

# Eksperimentelt projekt: Belastningskarakteristik for en modelvindmølle

## Indhold

<b>1</b>	<b>Nogle grundbegreber for elektricitet</b>	<b>2</b>
1.1	Ladning . . . . .	2
	Opgave 1 . . . . .	2
1.2	Strømstyrke . . . . .	3
	Opgave 2 . . . . .	3
	Opgave 3 . . . . .	3
1.3	Spændingsfald . . . . .	3
	Opgave 4 . . . . .	4
	Opgave 5 . . . . .	4
1.4	Elektrisk effekt . . . . .	4
	Opgave 6 . . . . .	5
	Opgave 7 . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Ohms lov for en resistor</b>	<b>6</b>
	Opgave 8 . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Joules lov for en resistor</b>	<b>7</b>
	Opgave 9 . . . . .	7
	Opgave 10 . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Belastningskarakteristik for en spændingskilde</b>	<b>8</b>
	Opgave 11 . . . . .	11
	Opgave 12 . . . . .	11
	Opgave 13 . . . . .	12
	Opgave 14 . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Projektbeskrivelse</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Kilder</b>	<b>14</b>

En vindmølle producerer elektricitet, når den drejer rundt, og kan derfor anses for at være en spændingskilde. I det følgende vil vi opbygge teorien til at kunne forstå en spændingskildes belastningskarakteristik og dens effektkurve. Som afslutning på forløbet vil vi se nærmere på vindmøller.

## 1 Nogle grundbegreber for elektricitet

I det følgende skal vi se på nogle grundbegreber til beskrivelse af elektricitet.

### 1.1 Ladning

Elektricitet er ensbetydende med elektriske ladninger i bevægelse. Hvad en elektrisk ladning egentligt er, er svært at forklare. Vi ved, at der findes to slags elektrisk ladning, nemlig positiv - og negativ ladning. Vi ved også, at elektrisk ladning er kvantificeret, dvs. at der findes en mindste fri ladning, kaldet elementarladningen, og at alle frie ladninger består af et helt antal elementarladninger. Hvis vi f.eks. har en ladning  $q$  og betegner elementarladningen med  $e$ , vil størrelsen af  $q$  være givet ved

$$q = n \cdot e,$$

hvor  $n$  er et helt tal, som enten er positivt eller negativt alt efter om ladningen er positiv eller negativ. SI-enheden for ladning er coulomb, forkortet  $C$ , og der gælder at

$$1 C = 6,24151 \cdot 10^{18} e$$

De mindste frie ladninger vi kender til, er elektronens og protonens ladning, der henholdsvis er på  $-e$  og  $e$ . I dagligdagssammenhænge oplever vi især ladninger på overfladen af materialer. Det kunne f.eks. være på en kam, som vi lige har redt håret med eller en bluse, som vi lige har taget af eller på. Når vi gør det, kan vi nogen gange høre små gnister springe mellem f.eks. bluse og hår. Gnisterne opstår når elektroner bevæger sig hurtigt fra det ene materiale til det andet. Fænomenet kaldes statisk elektricitet.

#### Opgave 1

Hvis man gnider en ballon mod håret, kan man overføre elektroner fra ballonen til håret. På den måde kan der nemt opstå en ladning på  $10^{-10} C$  på ballonen.

- Beregn elektronens ladning i coulomb.
- Hvor mange elektroner er der blevet overført til håret, hvis vi antager, at ladningen på ballonen er  $10^{-10} C$ ?

Vi ved også, at ladninger med samme fortegn frastøder hinanden, og ladninger med modsat fortegn tiltrækker hinanden. Hæng nu to balloner op i hver sin sytråd af en længde på ca. 1 meter. De to sytråde fastgøres i samme punkt, så ballonerne rører ved hinanden. Gnid så de to balloner mod håret og slib dem.

- c) Hvordan opfører de to balloner sig og hvorfor?
- d) Forklar hvad sker der, hvis man kommer tæt på en af ballonerne med f.eks. et stykke papir?

## 1.2 Strømstyrke

Når en vindmølle producerer elektricitet, sætter den egentligt bare elektroner i bevægelse. Der opstår altså en strøm af ladninger og styrken,  $I$ , af strømmen er defineret ved mængden af ladning der passerer et bestemt sted i tiden  $\Delta t$ :

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

SI-enheden for strømstyrken er coulomb pr. sekund, som også kaldes ampere:

$$[I] = \frac{C}{s} = A$$

### Opgave 2

Vis ved hjælp af definitionen for strømstyrken, at  $1 C$  svarer til den mængde ladning, der passerer tværsnittet i en leder, når lederen fører en strøm på  $1 A$ .

### Opgave 3

Hvor mange elektroner passerer et tværsnit af en leder, der fører en strøm på  $4 A$  i en time?

## 1.3 Spændingsfald

Det, der driver strømmen af sted, er spændingsfaldet,  $U$ . Uden spændingsfald går der ingen strøm og ladningerne bevæger sig derfor ikke. Men når der er et spændingsfald, sættes ladningerne i bevægelse og de bærer derfor en energi, som driver dem rundt i kredsløbet. Ladningerne forbruges altså ikke undervejs, men de afsætter den energi, de bærer. Mængden af energi der afsættes pr. ladning i en komponent i kredsløbet er netop spændingsfaldet over komponenten og defineres på følgende måde:

$$U = \frac{\Delta E}{\Delta q}.$$

SI-enheden for spændingsfaldet er joule pr. coulomb, som også betegnes volt ( $V$ ):

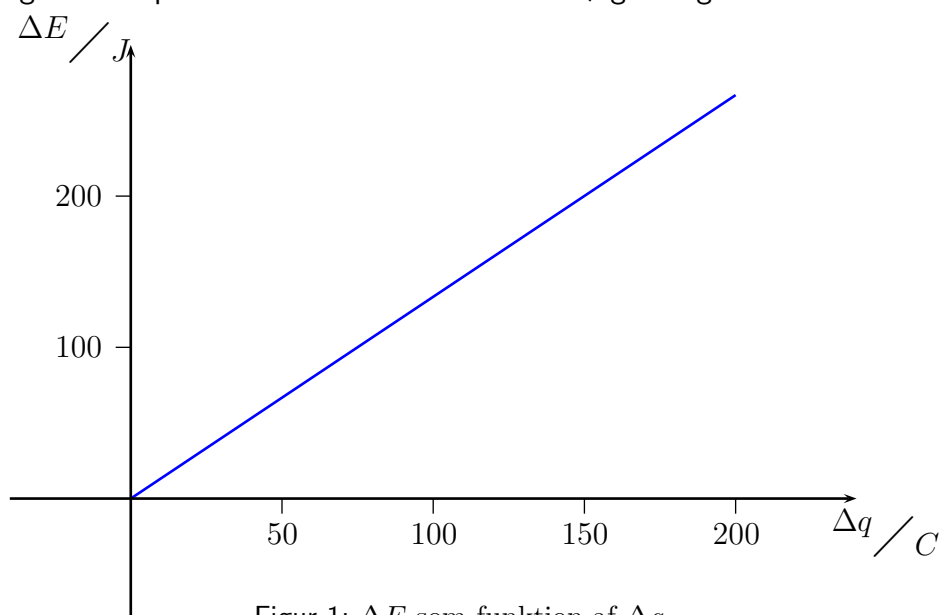
$$[U] = \frac{J}{C} = V.$$

#### Opgave 4

En ion med ladningen  $4e$  gennemløber en komponent i et kredsløb og afsætter derved en energi på  $1,92 \cdot 10^{-19} J$ . Hvor stort er spændingsfaldet over komponenten?

#### Opgave 5

I et eksperiment blev energiomsætningen i en komponent i et kredsløb målt som funktion af ladningsmængden som passerede den. Derved fremkom følgende graf:



- Hvilken sammenhæng er der mellem spændingsfaldet over den pågældende komponent og ovenstående graf?
- Beregn spændingsfaldet over komponenten.

## 1.4 Elektrisk effekt

Lad os se lidt nærmere på enhederne for strømstyrken og spændingsfaldet:

$$[I] = A = \frac{C}{s} \quad \text{og} \quad [U] = V = \frac{J}{C}.$$

Produktet af de to enheder giver os følgende:

$$[I] \cdot [U] = A \cdot V = \frac{C}{s} \cdot \frac{J}{C} = \frac{J}{s} = W,$$

som er enheden for effekt. Den effekt, som den elektriske energi afsættes med i en komponent, er derfor givet ved produktet af strømstyrken gennem komponenten og spændingsfaldet over den:

$$P = I \cdot U.$$

Når vi kun ser på produktet af enhederne, kan vi strengt taget ikke vide, om der også skal ganges en enhedsløs konstant på for at formlen holder. Vi burde derfor have udført forsøg, som kunne eftervise formlen. Enhederne for strømstyrken og spændingsfaldet er dog valgt, så konstanten er lig 1 og vi ved derfor, at formlen gælder.

### Opgave 6

Strømstyrken gennem en almindelig glødepære er  $0,261 A$  og strømstyrken gennem en tilsvarende led-pære er  $0,0304 A$ .

- Beregn hvor meget energi der omsættes i glødepæren i løbet af 2 timer.
- Beregn hvor meget energi der omsættes i led-pæren i løbet af 2 timer.

En kilowatttime (kWh) koster ca. 2 kr. Antag at lampen, hvori pæren sidder, er tændt i to timer pr døgn. ( $1 kWh = 3600000 J$ .)

- Beregn hvor stort et beløb der spares på årsbasis ved at udskifte glødepæren med en led-pære.

### Opgave 7

Færdselsloven foreskriver kørelys i dagtimerne på alle biler, der kører på de danske veje. Kørelyset skal som minimum bestå af to lygter foran på ældre biler og to lygter både foran og bagpå på nyere biler. Typisk bruges bilens normale lygter som kørelys. Pærene i bilernes lygter foran og bagpå har en effekt på henholdsvis  $55 W$  og  $5 W$ .

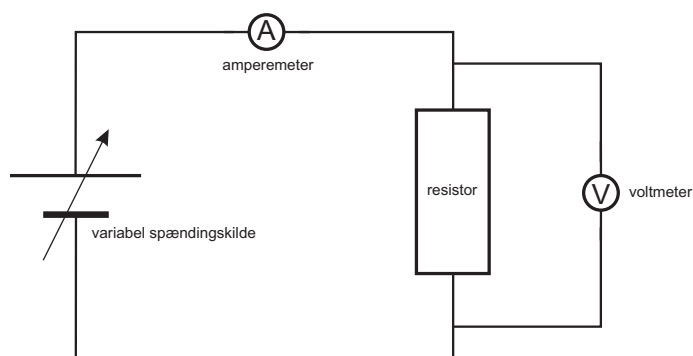
- Beregn hvor meget energi det koster at have kørelyset tændt på en bil i en time.
- Giv et skøn på, hvor meget energi kørelyset samlet set omsætter på årsbasis i Danmark. (For samtlige danske biler.)

En typisk dansk vindmølle producerer energi med en effekt på  $600 kW$ , hvis vinden blæser optimalt hele tiden. Det skønnes dog, at den i gennemsnit kun producerer energi med en effekt på  $300 kW$ . (Kilde: videnomvind.dk)

- Beregn hvor mange typiske vindmøller der skal til for at dække det årlige danske kørelysforsbrug.

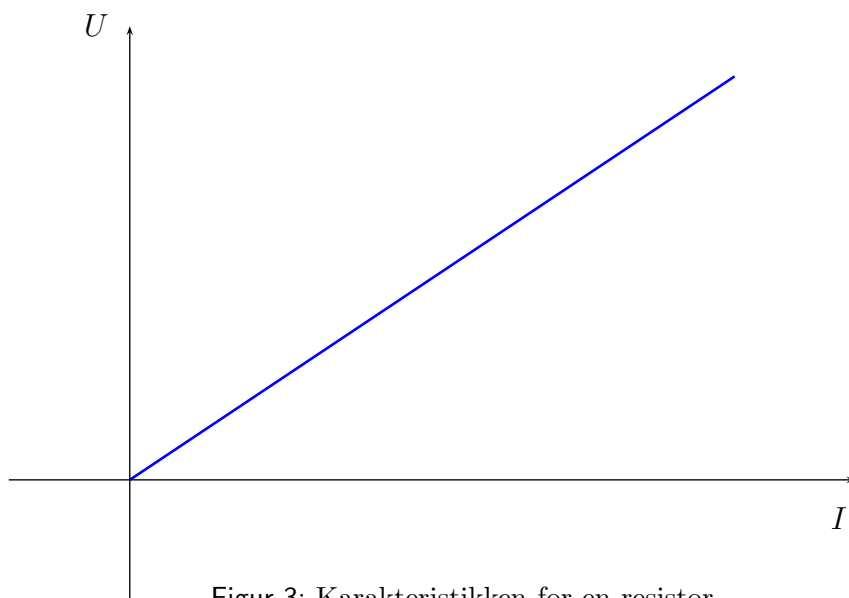
## 2 Ohms lov for en resistor

En resistor er en passiv elektrisk komponent, som f.eks. bruges til regulering eller til varmeudvikling. I en passiv komponent afhænger sammenhængen mellem spændingsfaldet over den og strømstyrken gennem den ikke af andre forhold i kredsløbet. Elektriske komponenter kan beskrives grafisk ved en belastningskarakteristik og laves en sådan for resistoren, finder vi, at spændingsfaldet over den er proportional med strømstyrken gennem den. Karakteristikken kan laves ved at regulere spændingsfaldet i et simpelt kredsløb som dette:



Figur 2: Kredsløb til måling af karakteristikken for en resistor.

Grafisk ser karakteristikken således ud:



Figur 3: Karakteristikken for en resistor

og sammenhængen mellem spændingsfaldet og strømstyrken er givet ved

$$U = R \cdot I \quad (\text{Ohms lov for en resistor}),$$

som kaldes Ohms lov for en resistor. Sammenhængen gælder kun for resistorer. Proportionalitetskonstanten  $R$  karakteriserer modstanden og er modstandens størrelse. Enheden for  $R$  er  $V/A$ , som kaldes ohm og betegnes med det græske bogstav  $\Omega$ .

$$[R] = \frac{V}{A} = \Omega.$$

### Opgave 8

Følgende sammenhængende værdier for spændingsfaldet og strømstyrken for en resistor er blevet målt. Tegn karakteristikken og bestem resistorens størrelse.

$U/V$	0	0,95	1,82	2,58	3,04	3,75	4,44	4,93
$I/mA$	0	0,61	1,22	1,74	2,02	2,53	2,99	3,30

## 3 Joules lov for en resistor

I følge Ohms lov er der et spændingsfald over en resistor og derfor afsættes der også energi i den. Al den energi, der afsættes i resistoren går til indre energi i den. Det vil sige, at den bliver varm. Hvis vi kombinerer Ohms lov med effektformlen, får vi følgende udtryk for omsætning af elektrisk energi i en resistor:

$$\Delta E_{et} = R \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad \text{eller} \quad \Delta E_{et} = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t.$$

Udtrykket kaldes også for Joules lov.

### Opgave 9

Udled Joules lov ved at kombinere Ohms lov med effektformlen.

I mange af de elektriske apparater, vi benytter i dagligdagen, er der indbygget resistorer. Det kunne f.eks. være elradiatorer, ovne eller de sikringer, som skal beskytte elnettet i vores huse mod overbelastning.

### Opgave 10

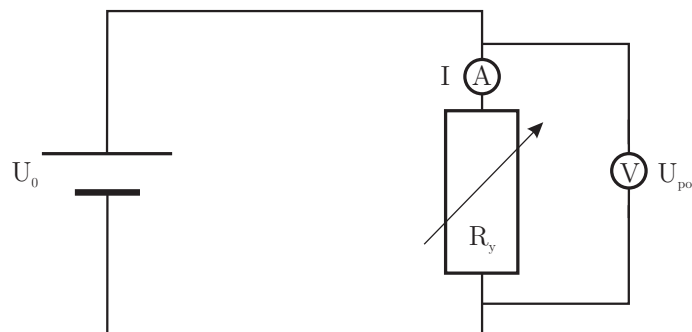
Til opvarmning af vandet i et akvarie benyttes en resistor som varmelegeme. Ved afprøvning af varmelegemet ved forskellige strømstyrker fremkom følgende sammenhørende værdier:

$I/A$	0	1,10	1,87	2,13	2,50	2,74	3,05
$P/W$	0	4,25	12,2	15,9	21,7	26,2	32,6

- a) Hvilken sammenhæng er der mellem strømstyrken og varmelegemets effekt?
- b) Tegn en passende graf ud fra data i tabellen og bestem størrelsen på resistoren i varmelegemet.

## 4 Belastningskarakteristik for en spændingskilde

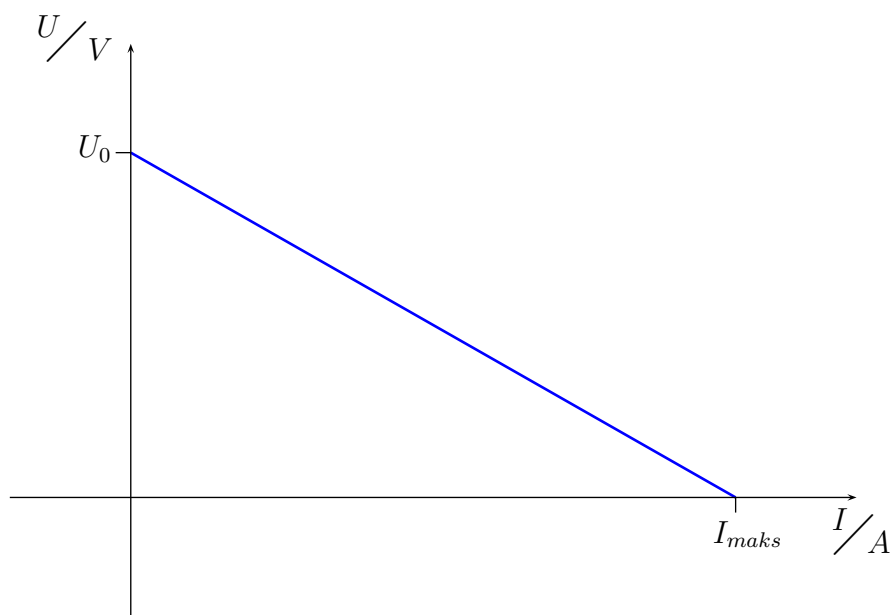
En spændingskilde er en elektrisk komponent, som øger ladningernes elektriske energi, når de passerer den. Kilden laver altså en spændingsstigning. Størrelsen af denne stigning karakteriserer spændingskilden. Stigningen kaldes også kildens hvilespænding og betegnes med  $U_0$ . Navnet hentyder til, at det kun er en ideel spændingskilde, der konstant kan levere en spænding på  $U_0$  ligegyldigt hvor meget den belastes. I den virkelige verden vil ladningerne møde modstand, når de er i bevægelse inde i kilden, og derfor vil de miste energi, som bliver til varme. Laver man en belastningskarakteristik for spændingskilden, vil den afhænge af, hvor meget energi der omdannes til varme, når ladningerne passerer den. Følgende kredsløb kan benyttes, når der skal laves en karakteristik for en spændingskilde:



Figur 4: Kredsløb til måling af karakteristikken for en spændingskilde.

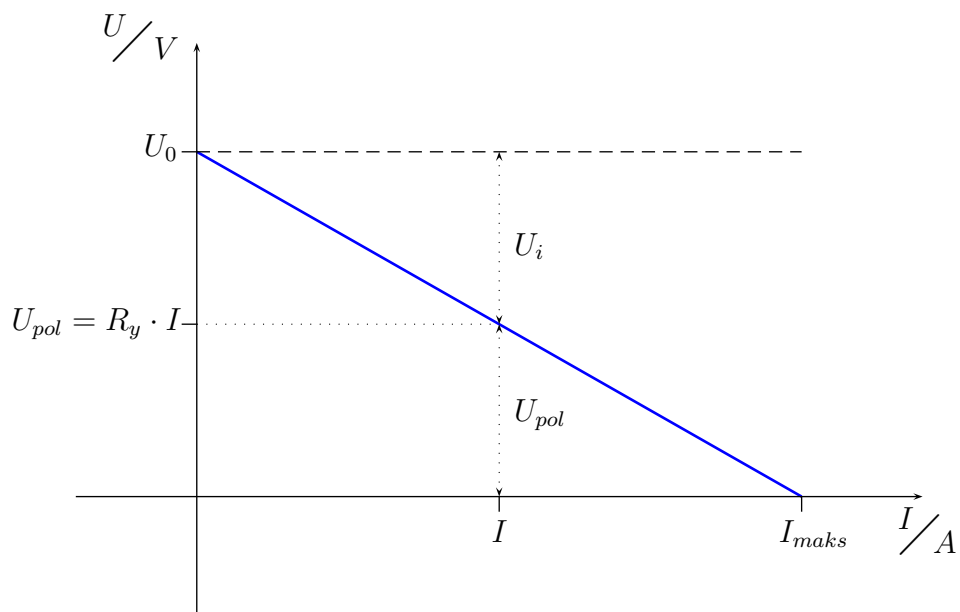
Voltmeteret måler det ydre spændingsfald i kredsløbet, som også er lig spændingen over kildens poler. Den ydre modstand,  $R_y$ , kan varieres, så det ifølge Ohms lov bliver muligt at variere strømstyrken i kredsløbet. Udføres forsøget med et almindeligt batteri, fås følgende karakteristik:





Figur 5: Belastningskarakteristik for et almindelig batteri.

Grafen viser polspændingen som funktion af strømstyrken. Det er klart, at polspændingen ikke kan blive større end hvilespændingen og ligeledes er der en maksimal strømstyrke,  $I_{maks}$ ,



Figur 6: Belastningskarakteristik for et almindelig batteri.

som batteriet kan opretholde.  $I_{maks}$  kaldes også kortslutningsstrømmen, da det svarer til

at batteriet er kortsluttet, dvs. den ydre modstand,  $R_y$  er lig nul.

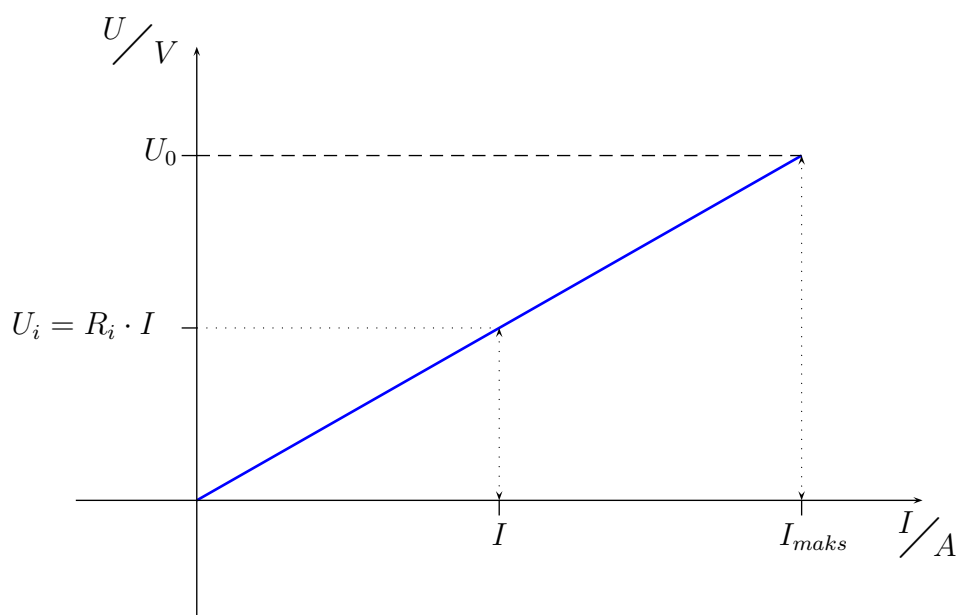
Ved at udvide figur 5 kan vi analysere karakteristikken yderligere. Udvidelsen kan ses i figur 7. Når en ladning passerer spændingskilden, undergår den en spændingsstigning på  $U_0$ . Den får altså tilføjet elektrisk energi. Herefter strømmer den turen rundt i kredsløbet og afgiver derved hele den elektriske energi igen, som den modtog i spændingskilden. Der gælder derfor at

$$U_{pol} + U_i = U_0.$$

I figur 7 ses det, at  $U_i$  er det manglende spændingsfald, som sammen med spændingsfaldet over modstanden i kredsløbet giver os det totale spændingsfald på  $U_0$ . Det ses, at når  $I$  bliver større, aftager  $U_{pol}$  lineært samtidigt med at  $U_i$  bliver tilsvarende større. Isolerer vi  $U_{pol}$  får vi

$$U_{pol} = U_0 - U_i.$$

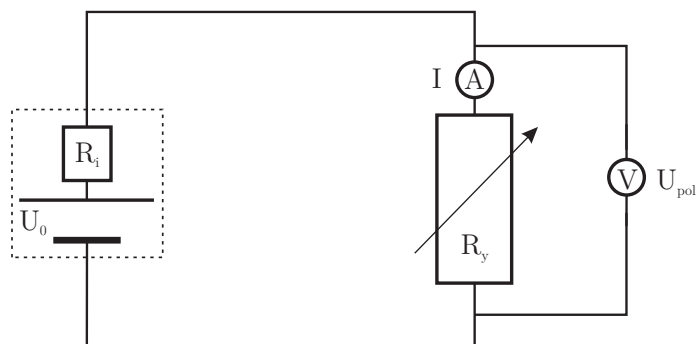
Men hvor i kredsløbet sidder denne komponent, som giver spændingsfaldet  $U_i$ , og hvilken komponent er der tale om? For at svare på disse spørgsmål tegnes nu grafen for  $U_i$  som funktion af  $I$ :



Figur 7:  $U_i$  som funktion af  $I$ .

Vi ser, at grafen er lig karakteristikken for en resistor. Den manglende komponent er altså en resistor. Ser vi igen på kredsløbet i figur 8, ser vi, at komponenten kun kan sidde mellem spændingskildens poler. Spændingskilden har altså en indre resistans, som omsætter en del af den energi, som spændingskilden kan levere. Omsætningen sker i henhold til Joules lov,

og spændingskilden udvikler derfor varme under brug. Det endelige kredsløb ser derfor således ud:



Figur 8: Spændingskilden har en indre resistans og den bliver derfor varm under brug.

Størrelsen på den indre resistans kalder vi for  $R_i$  og derved får vi følgende udtryk for spændingskildens polspænding:

$$U_{pol} = U_0 - R_i \cdot I.$$

Dette udtryk er ligningen for spændingskildens belastningskarakteristik og kaldes også Ohms lov for en spændingskilde. Ligeledes får vi, at den maksimale strømstyrke er givet ved

$$I_{maks} = \frac{U_0}{R_i}$$

Der er altså tre størrelser, som karakteriserer en spændingskilde: hvilespændingen, den indre resistans og kortslutningsstrømmen.

### Opgave 11

Hvilespændingen på en spændingskilde er  $9,0\text{ V}$  og den indre resistans er på  $2,0\ \Omega$ .

- a) Beregn den maksimale strømstyrke, som kilden kan levere.

En resistor på  $47\ \Omega$  tilsluttes nu spændingskilden.

- b) Beregn strømstyrken i kredsløbet.
- c) Beregn spændingsfaldet over resistoren.
- d) Beregn forholdet mellem den afsatte energi i den ydre resistor og den afsatte energi i den indre resistor.

### Opgave 12

For en spændingskilde måles polspændingen til at være  $3,78\text{ V}$  og strømstyrken til at være  $550\text{ mA}$ . Hvis kilden skal levere yderligere  $450\text{ mA}$  falder polspændingen til  $1,24\text{ V}$ .

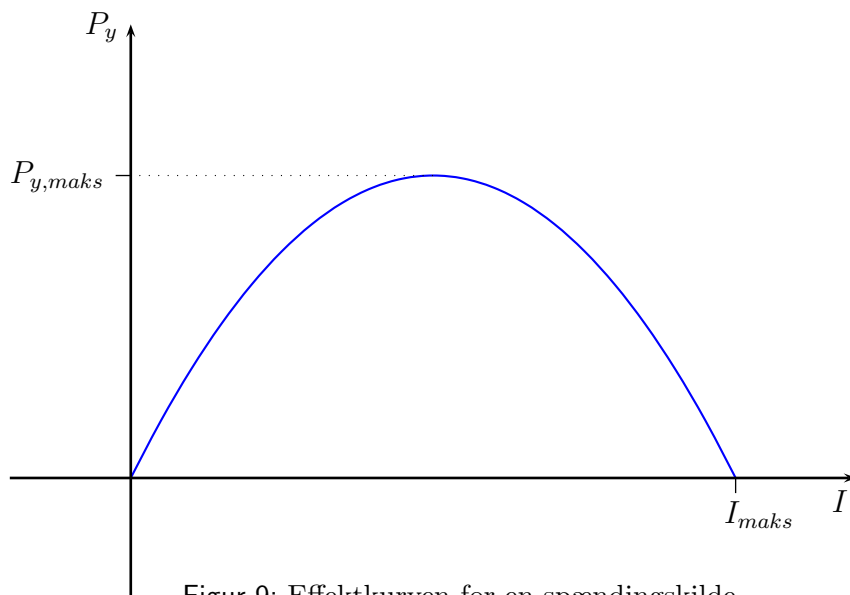
- a) Beregn den indre resistans.
- b) Beregn spændingskildens hvilespænding.
- c) Beregn spændingskilden kortslutningsstrøm.

Kombineres Ohmslov med effektformlen kan vi tegne en  $(I, P_y)$ -graf, som kaldes spændingskildens effektkurve.

### Opgave 13

Udled ligningen for spændingskildens effektkurve ved at kombinere Ohms lov for spændingskilder med effektformlen.

Kurven ser således ud:



Figur 9: Effektkurven for en spændingskilde.

### Opgave 14

Giv en fortolkning af effektkurven ovenfor. Udled et udtryk til beregning af  $P_{y,maks}$ .

## 5 Projektbeskrivelse

Projektet går ud på at undersøge en modelvindmølle nærmere ved at lave dens belastningskarakteristik og dens effektkurve. Forventningen er, at den følger ovenstående teori.

Modelvindmøllen kan købes færdig og klar til anvendelse hos de fleste producenter af eksperimentelt udstyr til skolebrug. Alternativ kan man forsøge at lave sin egen vindmølle. Der findes utallige videoer på youtube, som beskriver, hvordan man kan gøre. Uanset om man køber færdigt udstyr eller om man fremstiller det selv, skal der som minimum være følgende, hvis man ønsker at have muligheder nok til et helt eksperimentelt projekt:

- En passende vindmølle, hvor antal vinger og vingetyper kan varieres
- Forskellige vingetyper
- En regulerbar vindkilde
- En vindmåler
- En passende skydemodstand, som passer til vindmøllen

Eventuelt kan projektet udvides til også at omfatte karakteristikker for f.eks. en solcelle, et Li-ion-batteri eller en brændselscelle. Alle tre kilder kan fås færdige til skolebrug. Især hvis disse muligheder også inddrages, kan man åbne op for at sammenligne forskellige spændingskilder, da karakteristikkene for solcellen, Li-ion-batteriet og brændselscellen skiller sig ud fra vindmøllens karakteristik.

Projektet kan indeholde følgende:

- Karakteristikken for en vindmølle og eventuelt andre spændingskilder.
- Effektkurven for en vindmølle og eventuelt andre spændingskilder.
- En undersøgelse af, hvilken betydning antallet af vinger har.
- En undersøgelse af, hvilken vingetype, der giver den største effekt.
- Effekten som funktion af vindhastigheden.
- Karakteristikkens afhængighed af vindstyrken.
- Find selv på flere undersøgelser.

## 6 Kilder

*Spektrum 1*, Claussen, Both og Hartling, Gyldendal 2007, 1.udgave, 3. oplag.

*Grundlæggende fysik*, Øhlenschläger, Gyldendal 1988, 1. udgave, 1. oplag.

*Videregående fysik*, Øhlenschläger, Gyldendal 1991, 1. udgave. 1. oplag.

*Fysik i grundtræk, 1B Ellære*, Staffanson m.fl., Munksgaard 1977, 2. udgave, 1. oplag

*Fysikkens verden*, Elvekjær og Nielsen, Gjellerup og Gad 1988.