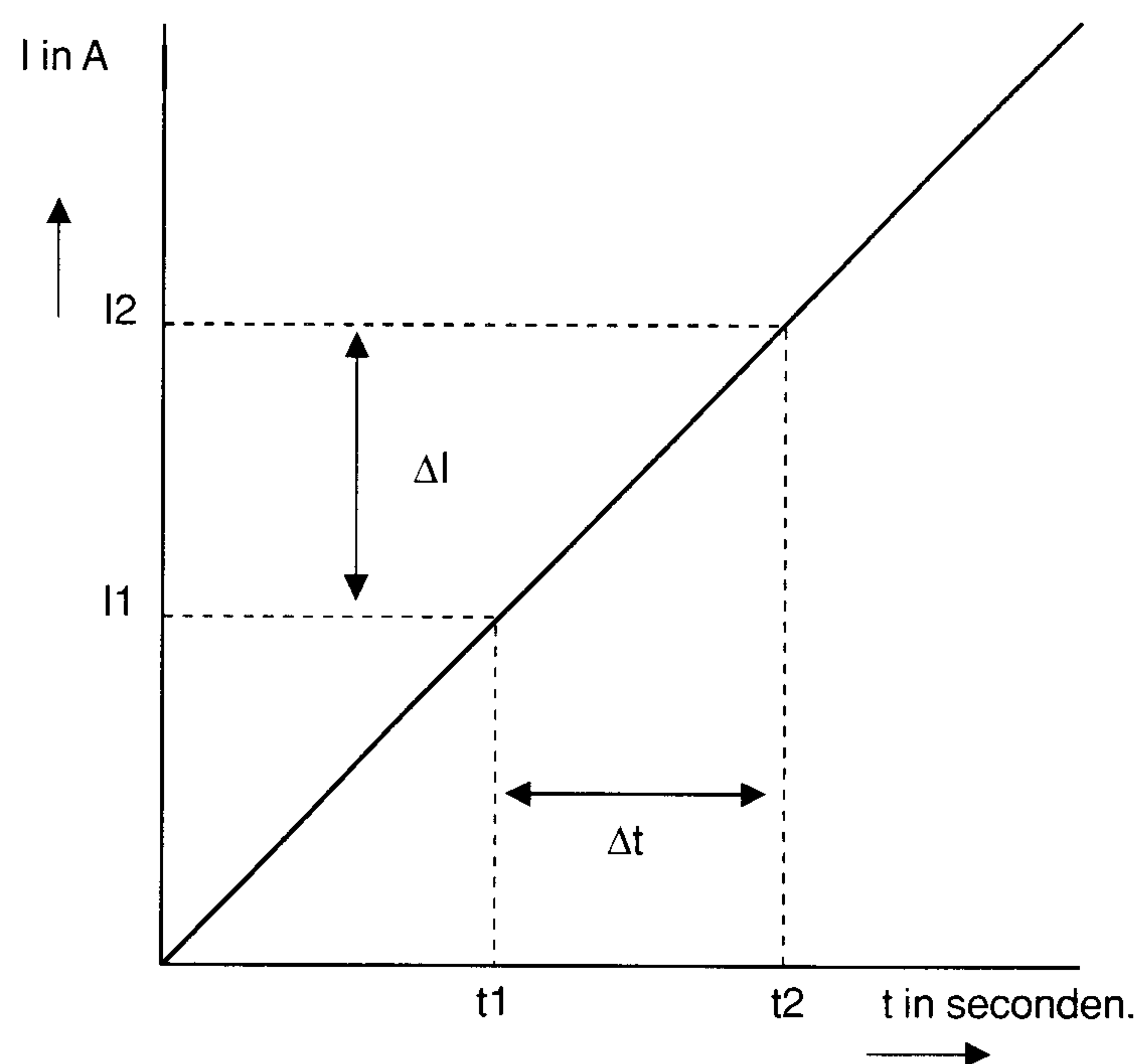
### 3.5 Zelfinductie en tijdconstante

#### Inleiding

In paragraaf 3.3 hebben we kennis gemaakt met het inductieverschijnsel. Een veranderend magnetisch veld veroorzaakt (induceert) een spanning in een spoel wanneer deze (een deel van) een magnetisch veld omvat. Het maakt daarbij niet uit hoe dat magnetisch veld ontstaat. Het kan afkomstig zijn van een bewegende staafmagneet, maar ook van een spoel waardoor een veranderende stroom vloeit (zie figuur 3.2-10). In het laatste geval spreken we van wederkerige inductie. Bij de transformator komen we daar nog op terug. Maar hoe zit het nu met een enkele spoel?

#### Zelfinductie

Wanneer we in figuur 3.2-10 schakelaar S sluiten, gaat er door  $L_1$  een stroom vloeien en ontstaat er dus een veranderend magnetisch veld. Dit veld wekt natuurlijk ook een spanning op. Uit de Wet van Lenz volgt dat deze zelfinductie-spanning de aangelegde spanning tegenwerkt. Daardoor kan de stroom niet meteen op volle sterkte komen.



*Figuur 3.3-1 Zelfinductie*

In figuur 3.3-1 zien we hoe dat in zijn werk gaat. Het blijkt dat de verandering van de stroom ( $I_2 - I_1$ ) recht evenredig is met de verstreken tijd ( $t_2 - t_1$ ) en de aangelegde spanning. De stroomverandering blijkt omgekeerd evenredig te zijn met een constante die afhangt van de constructie van de spoel (aantal windingen, kern etc.) We noemen deze constante de coëfficiënt van zelfinductie ( $L$ ). De eenheid waarin deze coëfficiënt wordt uitgedrukt is de henry, afgekort tot H. De henry is zo gekozen dat een aangelegde spanning van 1 volt in een spoel met een zelfinductie van 1 henry een stroomverandering van 1 ampère per seconde veroorzaakt. De formule voor de stroomverandering luidt aldus:

$$I_2 - I_1 = \frac{U}{L} \cdot (t_2 - t_1)$$

Om de formule wat korter te maken schrijft men i.p.v.  $I_2 - I_1$  meestal  $\Delta I$ , waarbij het delta-teken aangeeft dat men de verandering van  $I$  bedoelt. Evenzo vervangt men  $t_2 - t_1$  door  $\Delta t$ . We krijgen dan:

$$\Delta I = \frac{U}{L} \cdot \Delta t \quad (1)$$

Om de spanning te berekenen welke nodig is om een bepaalde stroomverandering per seconde te verkrijgen schrijven we formule 1 iets anders:

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2)$$

Deze formule stelt de aangelegde spanning voor. De zelfinductiespanning die in de spoel heerst is even groot maar tegengesteld aan de uitwendige spanning. In de formule voor de inductiespanning moet dus voor de letter  $L$  in principe het min-teken worden gezet.

### Het inschakelen

Om een beetje gevoel te krijgen voor de toepassing van deze formules volgen nu twee voorbeelden.

#### Voorbeeld 1

Een spoel heeft een zelfinductie van 3 H.

Bereken de spanning die nodig is om een stroomverandering van 4 A/s te veroorzaken.

Oplossing:

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = 3 \cdot 4 = 12V$$

#### Voorbeeld 2

Een spoel met een  $L$  van 10 H wordt aangesloten op een accu van 12 V.

Bereken de stroomsterkte die 1 minuut na het aansluiten wordt bereikt.

Oplossing :

Op het moment van aansluiten ( $t_1 = 0$ ) geldt

$I_1 = 0$ . In dat geval mogen we de delta's uit formule 1 weglaten, dus:

$$I = \frac{U}{L} \cdot t = \frac{12}{10} \cdot 60 = 72A$$

Naar aanleiding van dit voorbeeld vragen we ons af of de stroom door de spoel ongelimiteerd blijft toenemen wanneer we de verbinding met de accu niet verbreken. Heeft de spoel geen weerstand, dan is dat het geval. In de

praktijk echter heeft de wikkeling van de spoel altijd enige weerstand (zie figuur 3.3-2). Naarmate de stroom toeneemt wordt het spanningsverlies over  $R$  groter en staat er dus minder spanning over de eigenlijke spoel ( $L$ ). Door de kleinere  $U_L$  neemt  $I$  steeds langzamer toe. Figuur 3.3-3 geeft dit grafisch weer.

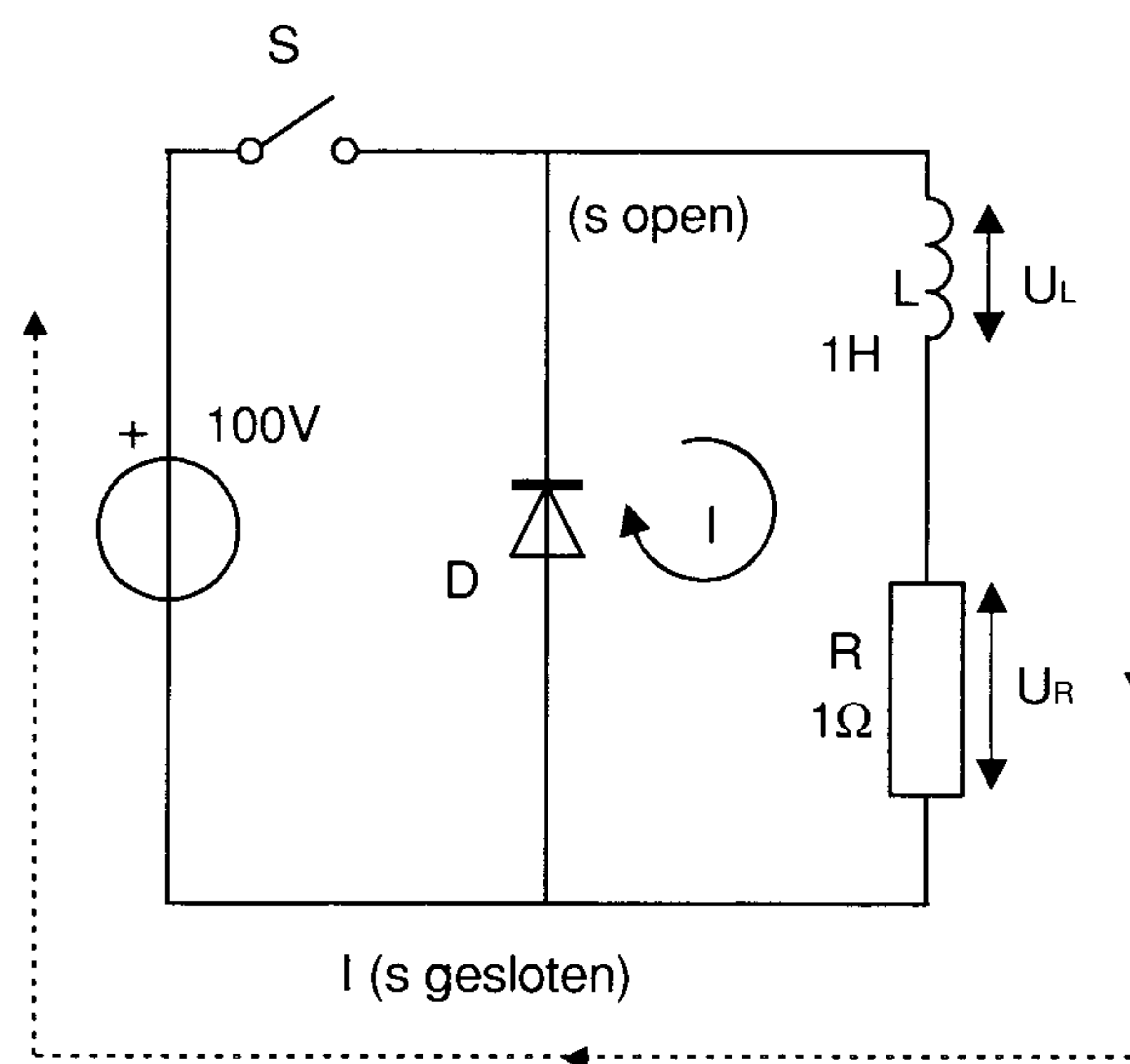
Met een bronspanning van 100 V en een weerstand van 1 Ohm kan  $I$  nooit groter worden dan 100 A. Als de spoel geen weerstand zou hebben, dan was deze waarde reeds na 1 seconde bereikt (zie de schuine lijn a). In werkelijkheid bedraagt de stroom op dat moment slechts 63% van de eindwaarde (hier dus 63 A). In de volgende seconde wordt van het resterende traject van 37 A weer 63% afgelegd. De stroom is dan

$$63 + 37 \cdot 0,63 = 86 \text{ A.}$$

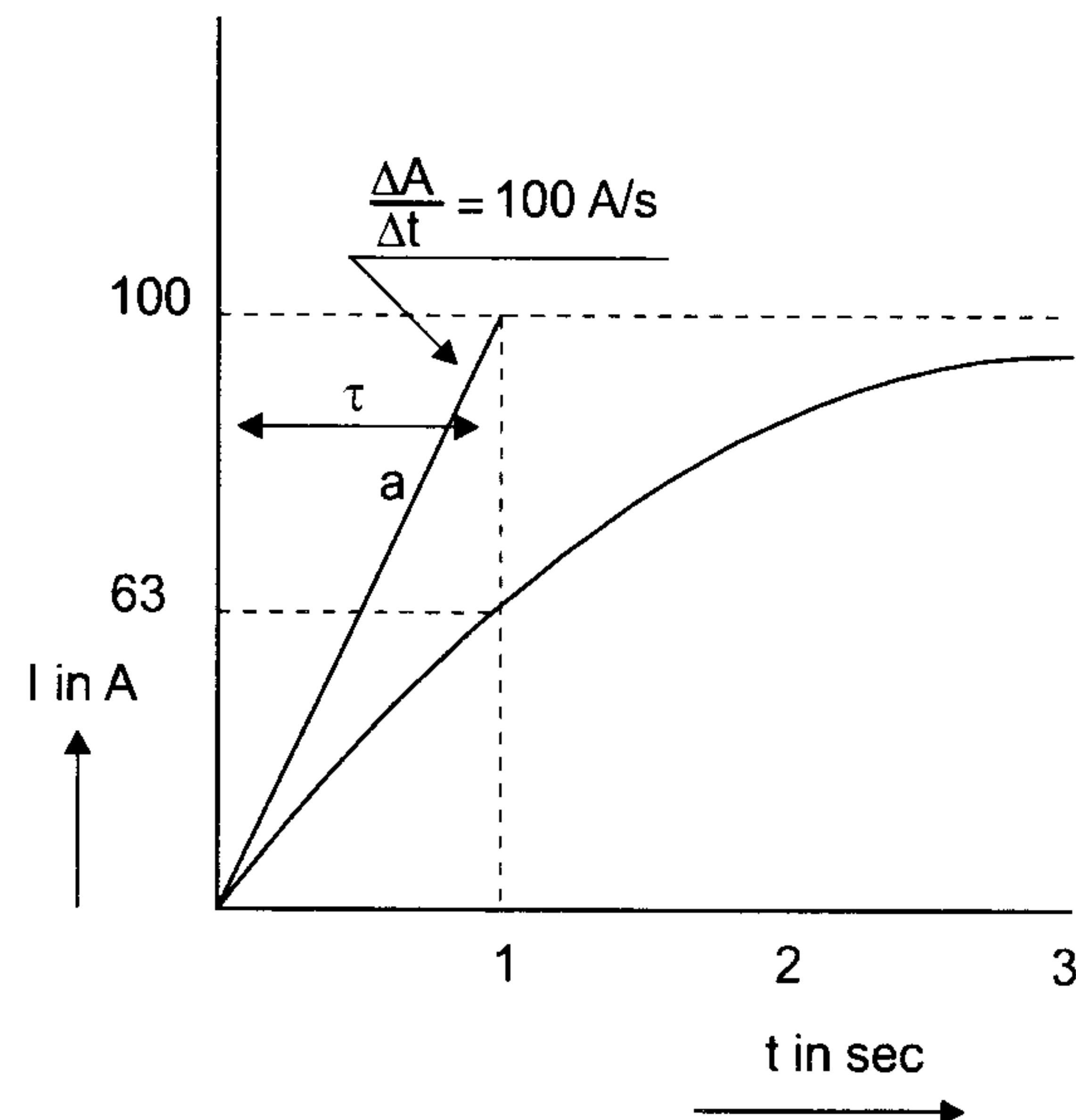
De tijdsduur waarin de stroom 63% van de eindwaarde bereikt noemt men de tijdconstante. We geven deze tijdconstante aan met de griekse letter  $\tau$  (spreek uit tau). In formule vorm:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Op deze manier wordt de eindwaarde van de stroom  $I$  nooit helemaal bereikt. Men gaat er in de praktijk echter van uit dat dit na circa  $5 \tau$  het geval is (het verschil is kleiner dan 0,6% geworden).



Figuur 3.3-2 Onderbreken van een stroomkring met een spoel



Figuur 3.3-3 Tijdconstante

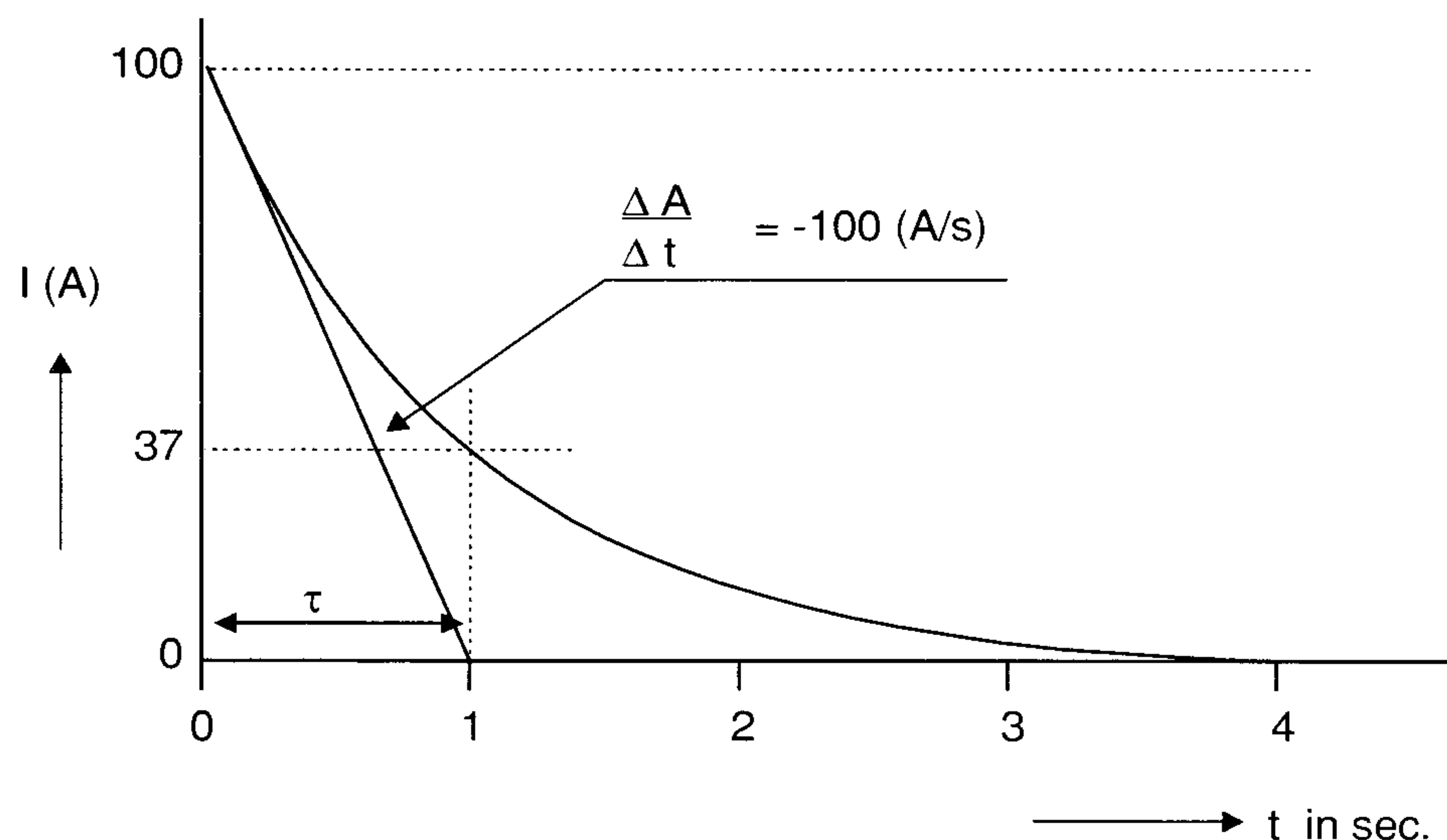
### Vonkvorming bij schakelen van stroom door zelfinducties

Wat gebeurt er als we schakelaar S in figuur 3.3-2 openen? Toen de schakelaar nog gesloten was verzette de spoel zich tegen het toenemen van de stroom. Naarmate de stroom toenam werd er echter ook energie opgehoopt in het magneetveld van de spoel. Nu de schakelaar wordt geopend verzet de spoel zich tegen de afname van de stroom. De opgehoopte energie stelt de spoel in staat om de stroom nog even in dezelfde richting te laten vloeien. Als het moet dwars door de geopende schakelaar heen! Op het moment dat de schakelaar wordt geopend is de stroomverandering per seconde  $\Delta I/\Delta t$  immers zeer groot. De spoel wekt dan een inductiespanning op die zo groot is dat een vonk over de geopende schakelaar springt.

### Vonkblussing

Soms kan men dit effect nuttig gebruiken (denk bijvoorbeeld maar aan de ontsteekspanning voor de bougie van een benzinemotor), maar meestal is de vonk ongewenst. De schakelaar zal door het vonken op den duur inbranden. In de elektronica worden (relais-)spoelen vaak in- en uitgeschakeld met behulp van een transistor. Halfgeleiders kunnen doorgaans (zie hoofdstuk 9) een beperkte spanning verdragen. De inductiespanning van de spoel zal de transistor bij snel uitschakelen reeds de eerste de beste keer verwoesten. Het ontstaan van de spanningspiek is te voorkomen door een diode parallel aan de spoel te schakelen (gestippeld in figuur 3.3-2). Door deze halfgeleider kan slechts in één richting stroom vloeien en wel in de richting van de pijl waaruit het schemasymbool bestaat. Het spanningsverlies over de diode is vrij klein (0,3 tot 0,7 V).

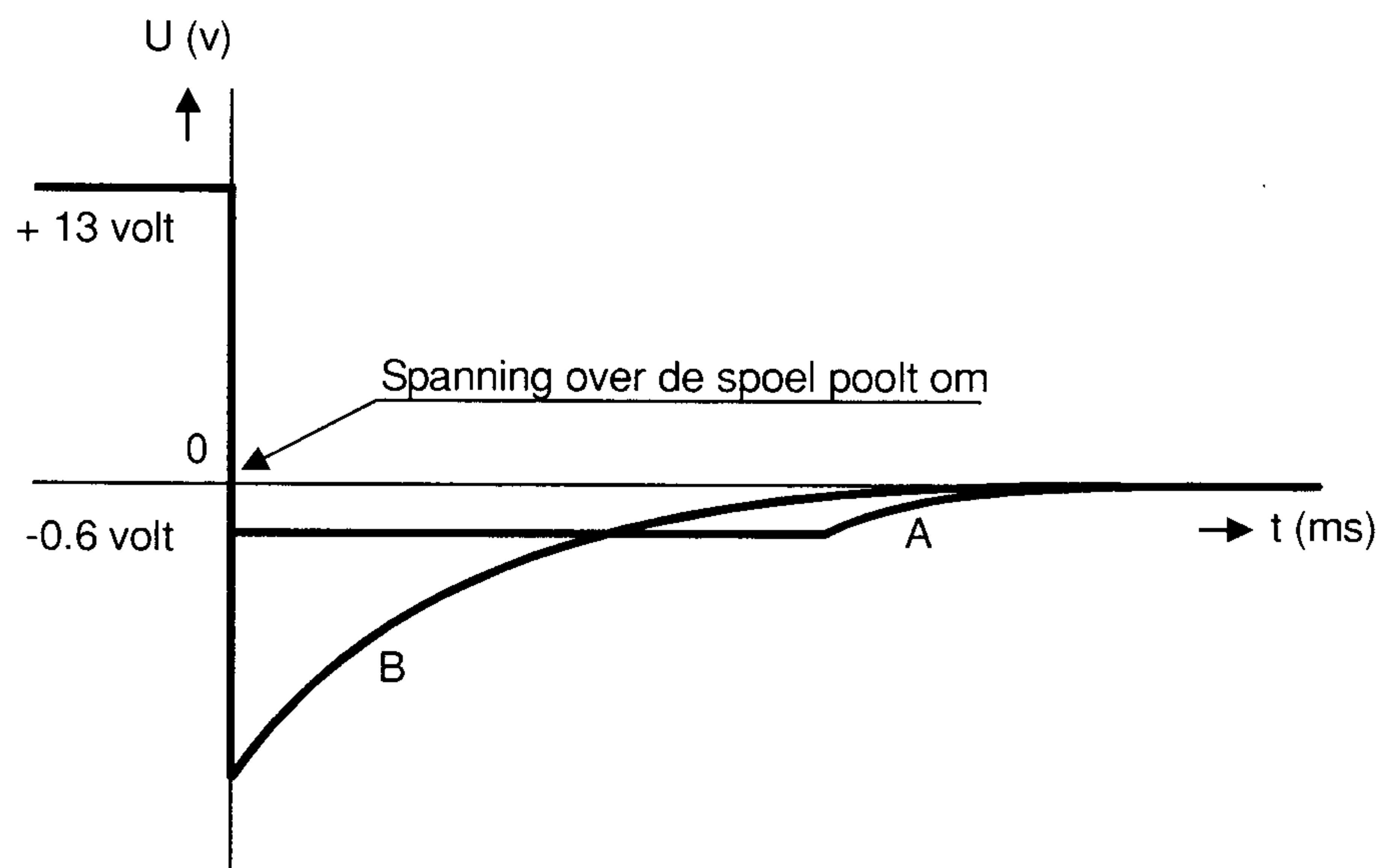




Figuur 3.3-4 De stroom na het openen der schakelaar.

Wanneer schakelaar S gesloten is (figuur 3.3-2) probeert de spanningsbron een stroom tegen de pijlrichting in te laten vloeien. De diode gedraagt zich als een isolator. Zodra de schakelaar open gaat zal de spoel zich verzetten tegen het afnemen van de stroom. Die afname is op te vatten als een negatieve verandering. In ons voorbeeld is  $\Delta I/\Delta t$  dan 100 A/s. De spanning over de spoel zal op grond van formule (1) dus omkeren. Hierdoor komt de diode voor de opgewekte inductiespanning in de doorlaatrichting te staan. De stroom, die eerst vloeide in het kringetje gevormd door de spanningsbron, L en R, gaat nu door de kring L, R en de diode.

Hoe lang kan de spoel die stroom instandhouden? Figuur 3.3-4 geeft het grafische antwoord. Daarbij is het spanningsverlies over de diode verwaarloosd. Na verstrijken van één tijdconstante (hier dus 1 seconde) is de aanvangswaarde van de stroom met 63% afgenomen. In ons voorbeeld vloeit er dan nog 37 A. In de volgende seconde neemt de stroom weer 63% af en is er nog ca 14 A over. Na 5 tijdconstanten is de stroom kleiner geworden dan 0,6% van de aanvangswaarde en neemt men aan dat het verschijnsel is uitgestorven.



Figuur 3.3-4a Verloop van spanning en stroom bij openen der schakelaar

Onthoud goed: een spoel verzet zich tegen het veranderen van de stroom. Hoe sneller de stroomverandering per seconde des te groter is het verzet. Dat verzet uit zich in de vorm van een inductiespanning die er naar streeft om de bestaande stroom in stand te houden. Een gelijkstroom die niet van sterkte verandert zal echter ongehinderd door een spoel vloeien.

#### Op- en ontladen van een condensator

Na de voorgaande beschouwing vragen we ons af of iets dergelijks ook met een condensator mogelijk is. Aan het begin van dit hoofdstuk leerden we het verband tussen lading en spanning bij een condensator  $Q = C \cdot U$ . Als we de spanning veranderen, verandert de lading evenredig, dus:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta U \quad (3)$$

Nu is de lading gelijk aan stroom tijd, dus:

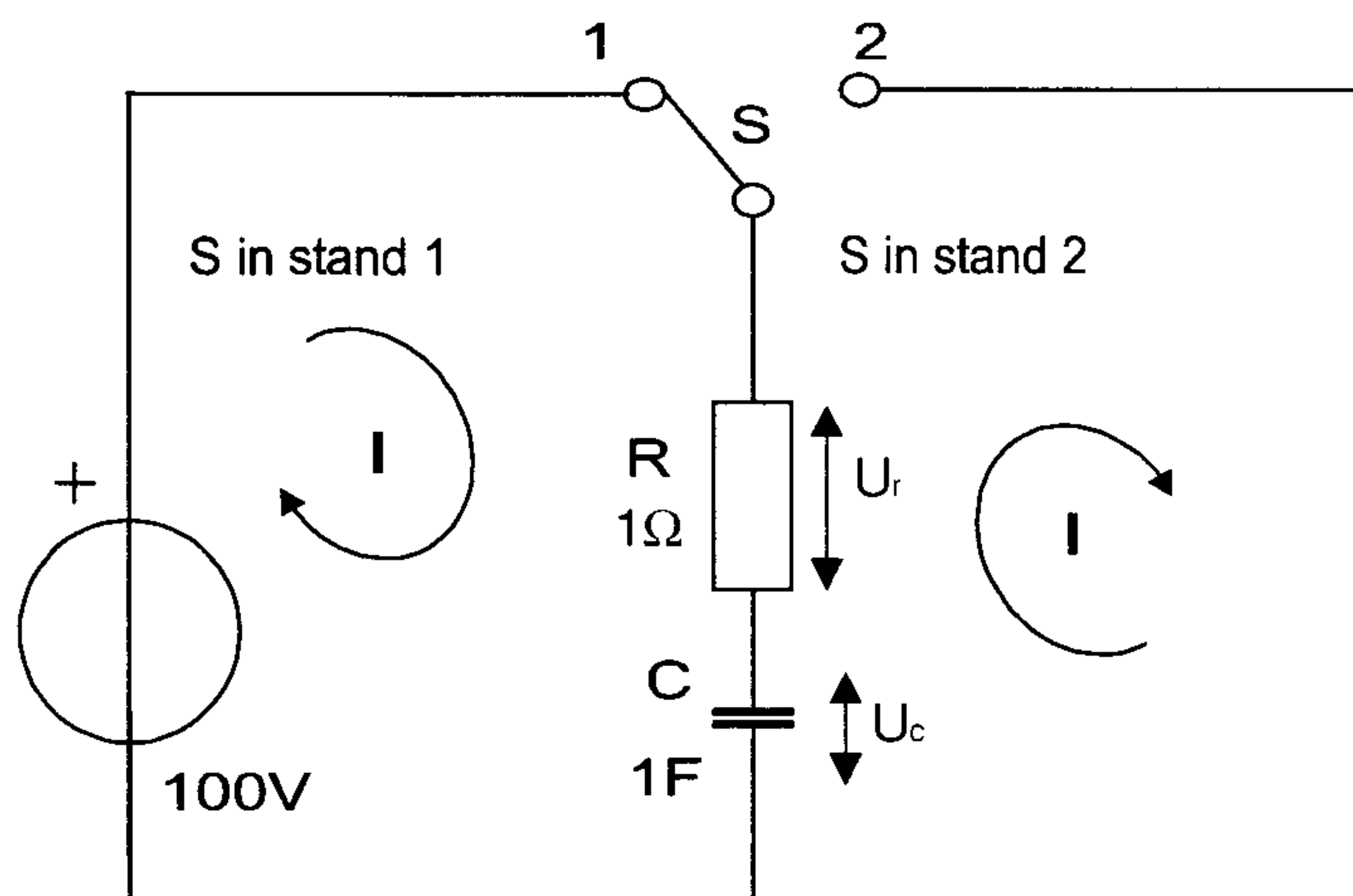
$$\Delta Q = I \cdot \Delta t \quad (4)$$

Door de formules 3 en 4 gelijk te stellen vinden we:

$$C \cdot \Delta U = I \cdot \Delta t \text{ of}$$

$$\Delta U = \frac{I}{C} \cdot \Delta t \quad (5)$$

Voor de duidelijkheid weer twee rekenvoorbeelden:



Figuur 3.3-5 Het op en ontladen van een condensator

### Voorbeeld 1

Een condensator van  $1 \mu\text{F}$  wordt gedurende  $1 \text{ ms}$  opgeladen met een constante stroom van  $2 \text{ A}$ . Bereken de eindwaarde van de spanning.

#### Oplossing

We gaan er van uit dat op het moment van inschakelen ( $t_1 = 0$ ) de condensator ongeladen is, dus  $U_1 = 0$ . Dan mogen we de delta's in formule 5 weglaten, zodat

$$U = \frac{I}{C} \cdot t = \frac{2}{1 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 2000 \text{ V}$$

### Voorbeeld 2

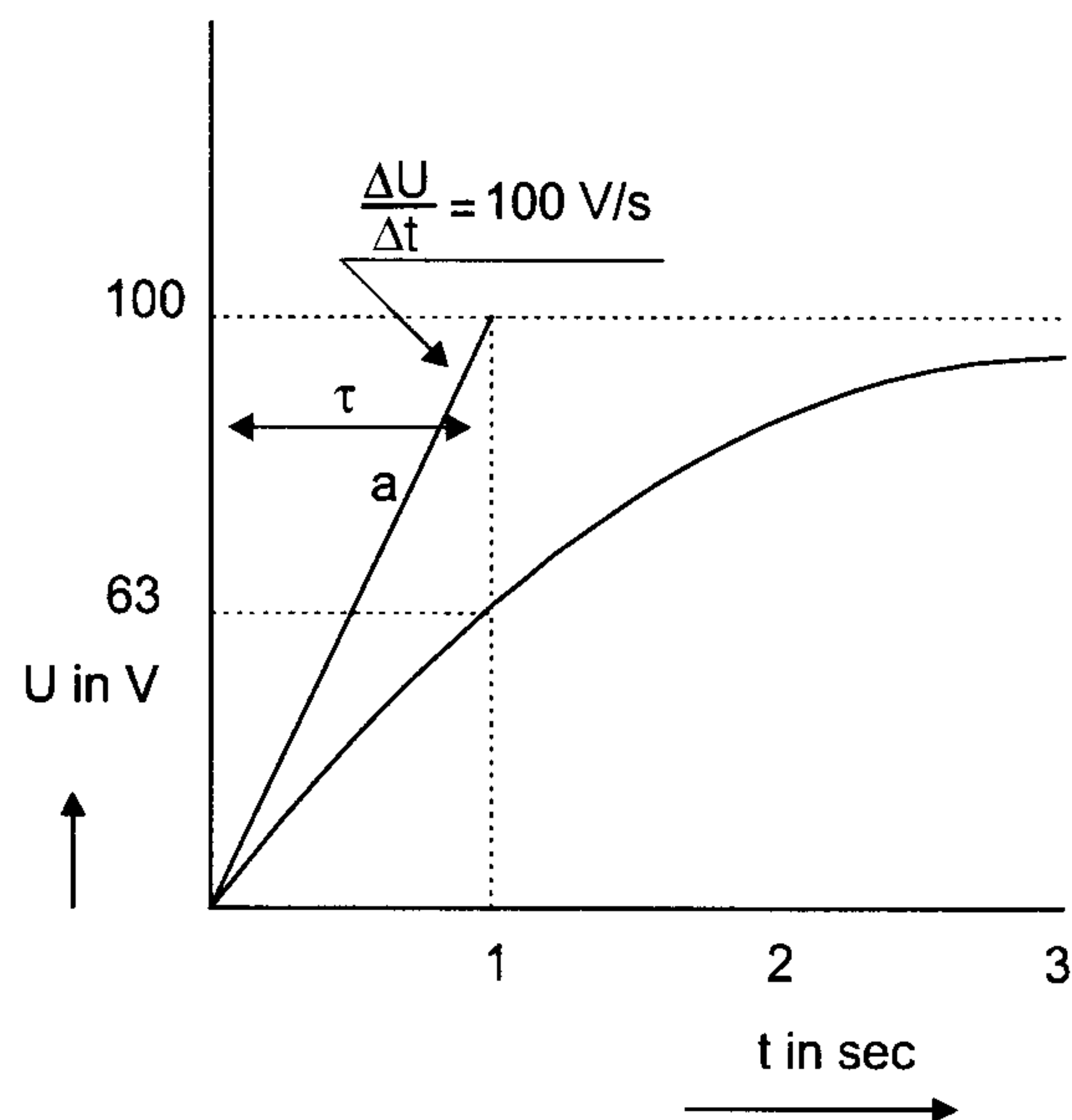
Een condensator van  $500 \mu\text{F}$  moet in  $10 \text{ ms}$  worden opgeladen tot  $100 \text{ V}$ . Bereken de vereiste stroomsterkte.

#### Oplossing

Eerst vormen we formule 5 om tot:

$$I = \frac{\Delta U}{\Delta t} \cdot C = \frac{100}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ A}$$

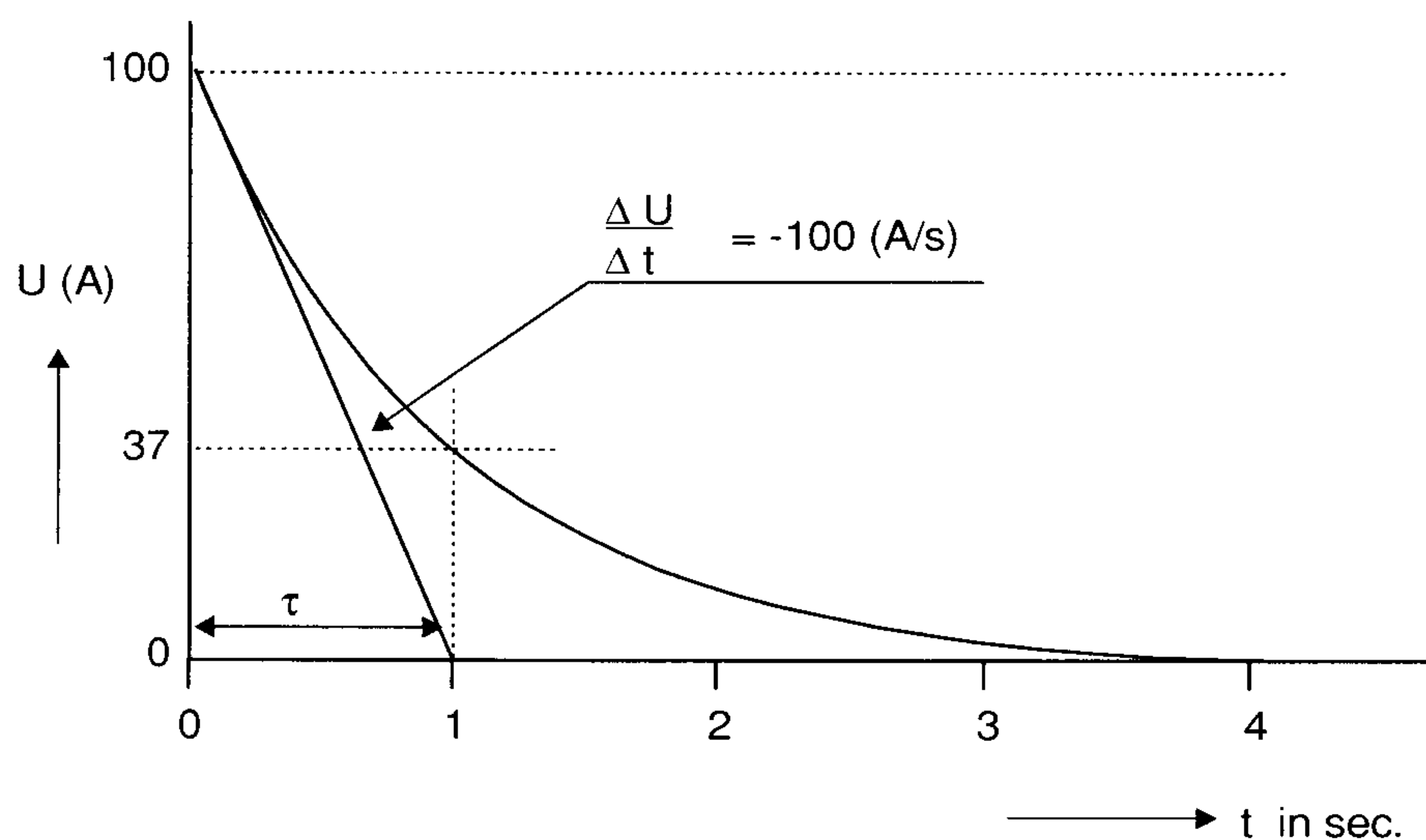
Uit het voorgaande volgt dat het niet mogelijk is om de spanning over een condensator tijdloos te veranderen omdat er dan een oneindig grote piekstroom zou optreden. We laden een condensator daarom het beste op via een serieweerstand. Bij de oplaadmethode die in figuur 3.3-5 is getekend is de stroom echter niet constant. In het begin is  $U_c$  gelijk aan nul en staat de hele voedingsspanning over  $R$ . Er loopt dan  $100 \text{ A}$ . Als die stroom niet zou veranderen was de condensator reeds na  $1 \text{ s}$  opgeladen (zie lijn a in figuur 3.3-6), maar tengevolge van de toenemende  $U_c$  wordt  $I$  steeds kleiner. In werkelijkheid is  $U_c$  na  $1 \text{ s}$  slechts  $63 \text{ V}$ . Zie je dat figuur 3.3-6 sprekend op figuur 3.3-3 lijkt, maar pas op: thans is verticaal de spanning uitgezet!).



Figuur 3.3-6 Spanningsverloop over de condensator

De tijdconstante van deze schakeling, die in dit voorbeeld 1 s bedraagt, volgt uit de formule:

$$\tau = R \cdot C$$



Figuur 3.3-7 Spanningsverloop van een zich ontladende condensator

Ook hier geldt weer dat  $U_c$  in theorie nooit helemaal gelijk aan de bronspanning wordt, maar dat het verschil na  $5 \tau$  verwaarloosbaar klein is. Als we schakelaar S in stand 2 zetten, wordt de condensator ontladen. We hoeven daarbij niet bang te zijn voor inductiespanningen. De spanning  $U_c$  zal niet omkeren, integendeel: het is de stroom die van richting verandert. De grafiek van de condensatorspanning is te zien in figuur 3.3-7. Ook nu is er na 1 tijdconstante slechts 37% van de oorspronkelijke spanning over.



*Onthoud goed:*

*Een condensator verzet zich tegen een sprongsgewijze verandering van de spanning.*

*Zoals een spoel zich verzet tegen een verandering van de stroom met een spanning die tegenwerkt, zo verzet een condensator zich tegen een verandering van de spanning, met een stroom die tegenwerkt.*

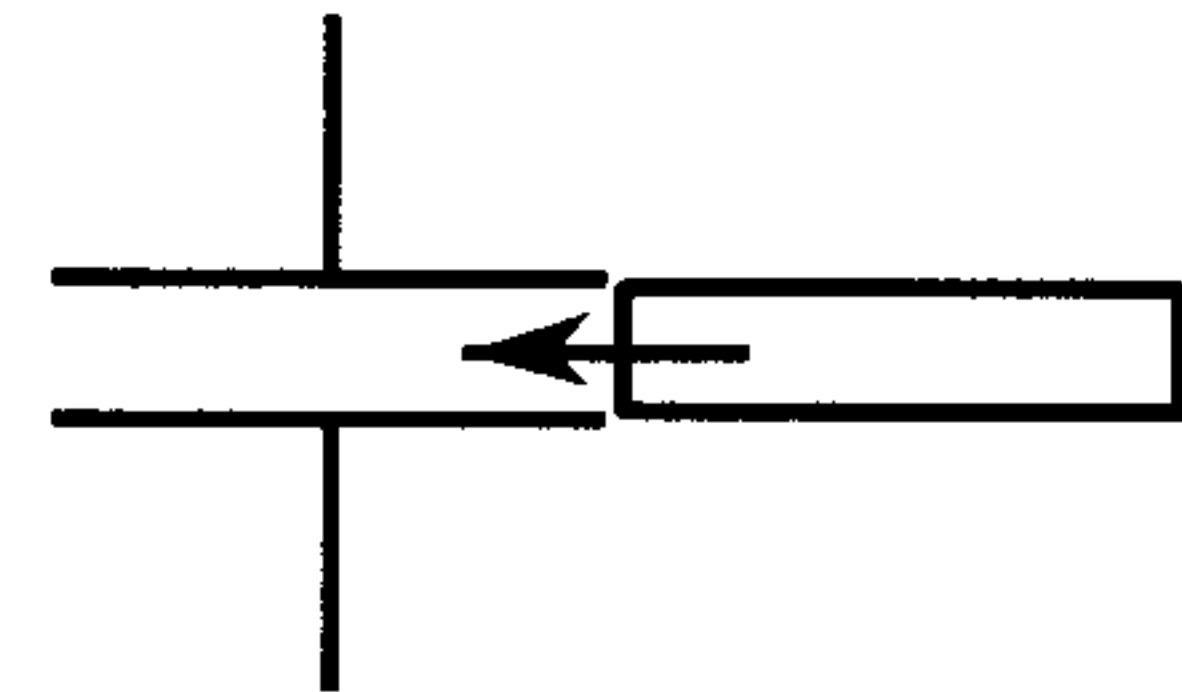
### 3.6 Vragen

#### Vraag 1

Tussen de platen van een luchtcondensator wordt een passende plaat geschoven met een diëlektrische constante van 5.

De waarde van de capaciteit zal nu:

- A. 5 x zo klein worden
- B. gelijk blijven
- C. 5 x zo groot worden
- D. 25 x zo groot worden

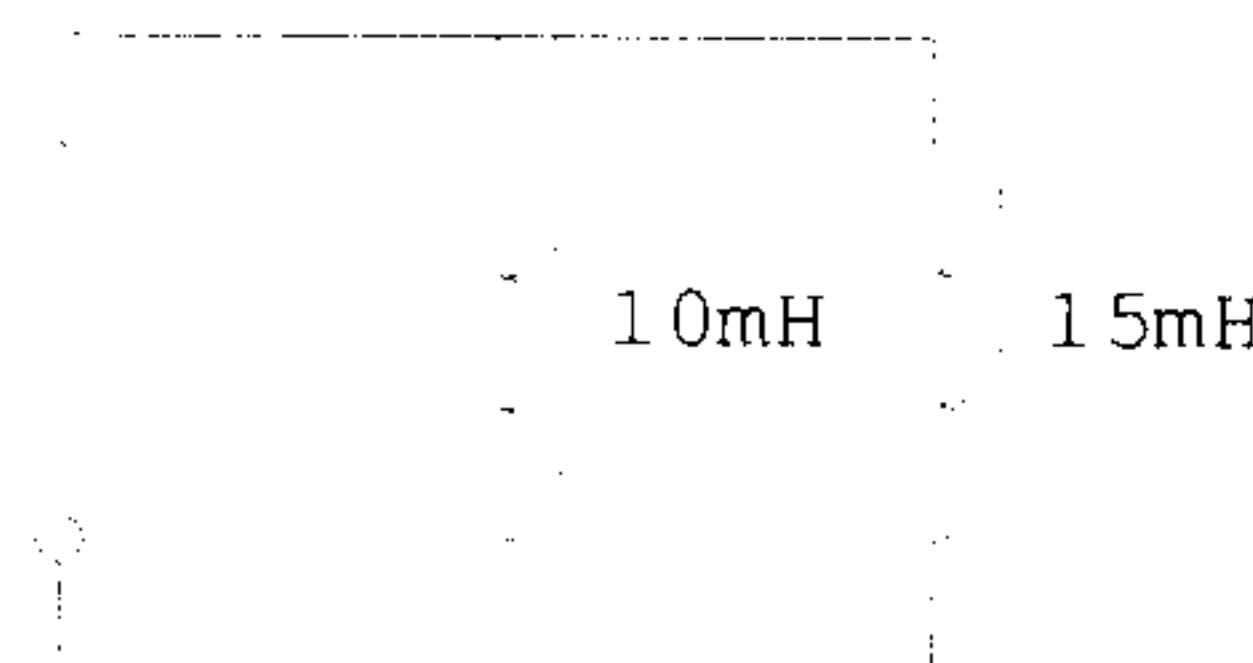


#### Vraag 2

De spoelen zijn niet gekoppeld.

De vervangingswaarde van de twee zelfinducties ligt tussen:

- A. 5 en 7,5 mH
- B. 7,5 en 10 mH
- C. 10 en 15 mH
- D. 20 en 30 mH



#### Vraag 3

Drie condensatoren van respectievelijk 200, 300 en 600 pF worden in serie geschakeld.

De vervangingscapaciteit is:

- A. 100 pF
- B. 120 pF
- C. 367 pF
- D. 1100 pF

