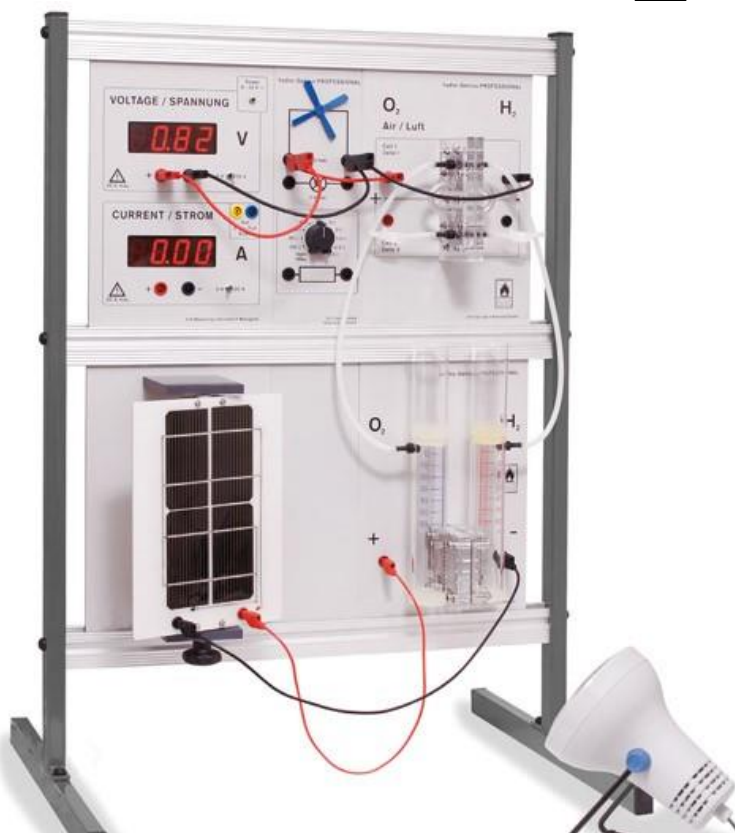


# Dr FuelCell® Professional

Experiment Guide



Dr FuelCell® Professional, Experiment Guide  
Version 1.1  
- Updated 2021

©Heliocentris Academia International GmbH  
Rudower Chaussee 30  
12489 Berlin  
Germany

Alle rechten voorbehouden. Geen enkel deel van deze experimentgids mag worden gereproduceerd, opgeslagen in een systeem voor het ophalen van gegevens of op enigerlei wijze worden verzonden zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. De volgende uitzondering is van toepassing: het kopiëren van pagina's uit de handleiding voor instructie voor of door docenten is toegestaan.

Components of the Dr FuelCell® Professional are protected by patents and / or utility patents.

FuelCell® Professional is a trademark of Heliocentris Academia International GmbH, Germany.

Wij behouden ons het recht voor om wijzigingen aan te brengen.

## Inhoud

P s1	Donkere en lichte IV karakteristieke curve van de zonnemodule	1
P s2	Fotostroom als functie van afstand en invalshoek van de lichtbron.	9
P e1	Karakteristieke Kromme van Electrolyser	16
P e2	Faraday's wetten	20
P e3	Faraday Efficiëntie en energie-efficiëntie van de elektrolyser	27
P b1	Karakteristieke krommen van de brandstofcel die parallel en in serie zijn verbonden	31
P b2	Faraday Efficiëntie en energie-efficiëntie van een brandstofcel	39
P b3	Faraday's <sup>1e</sup> wet met behulp van een brandstofcel	45
P g1	Water = 2 delen van waterstof + 1 deel van zuurstof	51

# P s1

## Donkere en lichte IV karakteristieke curve van de zonnemodule

Heliocentris 

### Benodigde materialen:

Laadmodule voor zonnemodule  
Demonstratie Ammeter/Voltmeter  
5 aansluitkabels

Geen inbegrepen componenten:  
Zwart karton (deels) DC-voeding  
(deel 1) Lamp (deel 2)  
100-150 W (deel 2)

Instructies: Volg de gebruiksaanwijzing!

### Part 1: Dark IV Curve

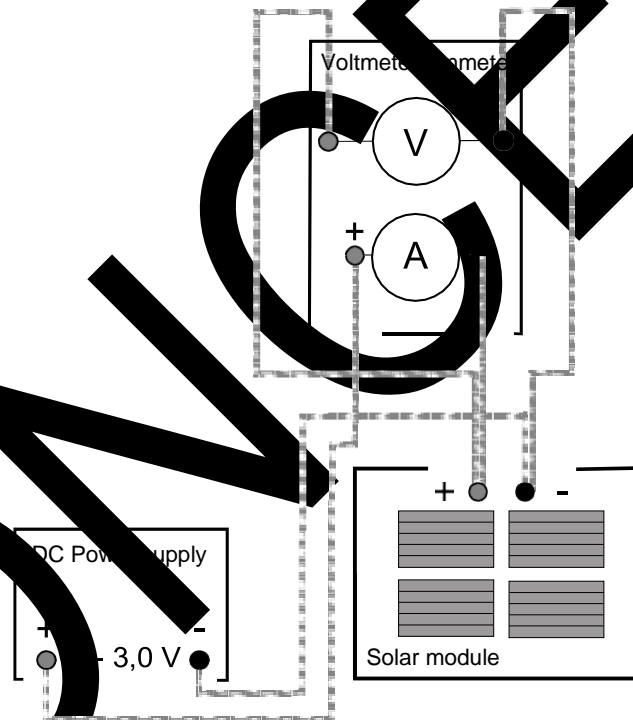


Fig. s1a

1. Plaats de zonnemodule op een stevige basis en bedek deze volledig met een stuk zwart karton.
2. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. s1a en sluit de zonnemodule aan op de DC-voeding in "voorwaartse richting", d.w.z. de positieve terminal van de DC-voeding met de positieve terminal van de zonnemodule en de negatieve terminal van de DC-voeding met de negatieve terminal van de zonnemodule.
3. Pas de gelijkstroomtoevoer aan op verschillende spanningen (in stappen van 0,5 volt tussen 0 en 1,5 volt en in stappen van 0,2 volt tussen 1,5 en 2,5 volt) en meet de donkere stroom en spanning.

**De spanning over de DC-voeding mag niet hoger zijn dan 3,0 volt!**

Tabel met metingen:

Voltage / V	Current / mA

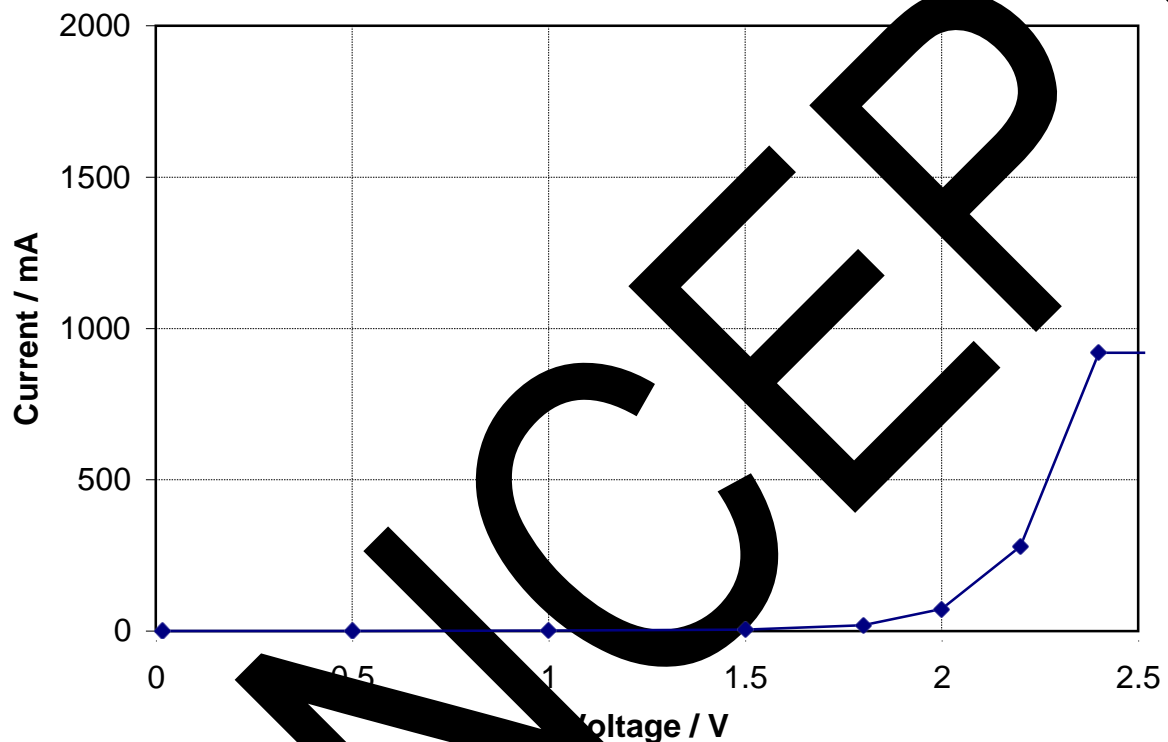
Evaluatie:

1. Teken het IV-diagram (linkere IV-karakteristieke curve van de zonnemodule).
2. Interpreteer deze karakteristieke curve.

### Interpretation/Notes:

The dark IV curve of a solar module corresponds to the IV curve of a semiconductor diode:

**Dark IV curve of the solar module**



### Evaluatie:

1. Teken het IV-diagram (donkere IV-karakteristieke curve van de zonnemodule).
2. Interpretatie deze karakteristieke curve.

### Interpretatie/Opmerkingen:

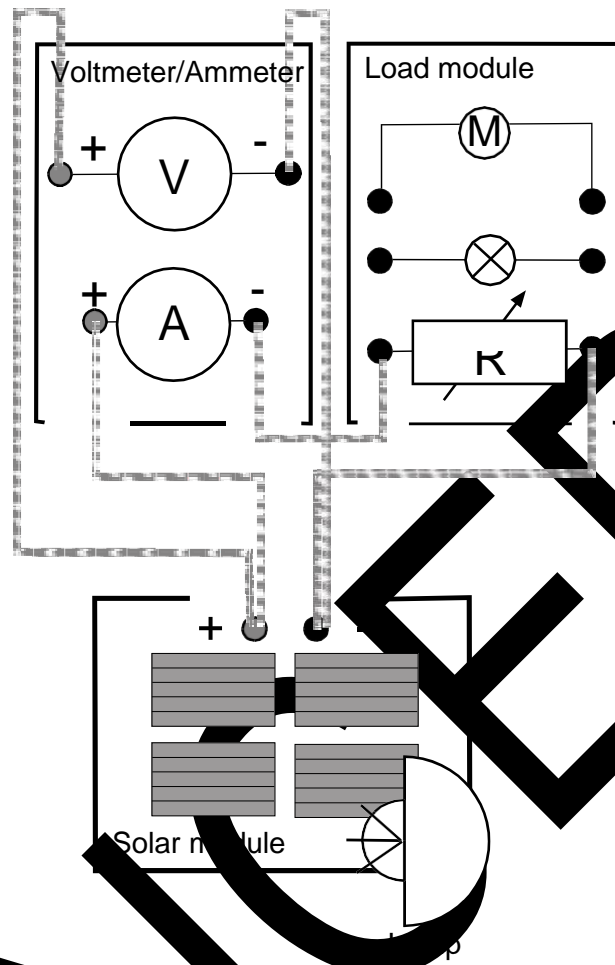
De donkere IV-curve van een zonnemodule komt overeen met de IV-curve van een halfgeleiderdode:

## Donkere IV curve van de zonnemodule

Als de zonnemodule in voorwaartse richting wordt aangesloten, worden de elektronen gedreven in de barrièrelaag. Dit maakt het weer geleidend, zodat een stroom door de diode kan stromen.

Als de polariteit omgekeerd is, wordt dit de omgekeerde richting genoemd.

U dit verifiëren met een klein experiment. Swap over de polariteit op de DC voeding volgens Fig. s1a en geleidelijk verhogen van de spanning. Wat gebeurt er met de stroom? **(Deze meting mag alleen worden uitgevoerd binnen een bereik van 0 tot 1 volt, anders wordt de zonnemodule vernietigd.)**



1. Stel het apparaat in zoals aangegeven in Fig. s1b.
2. Verlicht de zonnemodule goed met een lamp. De afstand tussen de lamp en de zonnemodule moet ongeveer 5 cm zijn, de kortsluitingsstroom moet ongeveer 700 mA zijn).
3. Wacht ongeveer 5 minuten tot de module is opgewarmd en de karakteristieke curve kan worden geregistreerd bij een relatief constante temperatuur.
4. Begin met het meten van de kortsluitingsstroom (door de weerstanden af te korten). Meet vervolgens de spanning en stroom bij verschillende weerstanden (0,3, 0,5, 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50, 100 Ω). De uiteindelijke meting vindt plaats in de "OPEN" positie.



Tabel met metingen:

Resistance / $\Omega$	Voltage / V	Current / mA

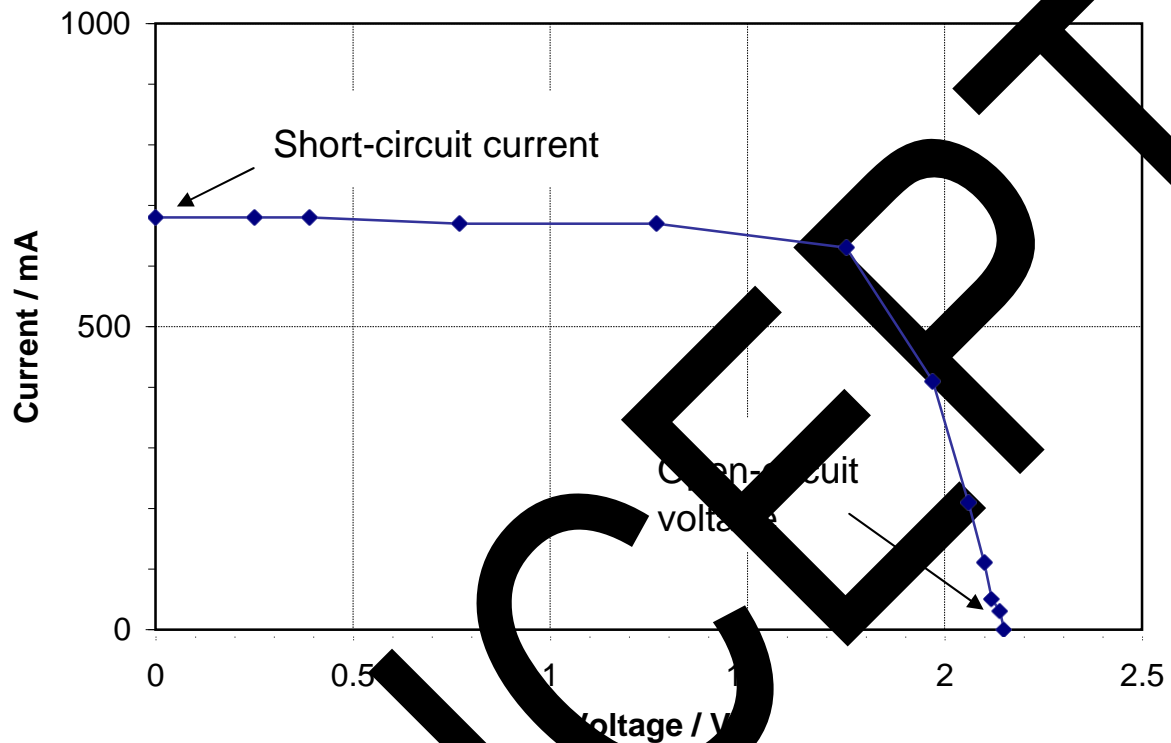
Evaluatie

1. Teken het diagram (licht-IV-curve van de zonnemodule).
2. Interpreteer de karakteristieke curve.

Bepaal het maximale vermogenspunt (MPP) door een grafiek te tekenen die het vermogen ( $P = V \times I$ ) tegen de spanning samenstelt.

## Results:

### Licht IV curve van de zonnemodule



De volgende gegevens zijn van belang bij het bekijken van een karakteristieke curve:

1. de open-circuitspanning (draaischakelaar "OPEN"),
2. kortsluitingsstroom en
3. het maximum vermogenspunt.

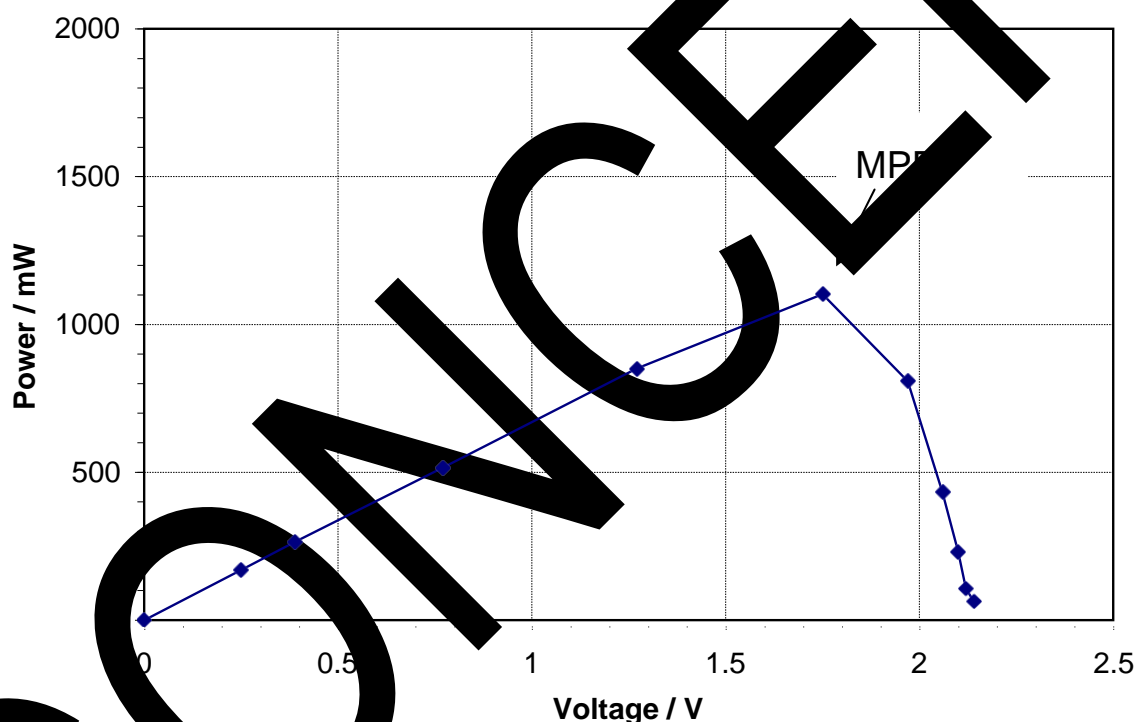
Wanneer er geen stroomafvoer is, heeft de zonnemodule een open-circuitspanning van ongeveer 2,15 volt ( $R = \infty$ ). Een individuele silicium paneel heeft meestal een open-circuit spanning van 0,5 - 0,6 volt.

Als we kortsluiting van de zonne-module ( $R = 0 \Omega$ ), de maximale stroom (kortsluiting stroom) stroomt. In ons voorbeeld van een karakteristieke curve bedraagt de kortsluitingsstroom ongeveer 680 mA.

Het maximale vermogenspunt "MPP" verwijst naar het punt waarop de zonnemodule zijn maximale vermogen op een specifiek bestralingsniveau kan produceren. Dit punt bevindt zich op de "knie" van de IV karakteristieke curve en kan worden bepaald door twee verschillende methoden:

1. Door het tekenen van de rechthoek met het grootst mogelijke gebied binnen de IV karakteristieke curve ( $P = V \times I$ ).
2. Door het tekenen van een PV-diagram en het lezen van de waarde van het maximale vermogen.

De kromme van het vermogen van de zonnemodule



In ons voorbeeld meting, de MPP is op ongeveer 1100 mW.

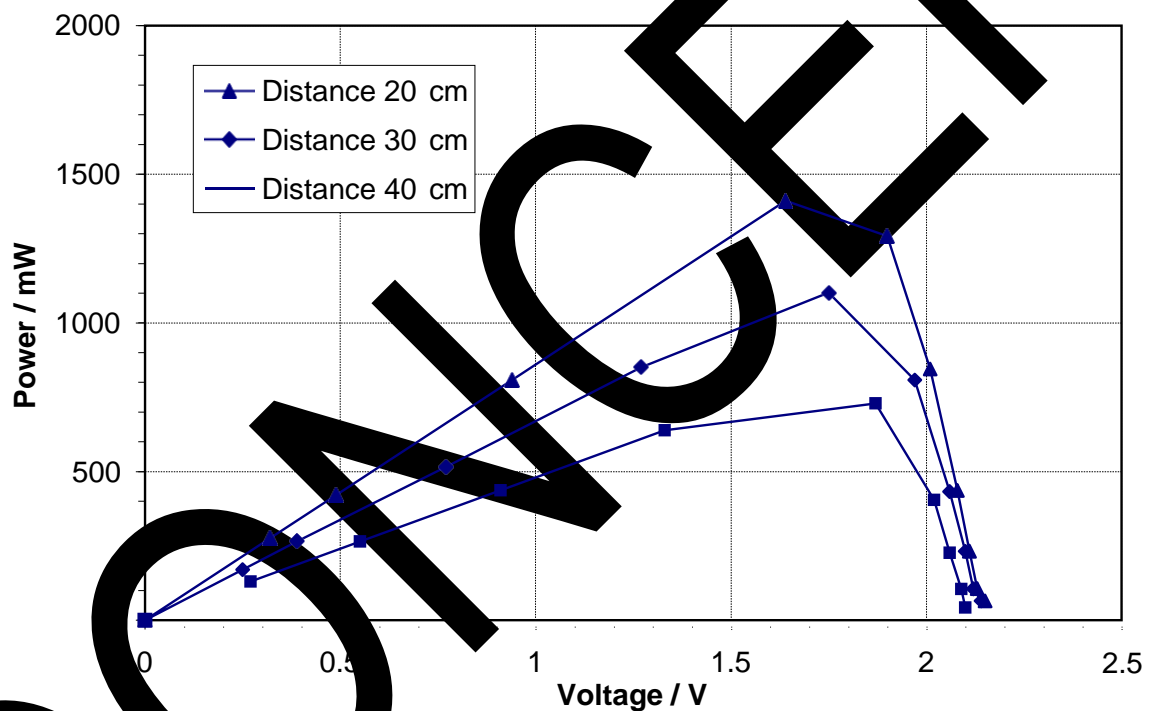
Het aanpassen van een zonnemodule aan de kracht van de respectieve bestralings speelt een cruciale rol in praktische toepassingen. Waar mogelijk moet het vermogen van de lading altijd dicht bij het MPP liggen.

### Experimentvarianties:

U de invloed van lichtintensiteit op de kracht van de zonnemodule bepalen. Om dit te doen, registreert u nog twee karakteristieke bochten, die de afstand tussen de lamp en de zonnemodule wijzigen (bijvoorbeeld tot 20 cm en 40 cm).

**Op een afstand van 20 cm mag de zonnemodule alleen worden verlicht voor de duur van het experiment.**

Teken grafieken plotten P tegen V en vergelijk ze met het diagram op een lampafstand van 30 cm.



**P s2**

**Photocurrent als functie  
van afstand en  
Invalshoek van de  
lichtbron**

**Heliocentris**

**Benodigde materialen:**

Zonnemodule  
Demonstratie Ammeter/Voltmeter  
2 aansluitkabels

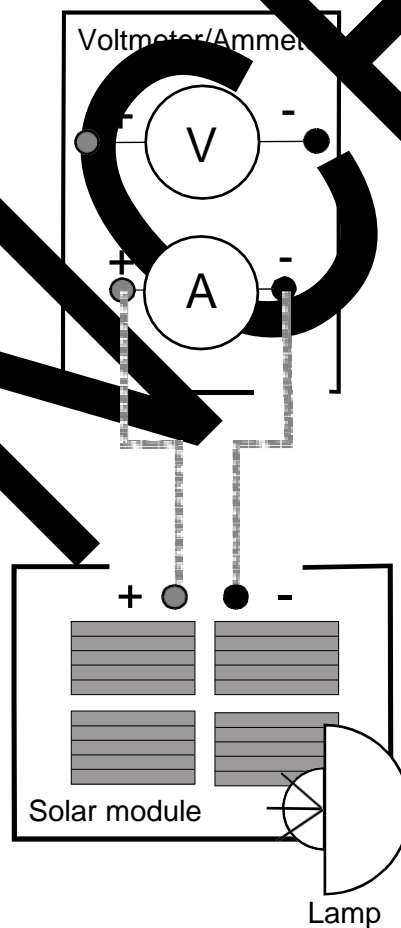
Geen inbegrepen componenten:

1-2 lampen 100-150W  
Protractor

**Instructies:**

Volg de gebruiksaanwijzing

**Fig. s2**



1. Stel het apparaat zoals afgebeeld in Fig. s2.
2. Plaats de zonnemodule met behulp van een protractor op positie  $0^\circ$  (loodrecht op de lichtbron) en verlicht deze goed met de lamp (bij een stroom van ongeveer 400 mA). De afstand tussen de lamp en de zonnemodule is in dit geval normaal gesproken ongeveer 50 cm. Als de lamp een gelijkmatige verlichting niet kan garanderen, moet u voor dit experiment twee lampen gebruiken.
3. De invallende hoek van het licht kan worden aangepast door de zonnemodule te kantelen en de invalshoek met de protractor te meten.

**Wees voorzichtig bij het aanraken van de zonne-module, want het wordt erg warm!**

Meet de fotostroom (kortsluitingsstroom) onder verschillende invalshoeken (in  $10^\circ$  stappen tussen  $0^\circ$  en  $90^\circ$ ). Draai de zonnemodule zowel naar links als naar rechts. Neem metingen voor beide richtingen en bereken het gemiddelde. Dit compenseert schommelingen op het balkpad.

4. In een tweede experiment pas de afstand  $d$  tussen de lamp en de zonnemodule aan en meet de fotostroom op verschillende afstanden (in stappen van 5 cm tussen 50 en 150 cm).

CONCEPT

Tabel met metingen:

[1] Afhankelijkheid van hoek

$\alpha / ^\circ$	Current /mA (left)	Current /mA (right)	Current /mA (aver.)

[2] Afhankelijkheid van afstand

d / cm	Current/ mA

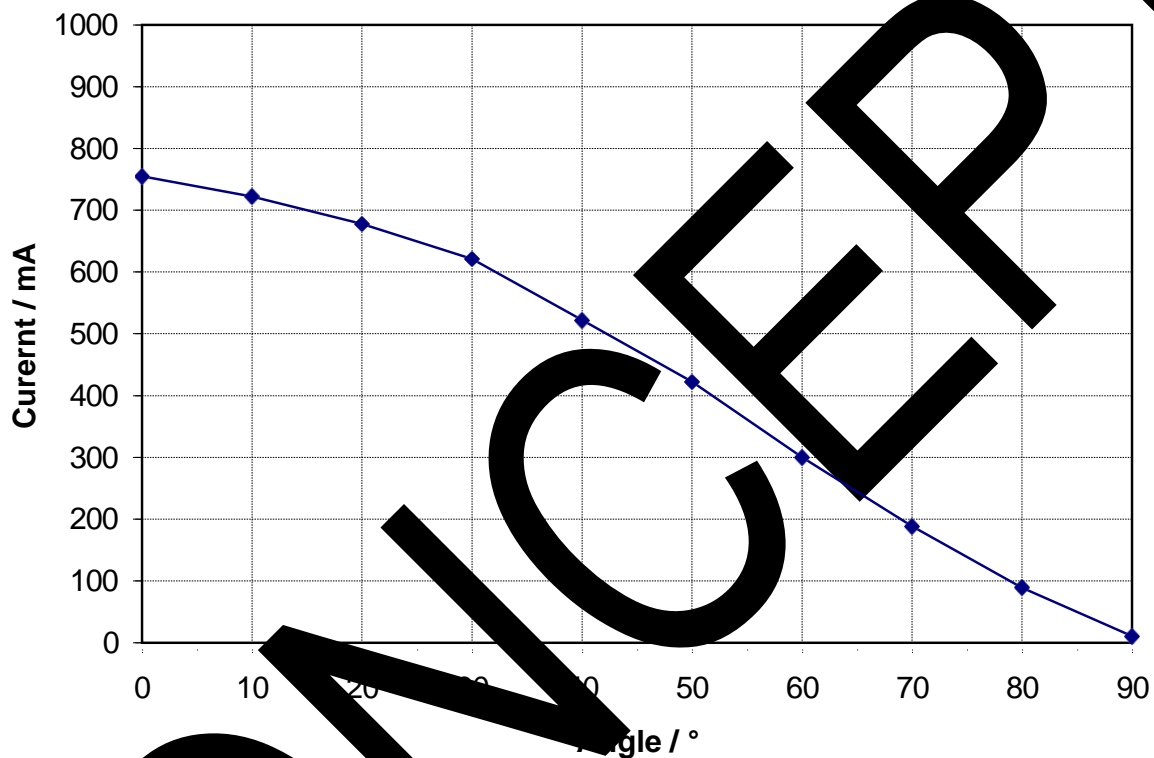
Evaluatie:

1. Teken de  $I-\alpha$  and  $I-\cos \alpha$  diagram.
2. Teken de  $I-d$  and  $I-1/d^2$  diagram.
1. Wat zijn de functionele relaties en welke effecten hebben ze op praktische toepassingen?

## Resultaten:

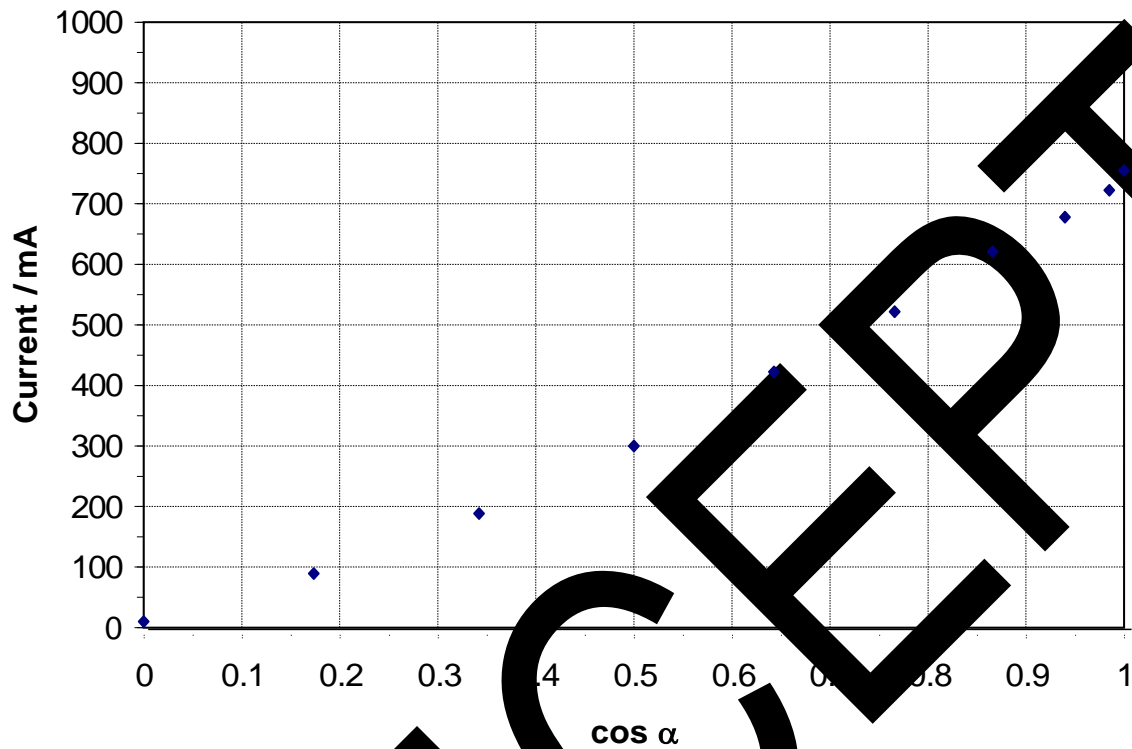
Het vermogen van zonnepanelen wordt direct bepaald door de respectieve bestralingsomstandigheden. Een zonnemodule kan schommelingen in de stralingstoevoer niet compenseren.

De fotostroom is het hoogst wanneer het licht de zonnemodule loodrecht raakt.



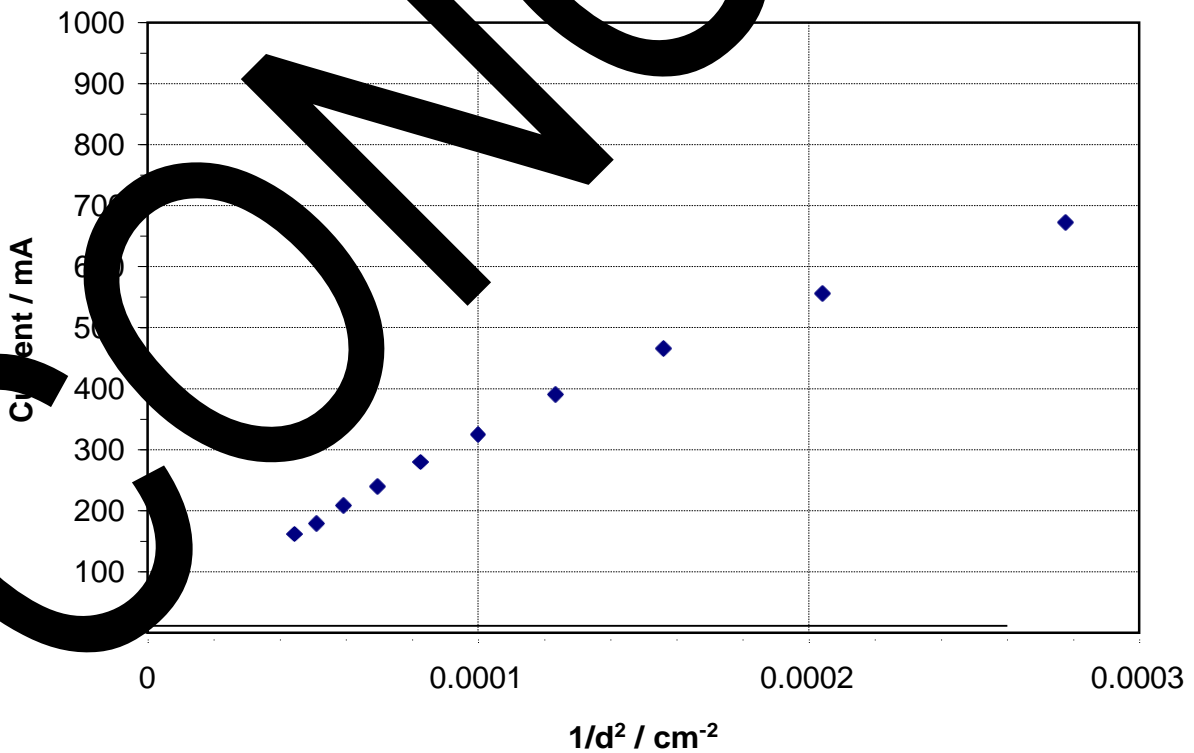
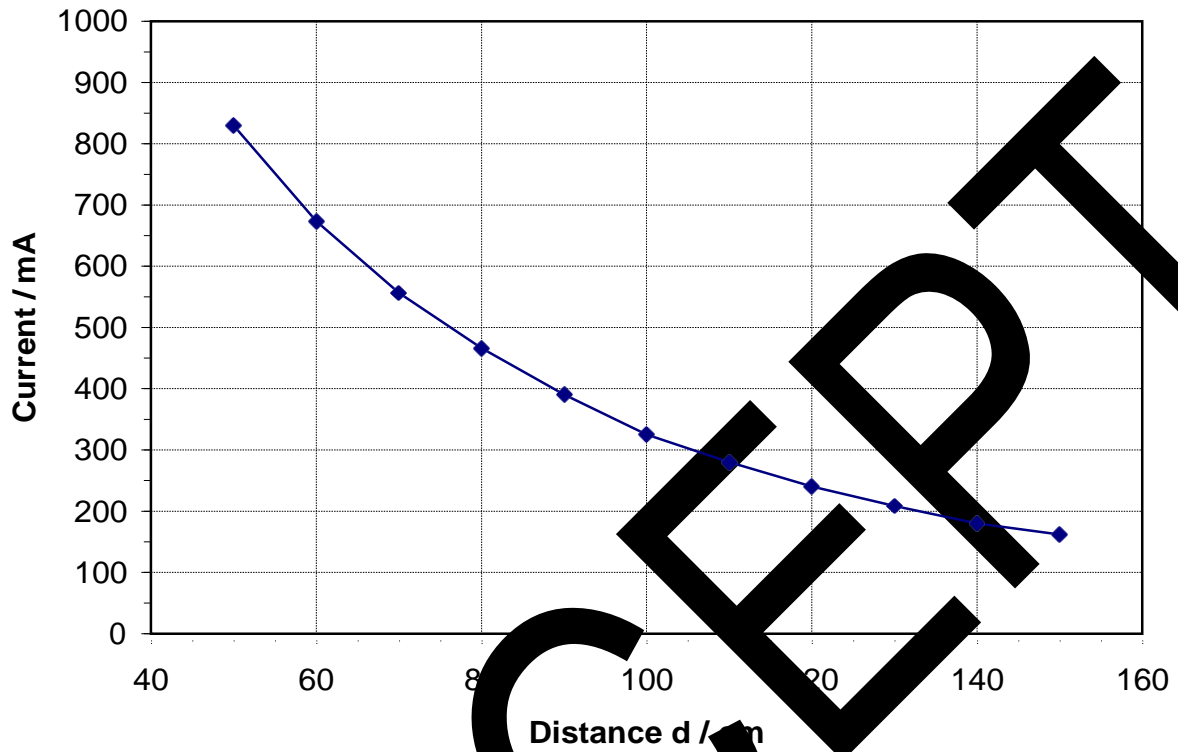


De fotostroom van de zonnemodule is evenredig aan de cosinus van de invalshoek ( $I \propto \cos \alpha$ ):



Opmerking: afwijkingen van de ideale cosinuswet worden veroorzaakt door schommelingen in de hoeveelheid licht

De fotostroom van de zonnemodule neemt af in verhouding tot de toenemende afstand van de lichtbron.



De fotostroom van de zonnemodule is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand van de lichtbron ( $I \propto 1/d^2$ ).

De afhankelijkheid van de fotostroom van de invalshoek, bijvoorbeeld de hoogtehoek van de zon, is belangrijk wanneer zonnepanelen worden geïnstalleerd.

Zo varieert de maximale hoogtehoek van de zon (op 12 uur 's ochtend) in het zuiden van Duitsland (48° noorderbreedte)

- 65.5° on June 21<sup>st</sup> and
- 18.5° on December 21<sup>st</sup>.

Wanneer grootschalige zonne-installaties worden geïnstalleerd, daarom, zijn ze uitgelijnd op de loop van de horizon van de zon van de hoogte.

Het richten van de zonnepanelen naar het zuiden (b.v. op het dak van een gebouw) blijkt gunstig te zijn. Vanwege dit het mogelijk maakt om de straling zowel in de ochtend als in de middag aan te nemen.

**P e1**

**Karakteristieke Kromme  
van Electrolyser**

**Heliocentris**

**Benodigde materialen:**

Zonnemodule

Elektrolyser

Demonstratie Ammeter/Voltmeter

Lamp 100-150 watt

5 aansluitkabels

Geen inbegrepen

componenten: Gedestilleerd

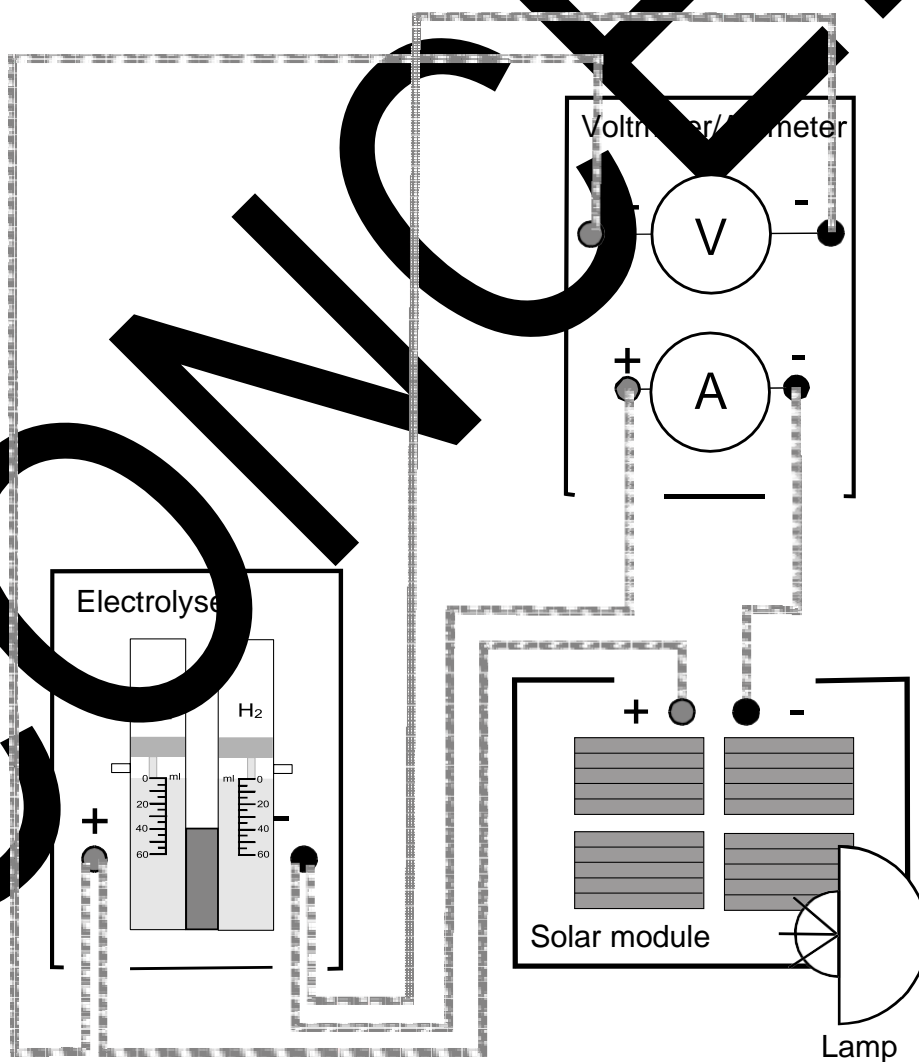
water

**Instructies:**

**Volg de gebruiksaanwijzing!**

**Draag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!**

**Fig. e1**



1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. e1. Als alternatief voor de zonnemodule u ook een DC-voeding gebruiken om hogere stromen te meten. **NB: pas slechts voor een korte tijd spanningen boven de 1,8 volt toe. Pas nooit spanningen aan boven 2 volt. Controleer de polariteit!** De positieve terminal van de zonnemodule (gelijkstroomlevering) moet op de positieve eind van de elektrolyser, en de negatieve eindterminal van de zonnemodule (gelijkstroomlevering) aan de negatieve eind van elektrolyser worden aangesloten.
2. Varieer de lichtintensiteit om de stroom van de zonnemodule aan te passen, d.w.z. draai de zonnemodule onder verschillende hoeken aan het invallende licht te draaien (zie experiment 2). Stel verschillende huidige waarden in, beginnend bij kleine stromen van ca. 30 mA en tot ongeveer 800 mA (afhankelijk van het gebruikte type lamp; met dc-voeding tot ongeveer 1 ampère). Ook metingen opnemen van de elektrolyser spanning. Neem ten minste 8 paar metingen van elektrolyse stroom en spanning en voer de waarden in de tabel van de metingen.

CONCEPT

Tabel met metingen:

Voltage / V	Current / mA

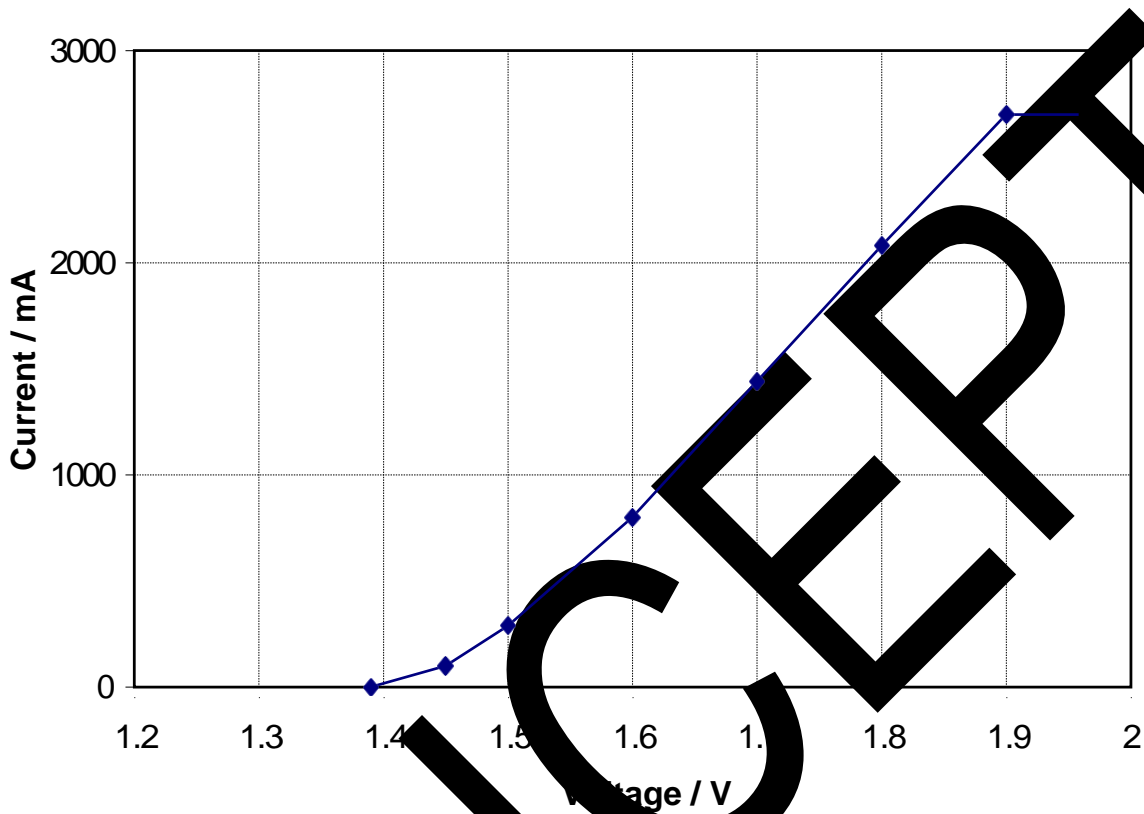
Evaluatie:

1. Teken de IV-karakteristieke curve van de elektrolyser.

Interpreteer de IV-karakteristieke curve.

## Resultaten:

### Karakteristieke curve van de elektrolyser



De stroomspanningscurve laat zien dat een merkbare stroom pas begint te stromen bij een bepaalde spanning (afbraakspanning) en dat deze dan continu stijgt. Hoe hoog is deze spanning?

Een kleine spanning (bijvoorbeeld 1,2 volt) verrekent geen elektrolyse, stroom die zou leiden tot het vrijkomen van waterstof bij de kathode en zuurstof bij de anode.

Een toename van de externe spanning boven de afbraakspanning leidt tot continue ontwikkeling en een sterke stijging van de elektrolysestroom.

### Benodigde materialen:

Zonnemodule  
 Elektrolyser  
 Demonstratie Ammeter/Voltmeter Lamp 100-150 watt

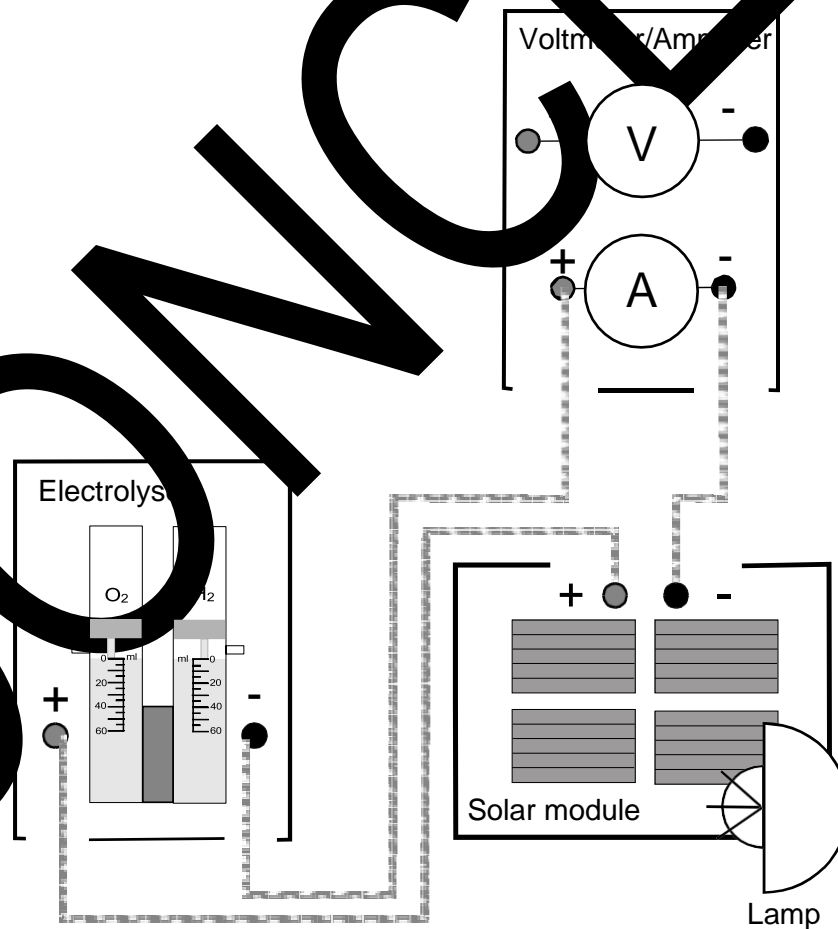
3 aansluitkabels Krokobuis  
 Tube clip Stop  
 horloge  
 Geen inbrengen componenten  
 Gedroogde elektrolyt

### Instructies:

**Volg de gebruiksaanwijzing!**

**Draag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!**

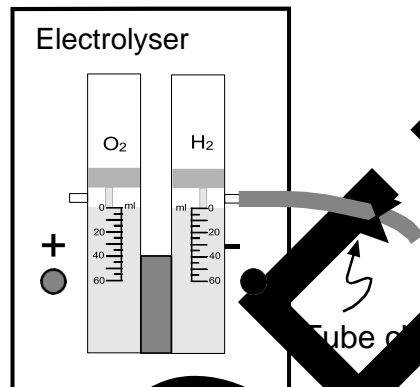
Fig. e2a





1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. e2a.  
**Controleer de polariteit!** De positieve terminal van de zonnemodule moet worden aangesloten op de positieve terminal van de elektrolyser en de negatieve terminal van de zonnemodule op de negatieve terminal van de elektrolyser.
2. Zorg ervoor dat beide gasopslagcilinders van de elektrolyser tot 0 ml met gedestilleerd water worden gevuld. Om de meting te nemen, sluit u de waterstofopslagcilinder af met een klemclip (zie Fig. e2b). De geproduceerde waterstof wordt dan in de opslagcilinder opgevangen.

Fig. e2b



1. Pas de zonnemodule aan om een constante stroom (bijvoorbeeld 185 mA) te leveren en meet het volume waterstof dat over verschillende perioden wordt opgeleverd (60 tot 210 s in stappen van 30 s) [Tabel van meting 1]
2. Een constante tijd voorschrijven ( $t = 180$  s). Stel verschillende stromingen in door de zonnemodule onder verschillende hoeken in te stellen (in stappen van 200 mA tussen 200 mA en 800 mA) en meet het volume waterstof dat bij deze stromingen wordt opgewekt. [Meettafel 2]

**De meetwaarde van 800 mA vereist een zonnepaneel met een sterke lamp. De zonnemodule mag alleen worden gebruikt in een ruimte die goed wordt verlicht voor de duur van de meting.**

Tabel met afmetingen:

1. Afhankelijkheid van tijd

$I =$              $\text{mA} = \text{constant}$

Time / s	Volume $\text{H}_2$ / ml

[2] Afhankelijkheid van de huidige

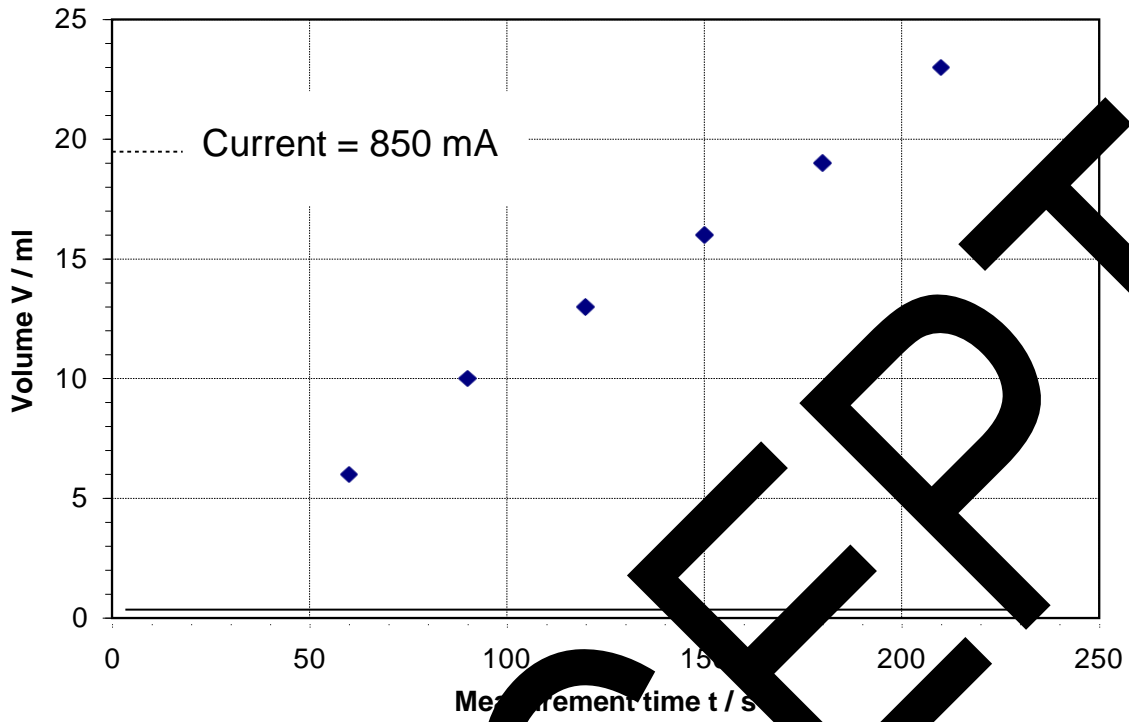
$t =$              $\text{s} = \text{constant}$

Current / mA	Volume $\text{H}_2$ / ml

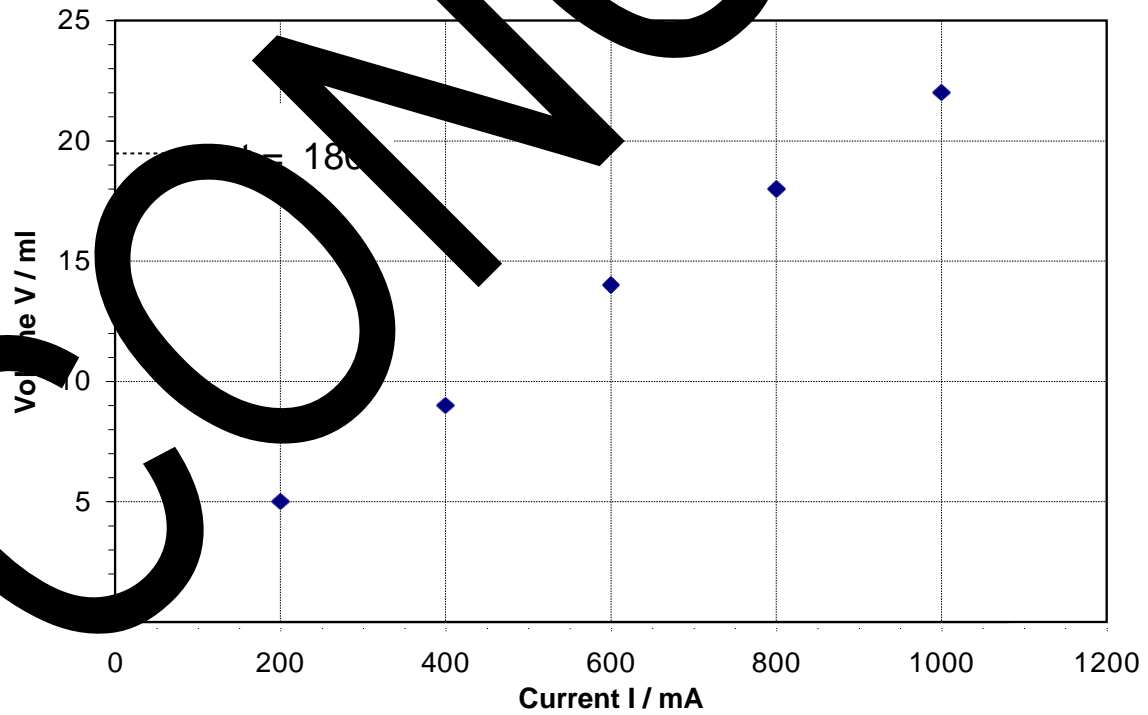
Evaluatie:

1. Teken twee grafieken uit op basis van de metingen uit tabellen [1] en [2] (volume versus tijd en volume versus stroom).
2. Onderzoek de relatie tussen het volume van de vrijgekomen waterstof en de vervoerde lading (Faraday's<sup>1e</sup> wet).
3. Leid Faraday's<sup>2e</sup> wet af.

### Afhankelijkheid van waterstofproductie op tijd



### Afhankelijkheid van waterstofproductie van stroom



## Faraday's 1<sup>st</sup> law

Grafiek 1 toont aan dat het volume van waterstof vrijgegeven (bij een constante stroom) evenredig is aan de tijd.

$$V \propto t$$

Grafiek 2 toont de evenredigheid tussen het vrijgekomen waterstofvolume en de stroom (op constante tijd).

$$V \propto I$$

If  $V \propto t$  and  $V \propto I$ , then:

$$V \propto I \cdot t.$$

Since  $I \cdot t = Q$  (elektrische lading), volgt hieruit dat

$$V \propto Q$$

Ten slotte is de relatie tussen  $V$  en  $Q$   $n$  keer  $V_m$

$$V = n \cdot V_m$$

Leidt tot Faraday's 1<sup>st</sup> law

De hoeveelheid materiaal dat elektrolytisch vrijkomt,  $n$ , is evenredig aan tijd  $t$  en stroom  $I$ , d.w.z. naar de vervoerde elektrische lading  $Q$  ( $n \propto Q$ ).

## Aftrek van Faraday's<sup>2e</sup> wet

De resultaten van een meetpunt van Experiment e2 gebruiken

$$I = 850 \text{ mA} = 0.85 \text{ A} \quad \text{and} \quad t = 180 \text{ s}$$

en de hoeveelheid waterstof die vrijkomt

$$V = 19 \text{ ml},$$

de heffing  $Q$  die stromen kunnen worden berekend en ingevuld in verhouding tot de hoeveelheid materiaal die vrijkomt:

$$Q = I \cdot t$$

$$Q = 0.85 \text{ A} \cdot 180 \text{ s} = 153 \text{ As} = 153 \text{ C}$$

19 ml waterstof komt vrij door een elektrische lading van 153 C.

De molaire lading  $Q_m$  is nodig om 1 mol waterstof vrij te geven:

$$Q_m = \frac{Q}{n} = \frac{Q}{V_m}$$

$$Q_m = \frac{Q \cdot V_m}{V}$$

$$V_m = 24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (20^\circ\text{C}, \text{ normal pressure})$$

$$Q_m = \frac{153 \text{ C} \cdot 24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}}{0.019 \text{ l}} = 193,300 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Het cijfer 193.300 C is de experimenteel bepaalde hoeveelheid lading die stroomt wanneer 1 mol waterstofgas vrijkomt.

Nauwkeuriger onderzoek heeft aangetoond dat 1 mol van niet-ivalent ionen een lading van 96.484 C vervoeren. De materiaalgerelateerde lading  $Q_m = 96.484 \text{ C mol}^{-1}$  wordt de Faraday constante  $F$  genoemd.

$$Q_m = z \cdot F ,$$

waar  $z$  het aantal elektronen is dat wordt uitgewisseld om één deeltje bij de elektrode vrij te geven. In het geval van het vrijkomen van waterstof,  $z = 2$ . De theoretische waarde van  $Q_m$  kan worden afgeleid uit deze:

$$Q_m(H_2) = 2 \cdot F = 192,968 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} .$$

Een vergelijking tussen deze theoretische waarde en de experimenteel bepaalde molaire lading voor waterstof resulteert in een (zeer) kleine afwijking.

**Faraday's 2<sup>nd</sup> law** van toepassing op de relatie tussen lading  $Q$  en willekeurige hoeveelheden materiaal:

$$Q = n \cdot z \cdot F \quad \text{or} \quad I \cdot t = n \cdot z \cdot F$$

# P e3

## Faraday Efficiëntie en energie-efficiëntie van de elektrolyser



### Benodigde materialen:

- Zonnemodule
- Elektrolyser
- Demonstratie Ammeter/Voltmeter Lamp
- 100-150 watt

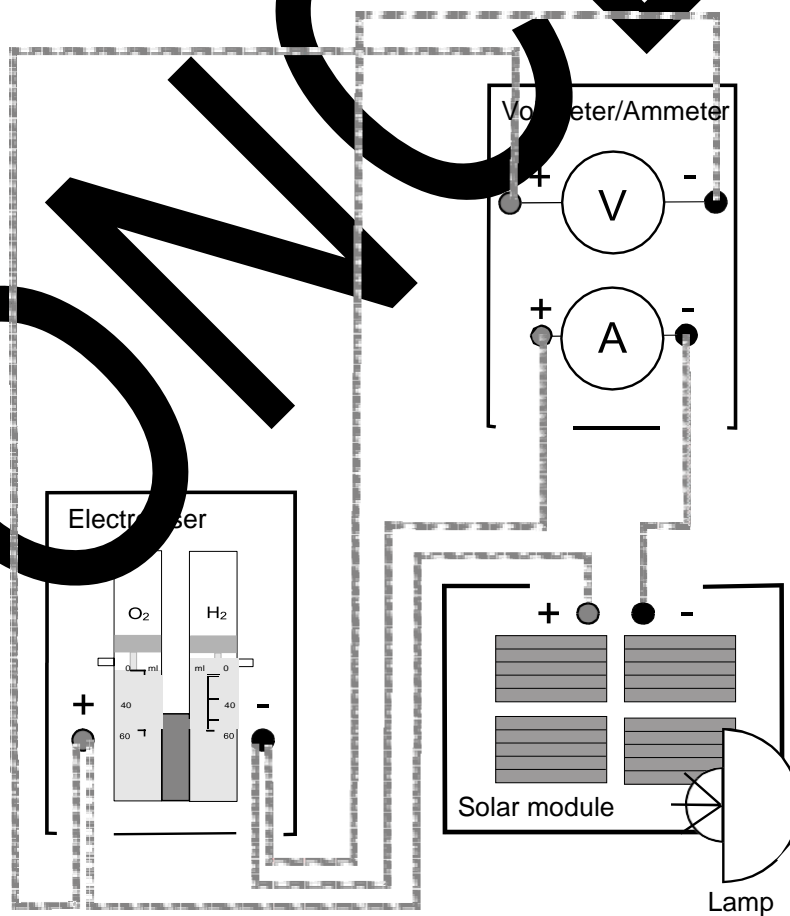
- 5 aansluitingskabels (1 x 2e buis)
- Tube clip
- Stop watch
- Geen inbrengen
- componenten: Gedestilleerd water

### Instructies:

Volg de gebruiksaanwijzing

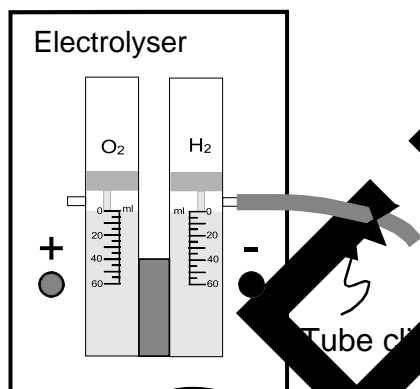
Draag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!

Fig. e3a



1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. e3a.  
**Controleer de polariteit!** De positieve terminal van de zonnemodule moet worden aangesloten op de positieve terminal van de elektrolyser en de negatieve terminal van de zonnemodule op de negatieve terminal van de elektrolyser.
2. Zorg ervoor dat beide gasopslagcilinders van de elektrolyser tot 0 ml met gedestilleerd water worden gevuld. Om de meting te nemen, sluit u de waterstofopslagcilinder af met een clips (zie Fig. e3b). De geproduceerde waterstof wordt dan in de opslagcilinder opgevangen.

**Fig. e3b**



1. Pas de verlichte zonnemodule aan om een constante elektrolyse stroom (voorbeeld 800 mA) te leveren en meet het volume waterstof dat over een bepaalde periode wordt opgevangen. Neem drie metingen over dezelfde periode (bijvoorbeeld  $t = 240$  sec.) en gebruik de gemiddelde waarde van de opgeslagen waterstof voor uw berekeningen.

Tabel met metingen

Time =	s	$V_1 =$	ml	$V_{average} =$	ml
Voltage =	V	$V_2 =$	ml		
Current =	mA	$V_3 =$	ml		

Evaluatie

1. Bepaal de Faraday-efficiëntie van de elektrolyser.
2. Bepaal de energie-efficiëntie van de elektrolyser.



### Berekening van de Faraday-efficiëntie van de elektrolyser:

De Faraday-efficiëntie  $\eta_F$  is de verhouding tussen het experimenteel bepaalde volume waterstof en het theoretisch te verwachten volume waterstof:

$$\eta_F = \frac{V_{H_2 \text{ experimental}}}{V_{H_2 \text{ theoretical}}}$$

De Faraday-efficiëntie van de elektrolyser moet dicht bij 1 (100 %) zijn. Faraday's<sup>2e</sup> wet maakt het mogelijk om het volume van waterstof theoretisch te berekenen (aanname: elektrolyse stroom 800 mA voor 240 s).

$$I \cdot t = n \cdot z \cdot F$$

$$n = \frac{V}{V_m}$$

$$V_{H_2 \text{ theoretical}} = \frac{I \cdot t \cdot V_m}{z \cdot F}$$

$$V_{H_2 \text{ theoretical}} = \frac{0.8 \text{ A} \cdot 240 \text{ s} \cdot 24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}}{2 \cdot 96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0.02388 \text{ l} = 23.88 \text{ ml}$$

### Measurement results

Time =	240 s	V <sub>1</sub> =	23 ml	V <sub>average</sub> =	23.5 ml
Voltage =	1.5 V	V <sub>2</sub> =	24 ml		
Current =	800 mA	V <sub>3</sub> =	23.5 ml		

Given a Faraday efficiency of:

$$\eta_F = \frac{V_{H_2 \text{ experimental}}}{V_{H_2 \text{ theoretical}}} = \frac{23.5 \text{ ml}}{23.88 \text{ ml}} = 0.98$$

De Faraday-efficiëntie drukt uit hoeveel van de stroom die is gestroomd, wordt omgezet in de gewenste reactie. Als het veel kleiner was dan één (100 %), zou dit betekenen dat er secundaire reacties in het systeem plaatsvonden (bijvoorbeeld corrosie). Dit zou de levensduur van de elektrolyser verkorten en een hogere energie-input noodzakelijk maken.

### Berekening van de energie-efficiëntie van de elektrolyser:

De energie-efficiëntie  $\eta_E$  van de elektrolyser is de verhouding tussen het energiegehalte van de opgewekte waterstof en de benodigde hoeveelheid elektrische energie.

$$\eta_E = \frac{\text{Energy content of hydrogen}}{\text{electrical energy}}$$

$$\eta_E = \frac{H_{0H_2} \cdot V_{H_2 \text{ experimental}}}{U \cdot I \cdot t}$$

De calorische waarde  $H$  is de hoeveelheid warmte die komt bij de combustie van een specifiek volume (e.g.  $1 \text{ m}^3$ ) gas. De bruto calorische waarde  $H_0$  wordt geciteerd als het naverbrandingsproduct achtergelaten water in vloeibare vorm is. De bruto calorische waarde van waterstof  $H_{0H_2}$  bij een temperatuur van  $20^\circ\text{C}$  is  $11,920 \text{ kJ/m}^3$ .

In ons voorbeeld bedraagt de energie-efficiëntie:

$$\eta_E = \frac{11,920 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 240 \text{ ml}}{1.587 \text{ V} \cdot 0.8 \text{ A} \cdot 240 \text{ s}} = 0.92$$

Units:

$\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$	$1 \text{ m}^3$
$1 \text{ J}$	$10^{-3} \text{ m}^3$

De energie-efficiëntie van een elektrolyser varieert met spanning. Dit is belangrijk voor technische toepassingen, omdat, als de spanning wordt verhoogd, meer waterstof wordt geproduceerd, maar de energie-efficiëntie afneemt. In de praktijk moet daarom het optimale bedieningspunt worden gevonden. De energie-efficiëntie moet zo hoog mogelijk zijn, omdat elektrische energie duur is.

Commerciële systemen bereiken een energie-efficiëntie van 90 %, d.w.z. ze werken op lage overpotentials (zie Experiment e1).

# P b1

Karakteristieke krommen van de brandstofcel die parallel en in serie zijn verbonden

Heliocentris 

## Benodigde materialen:

Solar module

Electrolyser Fuel cell

Load module

Demonstratie Ammeter/Voltmeter

Lamp 100-150 watt

9 aansluitkabels

2 lange buizen

2 korte buizen

2 buisclips

Geen inspanningen componenten:

Geestille water

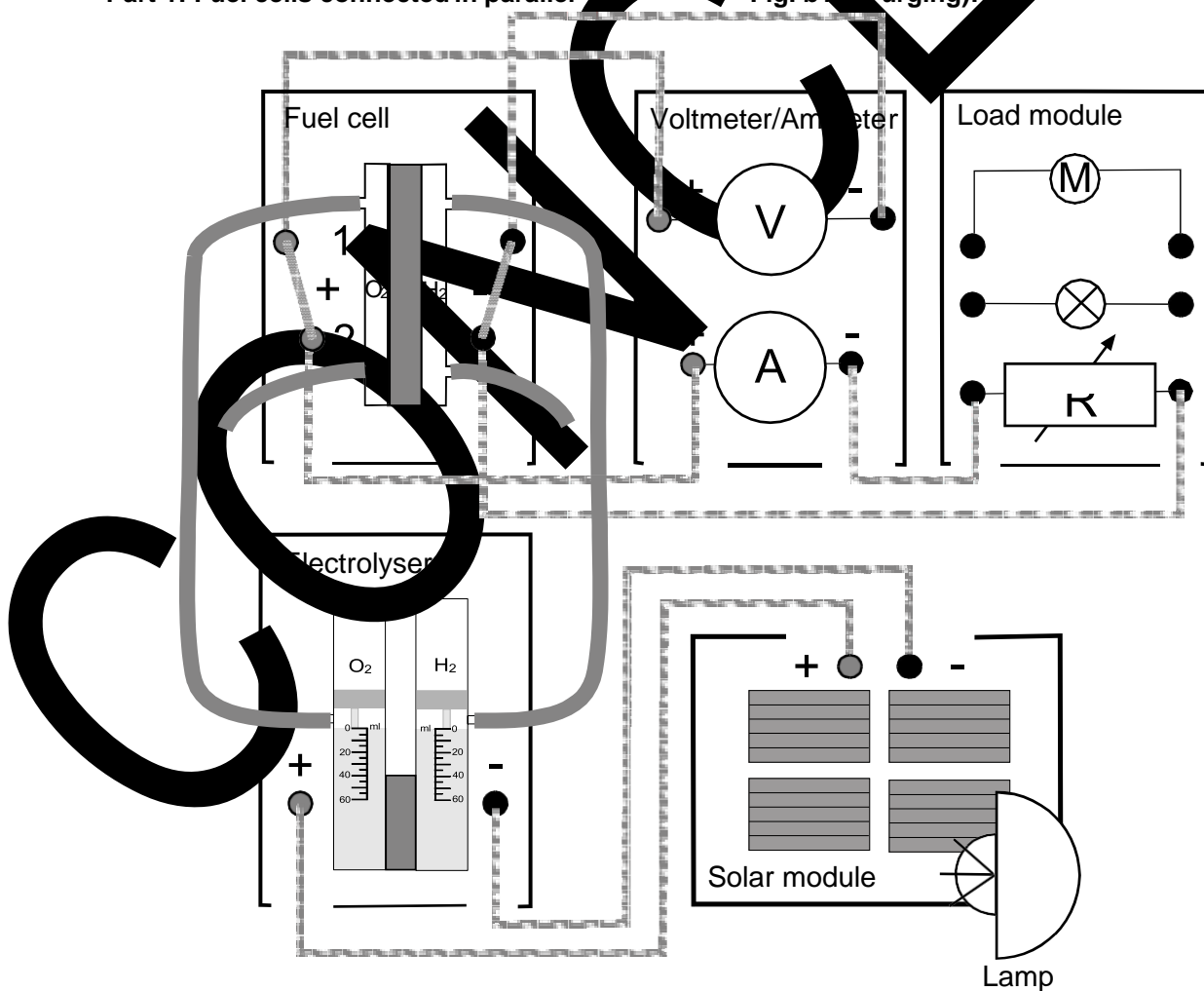
## Instructies:

Volg de gebruiksaanwijzing!

Drag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!!

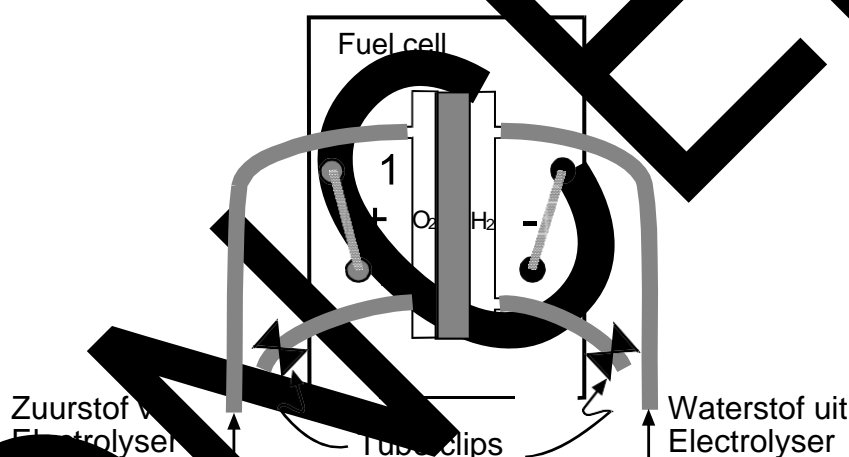
Part 1: Fuel cells connected in parallel

Fig. b1 (Purging):



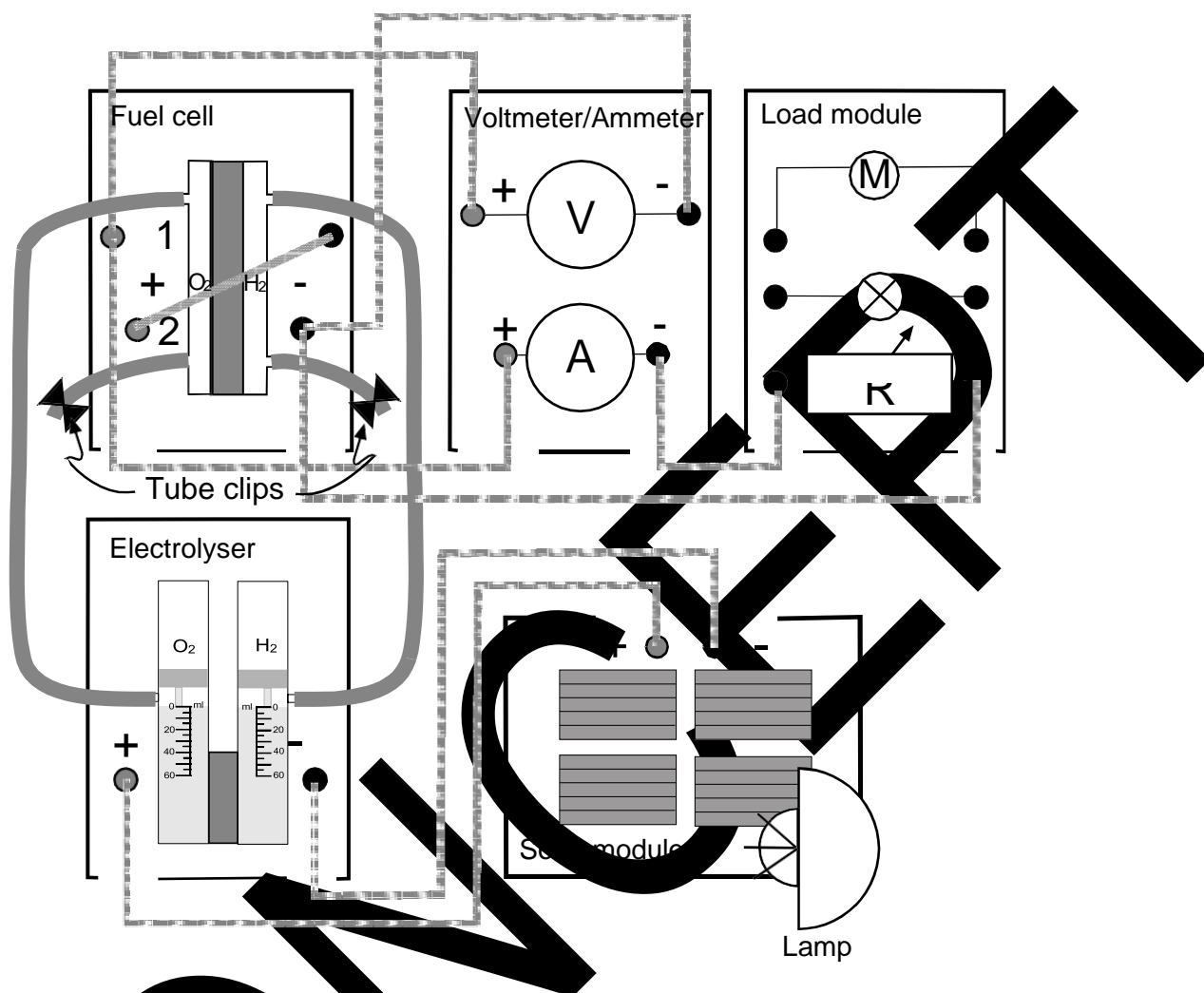
1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. b1a. Als alternatief voor de zonnemodule u ook een DC-voeding gebruiken als u wilt dat de elektrolyser sneller opvult.  
**LET OP: de spanning over de dc-voeding mag niet hoger zijn dan 1,8 volt, de stroom mag niet hoger zijn dan 3 ampère. Controleer de polariteit!**
2. Controleer of de gasbuizen tussen de elektrolyser en de brandstofcel correct zijn aangesloten. Pas de draaischakelaar van de belastingsmodule aan op 'OPEN'.
3. Zorg ervoor dat beide gasopslagcilinders van de elektrolyser tot 0 ml met gedestilleerd water worden gevuld. Gebruik de verlichte zonnemodule om een constante stroom op de elektrolyser in te stellen (tussen 700 en 900 mA). De zonnemodule moet zodanig naar de lichtbron worden uitgelijnd dat de gasproductie duidelijk kan worden waargenomen (zie Experiment e1).
4. Zuiver het hele systeem (d.w.z. elektrolyser, brandstofcel en buizen) gedurende 5 minuten met de geproduceerde gassen. Stel vervolgens de draaischakelaar in op  $2 \Omega$  gedurende 3 minuten. De ammeter moet nu een stroom van ongeveer 400 mA en de voltmeter een spanning van ongeveer 0,75 volt. Zet nu de draaischakelaar op de laadmodule terug naar "OPEN".

**Fig. b1b (Storing):**



1. Gebruik de buisclips om twee korte buizen bij de gasuitlaten van de brandstofcel te sluiten (zie Fig. b1b).
2. Onderbreek de verbinding tussen de zonnemodule en de elektrolyser wanneer de 60 ml markering wordt bereikt op de waterstofzijde van de elektrolyser.
3. Meet nu de karakteristieke curve van de brandstofcel door de meetweerstand te variëren (draaischakelaar op de belastingsmodule). Begin bij positie "OPEN" (open-circuit spanning) en verlaag de weerstand stap voor stap door de draaischakelaar naar rechts te draaien. Noteer de stroom en spanning op elke schakelpositie. Wacht elke keer 30 seconden voordat u de metingen uitvoert. Voer de cijfers in de meettabel in. Meet ook de cijfers wanneer de lamp bij de belastingsmodule in werking is.
4. Na het opnemen van de karakteristieke curve stelt u de draaischakelaar van de belastingsmodule opnieuw in op "OPEN" en verwijdert u de clips bij de brandstofcel.

Part 2: Brandstofcellen verbonden in serie Fig. b1c (storing/measuring):



Herhaalde metingen met brandstofcellen die in reeks zijn aangesloten, zoals geïllustreerd in Fig. b1c.

### Evaluatie:

1. Teken de VI-karakteristieke curve van de parallel aangesloten brandstofcellen.
2. Interpreteer de karakteristieke curve.
3. Voer de spanning en stroom van de lamp in de VI-karakteristieke curve.
4. Teken een diagram van de karakteristieke curven voor de brandstofcellen die in reeks en parallel zijn verbonden en vergelijk de twee curven.
5. Teken de PI-diagrammen voor de brandstofcellen die in serie en parallel zijn verbonden. Bereken het stroomverbruik van de lamp en voer de waarden in de PI-diagrammen in.

### Experimentvarianties:

6. In een ander experiment, de buis met de zuurstofinlaat van de brandstofcel verwijderen en op dezelfde manier de brandstofcel met zuurstof uit de omgeving slucht bedienen. Waterstof zal blijven worden gewonnen uit de buis van de elektrolyser cilinder.
7. Tijdens deel 2 (verbinding in serie) ook meten van de spanningen over de twee individuele cellen en voer deze in het diagram (fig. 2).
8. Teken een aantal van de meetweerstand in het spannings/stroomdiagram als Ohmic rechte lijkenmerken (fig. 4). Hoe groot zou een parallel verbonden weerstand op de brandstofcellen moeten zijn om hetzelfde stroomverbruik mogelijk te maken als de  $1 \Omega$  weerstand die is verbonden met de in serie aangesloten brandstofcellen?

Tabel met metingen:

Resistance/ $\Omega$	Voltage / V	Current / mA	Power / mW

**CONCEPT**

### Interpretatie/Opmerkingen:

In het eerste deel van het experiment worden de twee individuele cellen van de dubbele brandstofcel parallel met elkaar verbonden. Ze gedragen zich op precies dezelfde manier als een cel met een dubbel membraanoppervlak.

Om de karakteristieke curve van de brandstofcel te begrijpen, moet u de karakteristieke curve van de elektrolyser intrekken (Experiment e1). De processen in de brandstofcel zijn het omgekeerde van die plaatsvinden in elektrolyse. Bij de elektrolyse van water moet ten minste 1,23 volt worden aangebracht voordat het water begint te splitsen; in de regel is de spanning hoger (overpotentieel).

In het geval van een brandstofcel (een galvanische cel) wordt om dezelfde redenen minder spanning gegenereerd. Ook hier wordt de karakteristieke curve beïnvloed door de materialen die worden gebruikt voor de elektroden (katalysator), de interne weerstand, de temperatuur en het volume van waterstof en zuurstof die worden geleverd.

Bij een zeer kleine of nul stroomafvoer is de spanning over de brandstofcel ongeveer 0,9 volt. Deze spanning wordt de open-circuit spanning (naar analogie van een batterij). In het geval van de brandstofcel is deze sterk afhankelijk van de druk en zuiverheid van de inputgassen. Hoe meer stroom uit de brandstofcel wordt getrokken, hoe kleiner de spanning wordt (Fig. 2).

Het vermogen  $P$  van de cel kan worden berekend door de stroom te vermenigvuldigen met de spanning (integratie). Fig. 2 toont het PI-diagram.

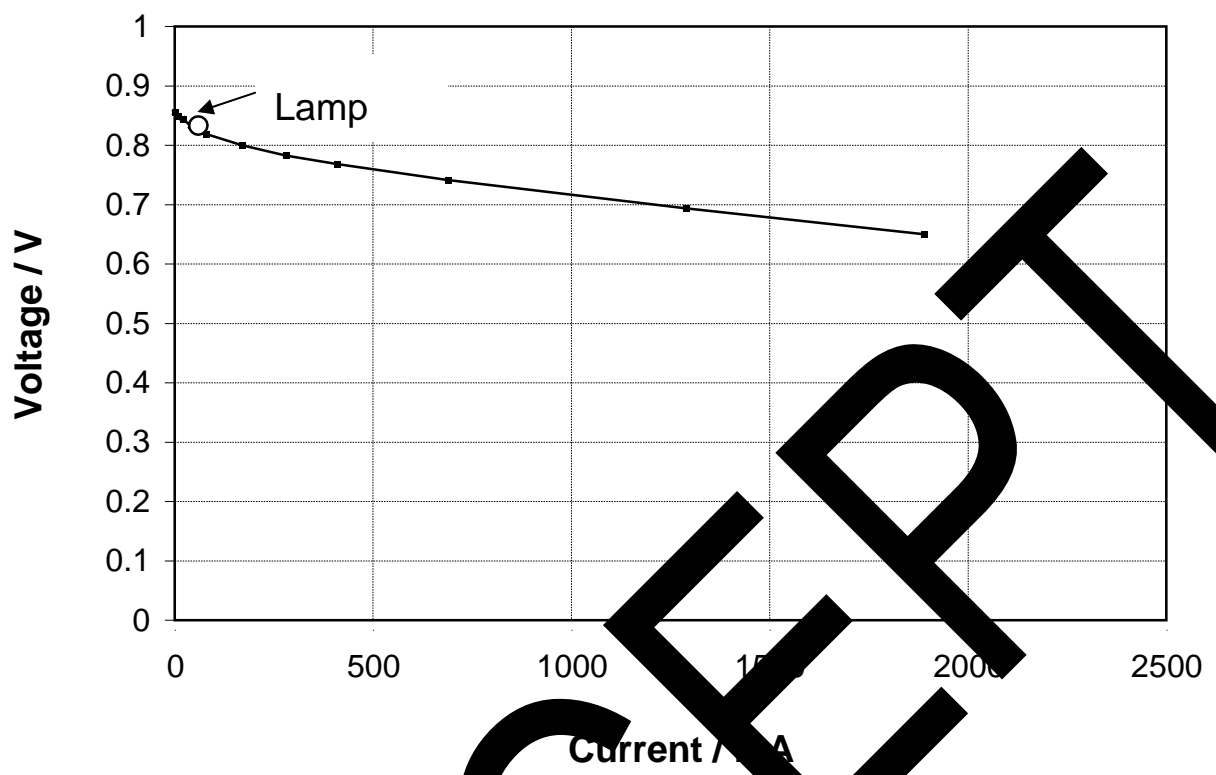
Als het bedieningspunt van de lamp in het PI-diagram wordt ingevoerd, kan worden gezien dat de lamp niet op het optimale punt werkt. d.w.z. waterstof gaat in dit geval verloren. Met andere woorden, er kan veel vermogen uit de brandstofcel worden gehaald.

In de praktijk wordt gewerkt om zo hoog mogelijk stroom uit de brandstofcel te halen (d.w.z. maximale output). De efficiëntie van de brandstofcel neemt echter af bij hoge stromen (zie Experiment b2), zodat het hier de taak is om een optimaal bedieningspunt te vinden (maximale efficiëntie bij een zo hoog mogelijk uitgang).

Een hogere spanning wordt bereikt wanneer de brandstofcellen in serie zijn aangesloten, maar de basisvorm van de karakteristieke krommen verandert niet (fig. 2). Een hogere output wordt bereikt in dit experiment wanneer de cellen in serie zijn aangesloten, omdat de belastingsweerstand van de belastingmodule een groter stroomverbruik als gevolg van de hogere spanning mogelijk maken.



**Fig. 1: Twee parallel aangesloten brandstofcellen**



**Fig. 2: Twee brandstofcellen verbonden in parallelle/serie**

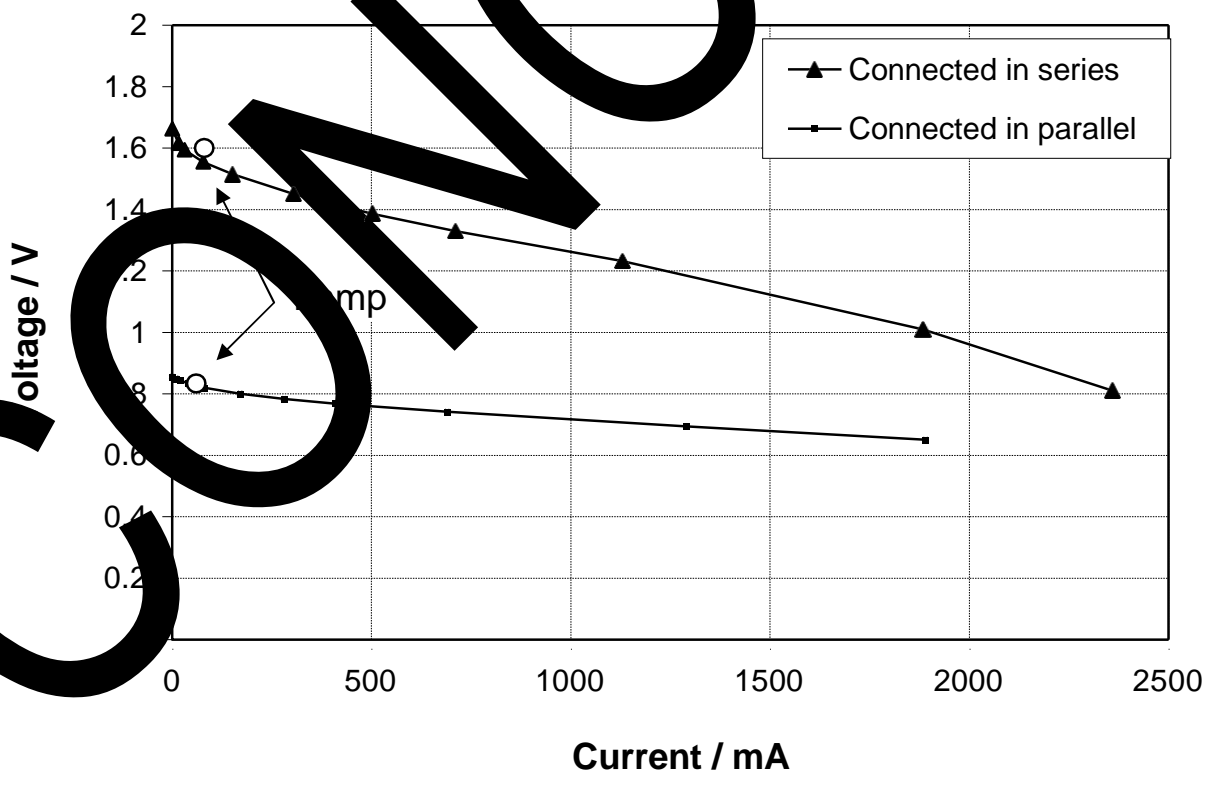


Fig. 3: Vermogenscurven van twee brandstofcellen

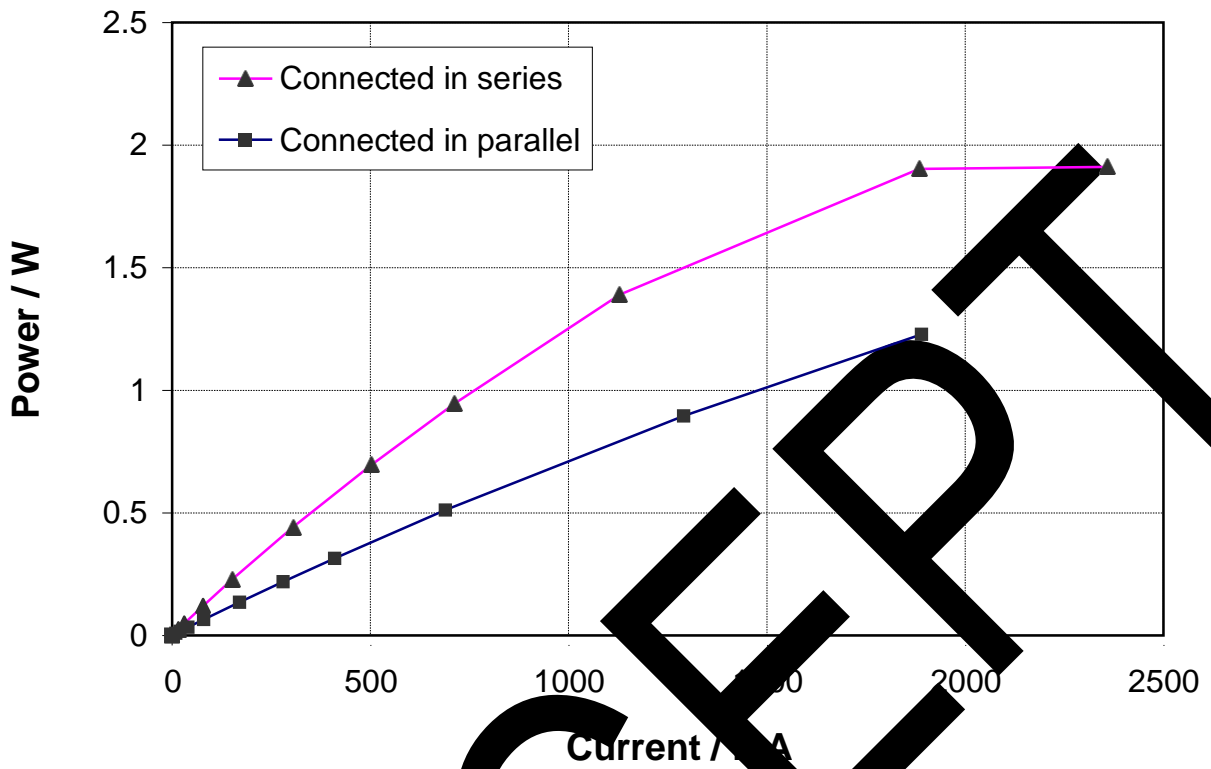
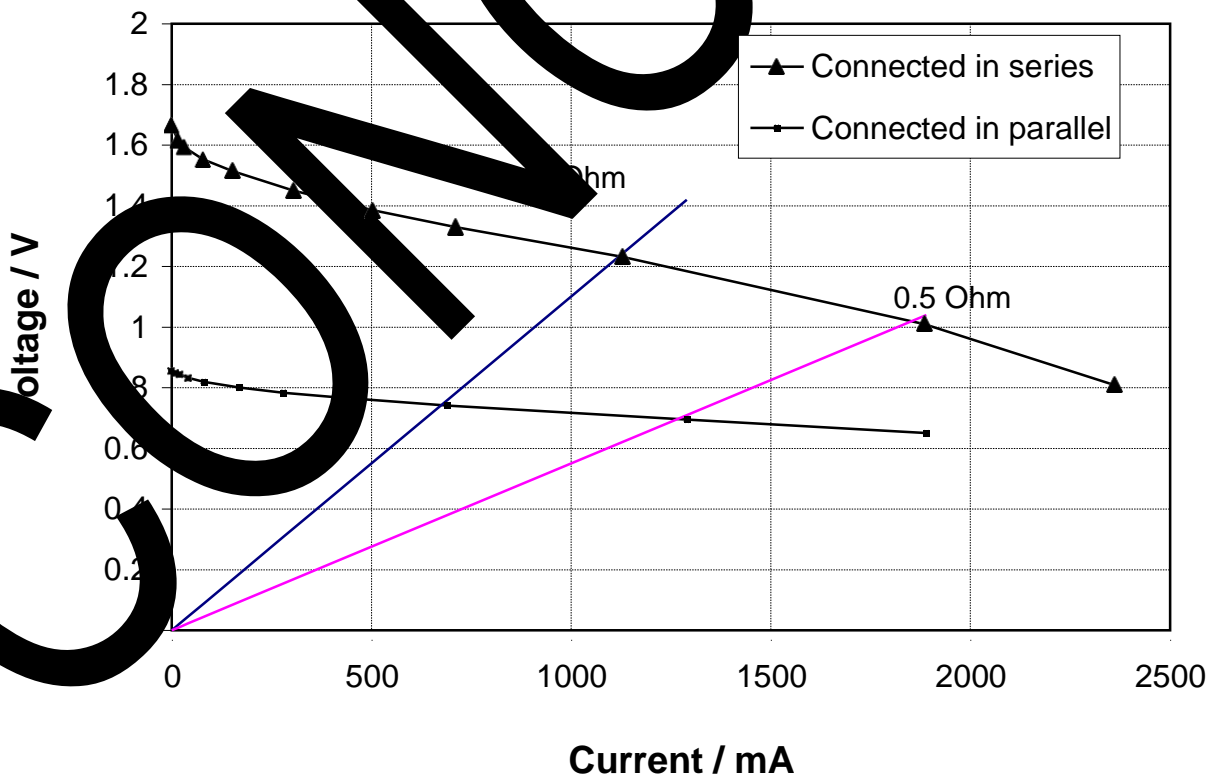


Fig. 4: VI karakteristieke krommen van brandstofcellen en weerstanden



# P b2

## Faraday Efficiëntie en energie-efficiëntie van de brandstofcel

### Benodigde materialen:

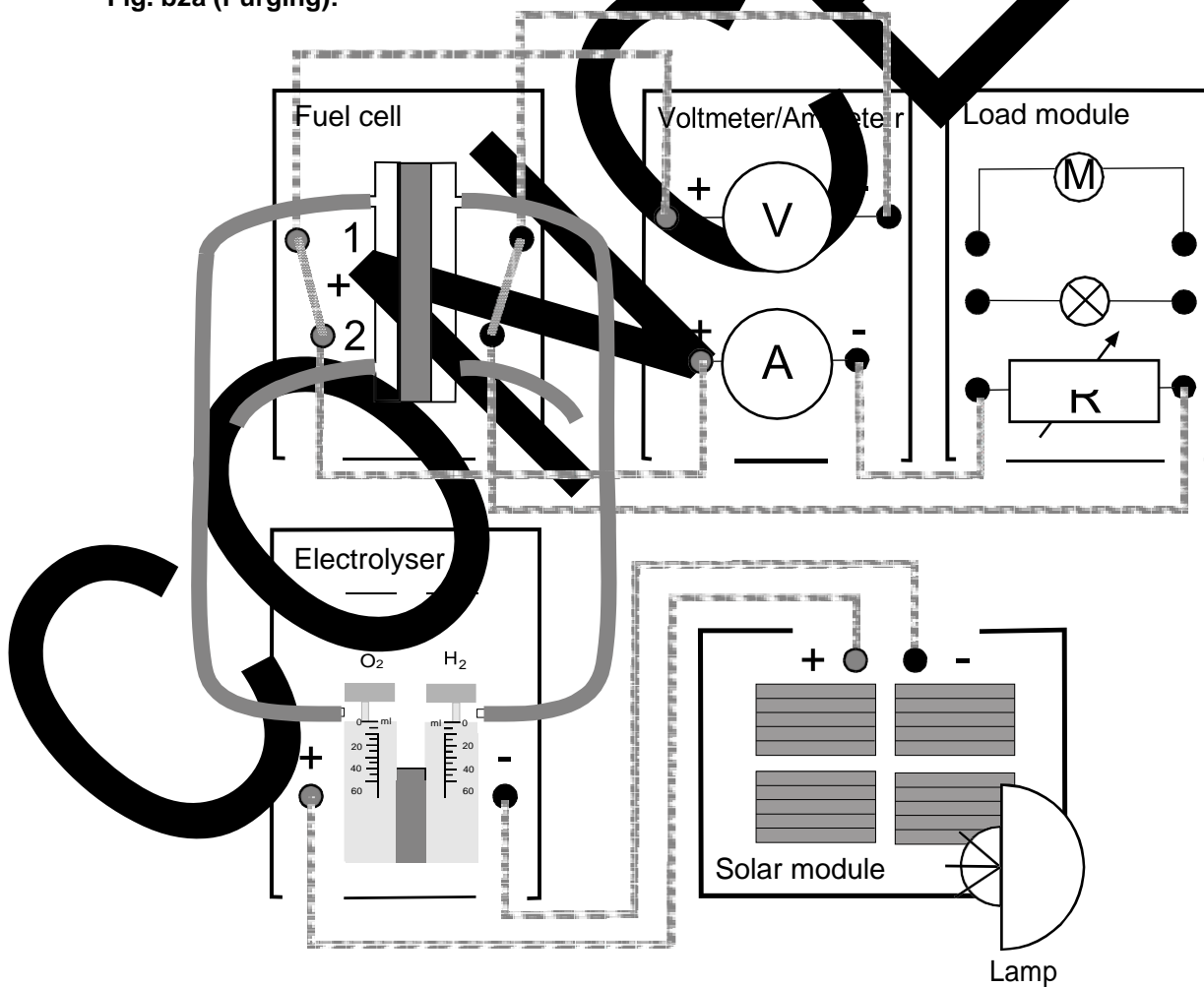
- |                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Solar module                   | 9 aansluitkabels                    |
| Electrolyser Fuel cell         | 2 lange buizen                      |
| Load module                    | 2 korte buizen                      |
| Demonstratie Ammeter/Voltmeter | 2 buisclips                         |
| Lamp 100-150 watt              | <u>Geen ingegrepen componenten:</u> |
|                                | Gedestilleerd water                 |

### Instructies:

Volg de gebruiksaanwijzing!

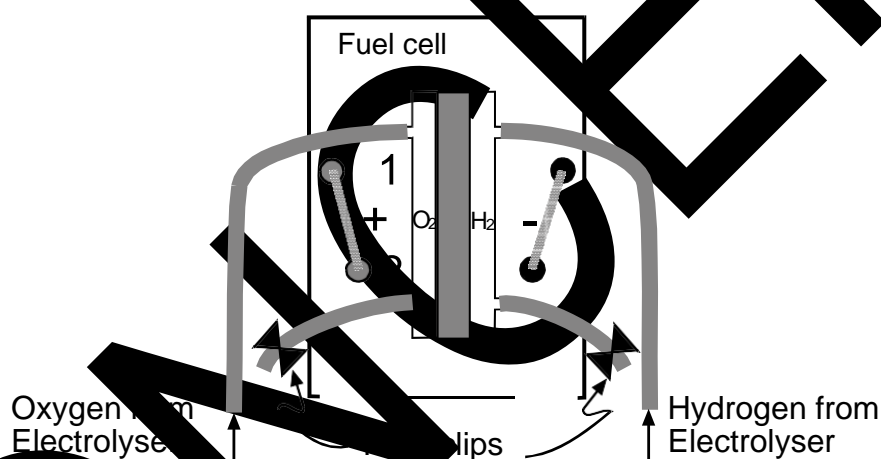
Draag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!!

Fig. b2a (Purging):



1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. b2a. Als alternatief voor de zonnemodule u ook een DC-voeding gebruiken als u wilt dat de elektrolyser sneller opvult.  
**LET OP: de spanning over de dc-voeding mag niet hoger zijn dan 1,8 volt, de stroom mag niet hoger zijn dan 3 ampère. Controleer de polariteit van de elektrolyser!**
2. Controleer of de gasbuizen tussen de elektrolyser en de brandstofcel correct zijn aangesloten. Pas de draaischakelaar van de belastingsmodule aan op 'OPEN'.
3. Zorg ervoor dat beide gasopslagcilinders van de elektrolyser tot 0 ml met gedestilleerd water worden gevuld. Gebruik de verlichte zonnemodule om een constante stroom in te leveren (tussen 700 en 900 mA). De zonnemodule moet zodanig naar de lichtbron worden uitgerijkt dat de gasproductie duidelijk kan worden waargenomen (zie Experiment e1).
4. Zuiver het hele systeem gedurende 5 minuten met de geproduceerde gasen. Schakel vervolgens de draaischakelaar in op  $2\ \Omega$  gedurende 3 minuten. De ammeter moet een stroom van ongeveer 400 mA en de voltmeter een spanning van ongeveer 0,75 volt. Schakel de draaischakelaar op de laadmodule terug naar "OPEN".

**Fig. b2b (Storing):**



1. Gebruik de clips om de twee gasbuizen te sluiten bij de gasuitlaten van de brandstofcel (zie Fig. b2b).
2. Onderbreek de verbinding tussen de zonnemodule en de elektrolyser wanneer de 60 ml markering wordt bereikt aan de waterstofzijde van de elektrolyser.
3. Wanneer het systeem zich op een bepaalde lekkagesnelheid heeft vanwege de buizen en afdichtingen, wordt een stationaire meting worden uitgevoerd. Noteer het verlies van waterstof uit de waterstofopslagcilinder zonder belasting (positie "OPEN") over een periode van 3 minuten en bepaal de lekkagesnelheid in ml waterstof per minuut.
4. Sluit de elektrolyser opnieuw aan op de zonnemodule en vul de waterstofopslagcilinder bij tot de 60 ml markering. Onderbreek vervolgens de voeding van de elektrolyser opnieuw.
5. Schakel de weerstand aan op  $0,3\ \Omega$ . Noteer het volume van waterstof verbruikt door de brandstofcel in 180 seconden. Meet en noteer ook de spanning en stroom in de brandstofcel. Schakel na 180 seconden terug naar "OPEN".
6. Herhaal stap 8 en 9 twee keer en bereken de gemiddelde waarden voor de hoeveelheid waterstof die door de brandstofcel wordt verbruikt. Na het maken van de metingen schakelt u over op "OPEN" en verwijdert u de clips uit de buizen van de brandstofcel.

Evaluatie:

1. Bereken de respectieve hoeveelheden waterstof.
2. Bepaal de Faraday-efficiëntie van de brandstofcel.
3. Bepaal de energie-efficiëntie van de brandstofcel.

Experiment variaties:

Bepaal de energie-efficiëntie als functie van de stroom die door de brandstofcel stroomt.

Stel stromingen in tussen 400 en 2000 mA door de weerstand in de belastingsmodule te variëren. Pas indien nodig de meetfrequentie aan om ervoor te zorgen dat u een meting uitvoeren met een enkele vulling van de opslagcilinders.

Zie onze cursusboeken voor ideeën over interpretatie.

Brandstofcel zonder belasting (bepaling van de lekkagesnelheid):

t = 3 min	Volume loss of hydrogen from storage	ml
	Leakage rate (system)	ml/min

Tabel met metingen:

R =	0.3 $\Omega$	time =	s	V <sub>1</sub> =	ml	V <sub>average</sub> =	ml
		voltage =	V	V <sub>2</sub> =	ml	V <sub>corr</sub> =	ml
		current =	A	V <sub>3</sub> =	ml		

Resultaten (voorbeeldmeting):

t = 3 min	Volume loss of hydrogen from storage	3 ml
	Leakage rate of system	1 ml/min

Gemeten waarden:

R = 0.3 $\Omega$	time = 180 s	V <sub>1</sub> = 45 ml	V <sub>average</sub> = 47 ml
	voltage = 6.675 V	V <sub>2</sub> = 46 ml	V <sub>consumed</sub> = 44 ml
	current = 1.94 A	V <sub>3</sub> = 48 ml	

De brandstofcel verbruikt 44 ml waterstof om een stroom van 1,94 ampère gedurende 3 minuten te leveren.

CONCEPT

## Bepaling van de Faraday-efficiëntie van de brandstofcel

De Faraday-efficiëntie  $\eta_F$  is de verhouding tussen het theoretische volume van waterstof dat wordt verbruikt bij een bepaalde stroomstroom uit de brandstofcel en het experimenteel bepaalde verbruik van waterstof.

$$\eta_F = \frac{V_{H_2 \text{ experimental}}}{V_{H_2 \text{ theoretical}}}$$

De efficiëntie van Faraday moet, indien mogelijk, 100% zijn. Faraday's wet stelt ons in staat om het volume van waterstof theoretisch te berekenen ( $V_m$  is het kiesvolume van het gas).

$$I \cdot t = n \cdot z \cdot F \quad n = \frac{V}{V_m}$$

$$V_{H_2 \text{ theoretical}} = \frac{I \cdot t \cdot V_m}{z \cdot F}$$

$$V_{H_2 \text{ theoretical}} = \frac{1.94 \text{ A} \cdot 1800 \text{ s} \cdot 24 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}}{2 \cdot 96,484 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}} = 43.4 \text{ ml}$$

Faraday-efficiëntie  $\eta_F$ :

$$\eta_F = \frac{V_{H_2 \text{ theoretical}}}{V_{H_2 \text{ experimental}}} = \frac{43.4 \text{ ml}}{44 \text{ ml}} = 0.98$$

De Faraday-efficiëntie van de brandstofcel kan om de volgende redenen minder dan één zijn:

1. Lekken in het systeem
2. Chemische reactie tussen waterstof en zuurstof bij de katalysatoren (katalytische oxidatie/verbranding), en
3. Elektrochemische parallelle reacties (verder ongewenste reacties die

plaatsvinden in de cel).

**CONCEPT**



## Bepaling van de energie-efficiëntie van de brandstofcel

De energie-efficiëntie  $\eta_E$  van de brandstofcel is de verhouding tussen de opgewekte elektriciteit en het theoretische energiegehalte van de verbruikte waterstof

$$\eta_E = \frac{\text{electrical energy}}{\text{theoretical energy content of hydrogen}}$$

$$\eta_E = \frac{\square U \cdot I \cdot t}{H_{0 H_2} \cdot V_{H_2 \text{ experimental}}}$$

De calorische waarde  $H$  is de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de verbranding van een specifiek volume (bijvoorbeeld  $1 \text{ m}^3$ ) gas. De brutocalorische waarde  $H_0$  wordt geciteerd op het water dat na verbranding achterblijft in vloeibare vorm is. De brutocalorische waarde van waterstof  $H_{0 H_2}$  bij een temperatuur van  $25^\circ \text{C}$  is  $11,920 \text{ kJ/m}^3$ .

$$\eta_E = \frac{0.675 \text{ V} \cdot 1.94 \text{ A} \cdot 180 \text{ s}}{11,920 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot 19 \text{ ml}} = 0.45$$

<u>Units:</u>	1 V	1 m
	1 J	$10^6 \text{ ml}$

# P b3

## Faraday's<sup>1e</sup> wet met behulp van een brandstofcel

### Benodigde materialen:

Solar module

Electrolyser Fuel

cell Load module

Demonstratie Ammeter/Voltmeter

Lamp 100-150 watt

9 aansluitkabels

2 lange buizen

2 korte buizen

2 buisclips

Geen inbegrepen

componenten: destilleer

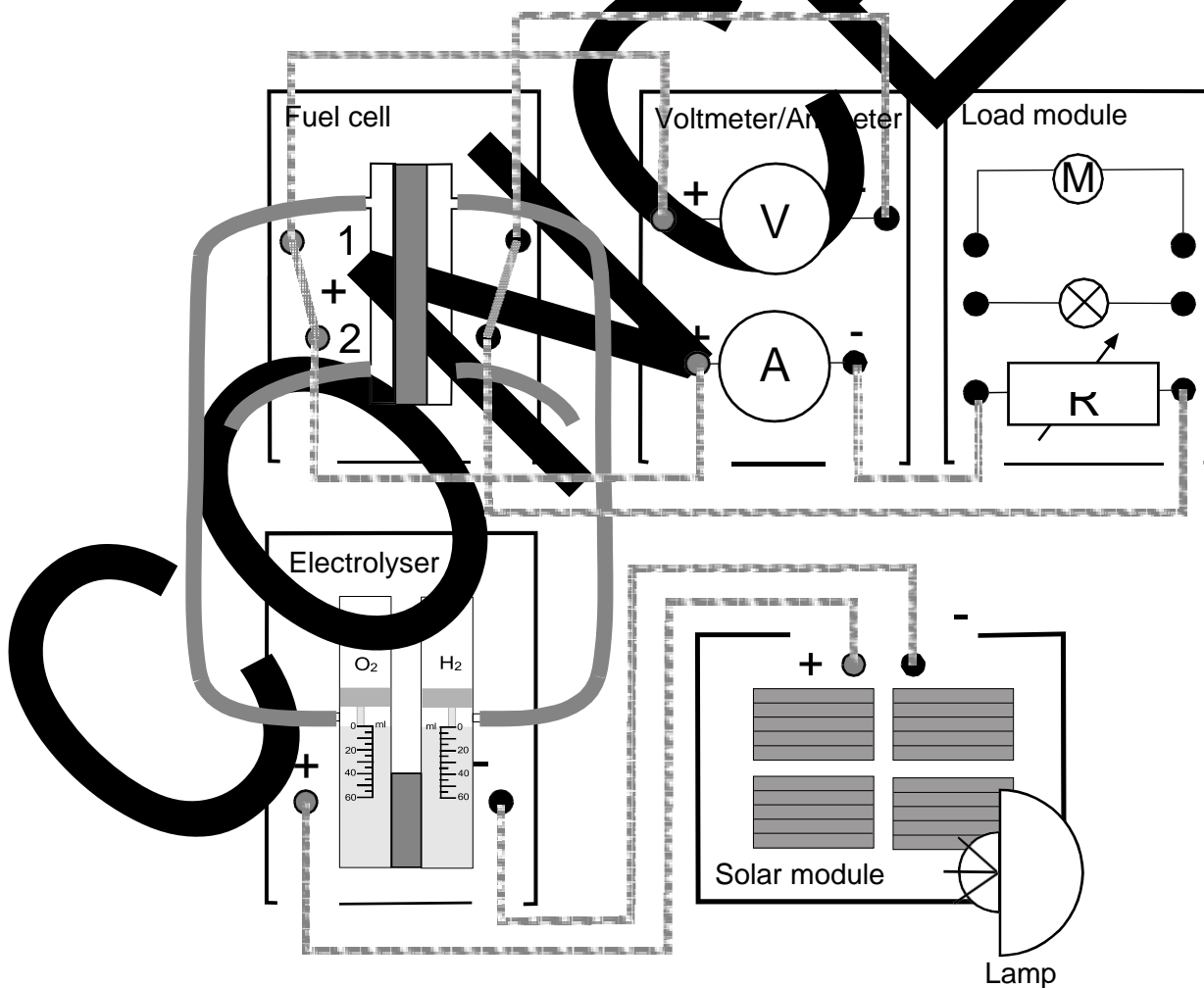
water

### Instructies:

Volg de gebruiksaanwijzing!

Draag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!!

### Fig. b3a (Purging):

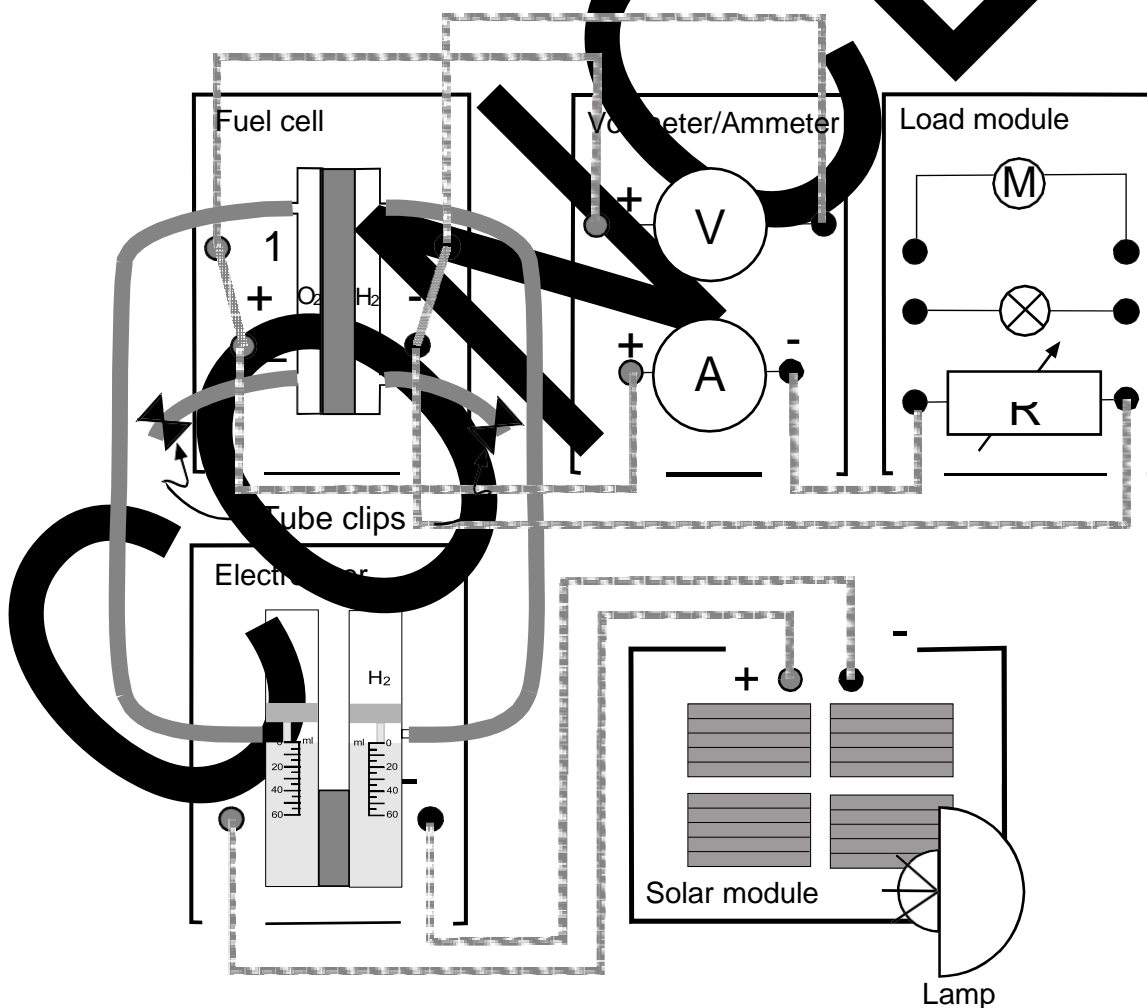


1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. b3a. Als alternatief voor de zonnemodule u ook een DC-voeding gebruiken als u wilt dat de elektrolyser sneller opvult.

**LET OP: de spanning over de dc-voeding mag niet hoger zijn dan 1,8 volt, de stroom mag niet hoger zijn dan 3 ampère. Controleer de polariteit van de elektrolyser!**

2. Controleer of de gasbuizen tussen de elektrolyser en de brandstofcel correct zijn aangesloten. Pas de draaischakelaar van de belastingsmodule aan op 'OPEN'.
3. Zorg ervoor dat beide gasopslagcilinders van de elektrolyser tot 0 ml met gestilleerd water worden gevuld. Gebruik de verlichte zonnemodule om een constante stroom in te stellen (tussen 700 en 900 mA). De zonnemodule moet zodanig naar de lichtbron worden uitgelijnd dat de gasproductie duidelijk kan worden waargenomen (zie Experiment e1).
4. Zuiver het hele systeem gedurende 5 minuten met de geproduceerde gassen. Stel vervolgens de draaischakelaar in op  $2 \Omega$  gedurende 5 minuten. De ammeter moet nu een stroom van ongeveer 400 mA en de voltmeter een spanning van ongeveer 0,75 volt. Zet nu de draaischakelaar op de laadmodule terug naar "OPEN".

**Fig. b3b (Het opslaan van de gassen en het meten van Faraday's 1e wet met een brandstofcel ):**



1. Gebruik de clips om de twee korte buizen bij de gasuitlaten van de brandstofcel te sluiten (zie Fig. b3b).
2. Onderbreek de verbinding tussen de zonnemodule en de elektrolyser wanneer de 60 ml markering wordt bereikt aan de waterstofzijde van de elektrolyser.
3. Aangezien het systeem altijd een bepaalde lekkagesnelheid heeft vanwege de buizen en afdichtingen, moet eerst een stationaire meting worden uitgevoerd. Noteer het verlies van waterstof uit de waterstofopslagcilinder zonder belasting (positie "OPEN") over een periode van 3 minuten en bepaal de lekkagesnelheid in ml waterstof per minuut.
4. Sluit de elektrolyser opnieuw aan op de zonnemodule en vul de waterstofopslagcilinder bij tot de 60 ml-markering. Onderbreek vervolgens de voeding van de elektrolyser opnieuw.
5. Om het eerste deel van de wet van Faraday te bepalen, stelt een verstand van  $5 \Omega$ . Record het volume van de waterstof verbruikt door de brandstofcel over verschillende perioden (60 tot 240 s in 60 s stappen) [Tabel van de metingen 1]. Meet ook de stroom aan de brandstofcel en noteert alle waarden. Stel vervolgens de draaischakelaar terug naar de "OPEN" positie.
6. Sluit de zonnemodule opnieuw aan op de elektrolyser en vul de waterstofopslagcilinder bij tot de 60 ml-markering. Onderbreek vervolgens de spanningstoevoer naar de elektrolyser opnieuw.
7. Om het tweede deel van de wet van Faraday te bepalen, stelt u achtereenvolgens verschillende stroomniveaus in door verschillende verstanden van  $3(2) \Omega$ ,  $(0,5)$  en  $0,3 \Omega$  te selecteren met behulp van de draaischakelaar in de besturingsmodule. De meettijd moet 180 seconden zijn.
8. Na het voltooien van alle metingen schakelt u terug naar "OPEN" en verwijdert u de clips uit de brandstofcel.
9. Corrigeer de meten waarden door de lekkagesnelheid af te trekken.

Tabellen met de afmetingen:

Bepaling van het lekpercentage:

t = 3 min	Volume loss of hydrogen from storage	ml
	Leakage rate of system	ml/min

[1] Afhankelijkheid van tijd

[2] Afhankelijkheid van de

huidige Current = mA = constant

t =

s = constant

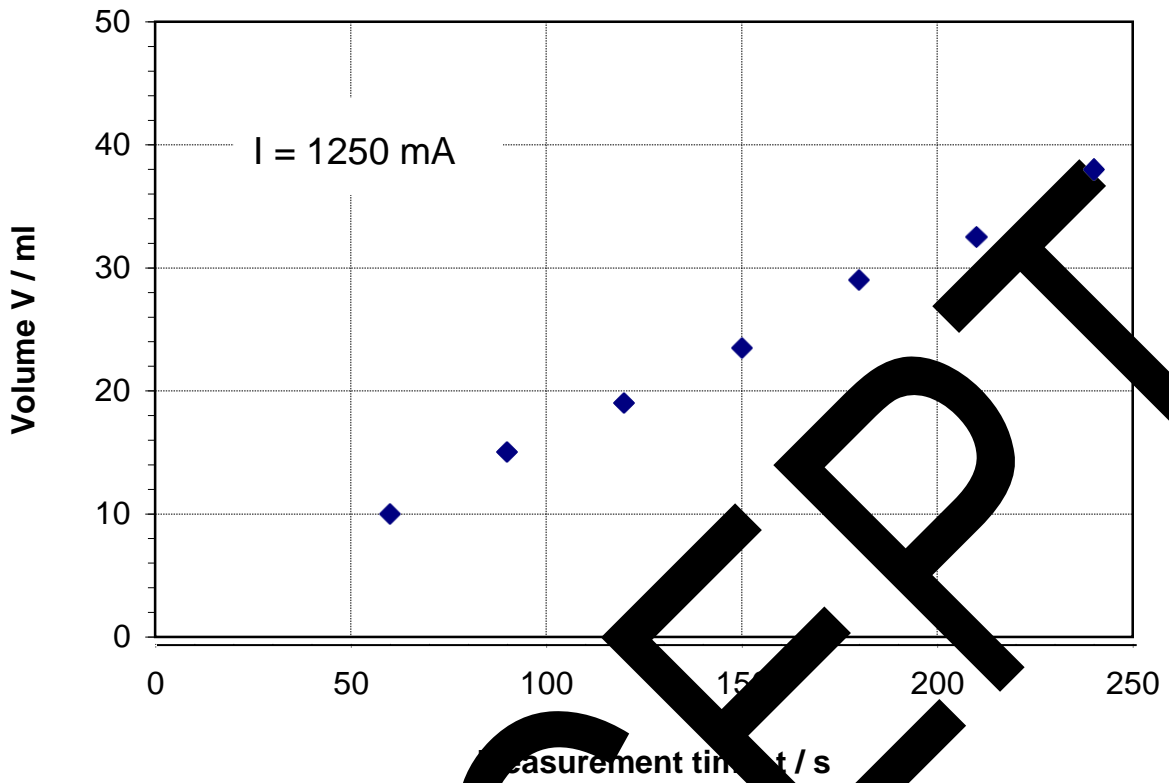
Time/ s	V <sub>H<sub>2</sub></sub> / ml	V <sub>H<sub>2</sub></sub> leakage rate

Current/mA	V <sub>H<sub>2</sub></sub> / ml	V <sub>H<sub>2</sub></sub> leakage rate

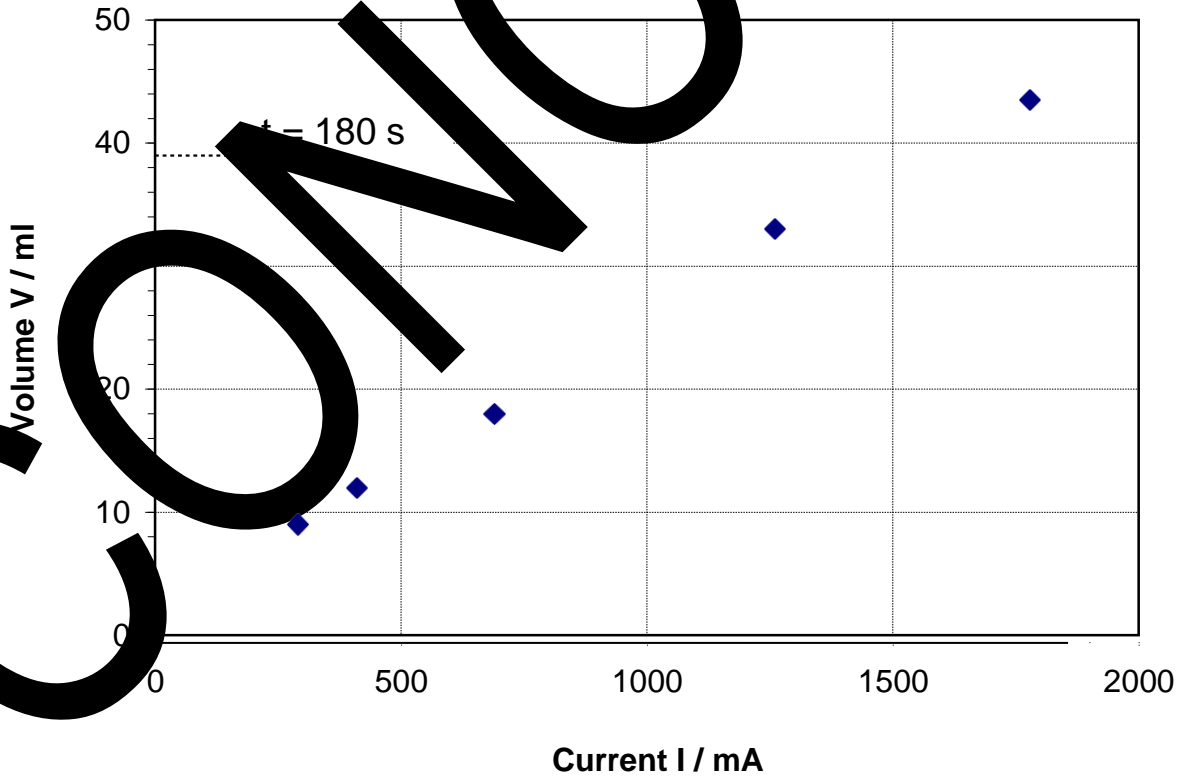
Evaluation:

1. De opgenomen gegevens uit de meettabellen [1] en [2] (volume versus tijd en volume ten opzichte van stroom) uitzetten.
2. Onderzoek het verband tussen het vrijgekomen waterstofvolume en de getransporteerde lading (Faraday's 1<sup>st</sup> law).

Dependence of hydrogen consumption on time



Dependence of hydrogen consumption on current



## Faraday's 1<sup>st</sup> law

Grafiek 1 laat zien dat het volume van waterstof (bij een constante stroom) evenredig is aan de tijd.

$$V \propto t$$

Grafiek 2 toont de evenredigheid tussen het volume van waterstof en de stroom (op constante tijd).

$$V \propto I$$

If  $V \propto t$  and  $V \propto I$ , then:

$$V \propto I \cdot t.$$

Since  $I \cdot t = Q$  (electrical charge), volgt dat

$$V \propto Q$$

Ten slotte is de relatie tussen  $V$  en kiesvolume  $V_m$

$$V = n \cdot V_m$$

Leidt tot **Faraday's 1<sup>st</sup> law**:

De hoeveelheid materiaal dat elektrolytisch vrijkomt,  $n$ , is evenredig aan tijd  $t$  en stroom  $I$ , d.w.z. naar de vervoerde elektrische lading  $Q$  ( $n \propto Q$ ).

# P g1

Water = 2 delen van waterstof  
+ 1 Deel van zuurstof

Heliocentris 

## Benodigde materialen:

Solar module  
Electrolyser Fuel  
cell Load module  
Lamp 100-150 watt

6 aansluitkabels  
2 lange buizen  
2 korte buizen  
2 buisclips

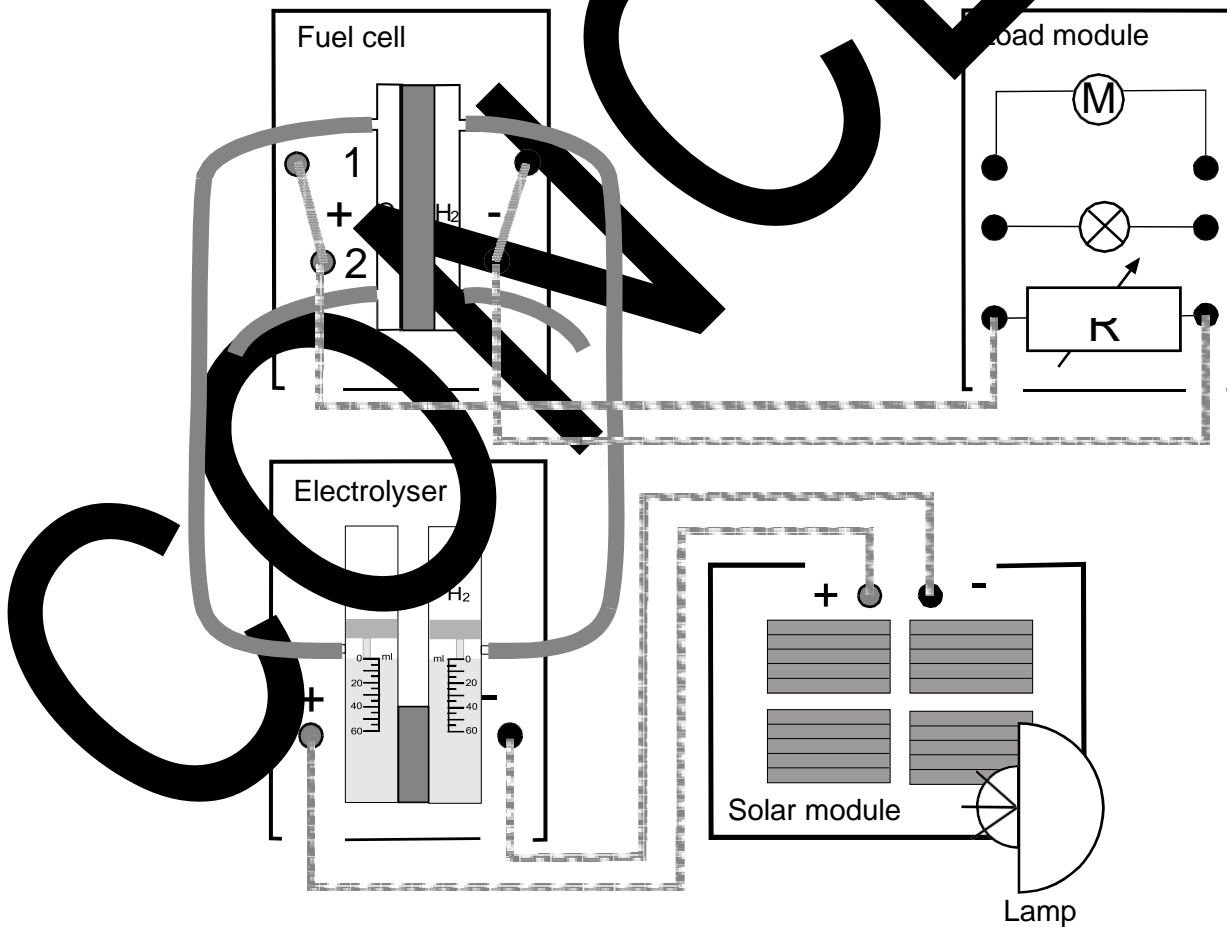
Geen inbegrepen componenten:  
Gedestilleerd water

## Instructies:

Volg de gebruiksaanwijzing!

Drag een veiligheidsbril en houd ontstekingsbronnen op afstand tijdens het experimenteren!!!

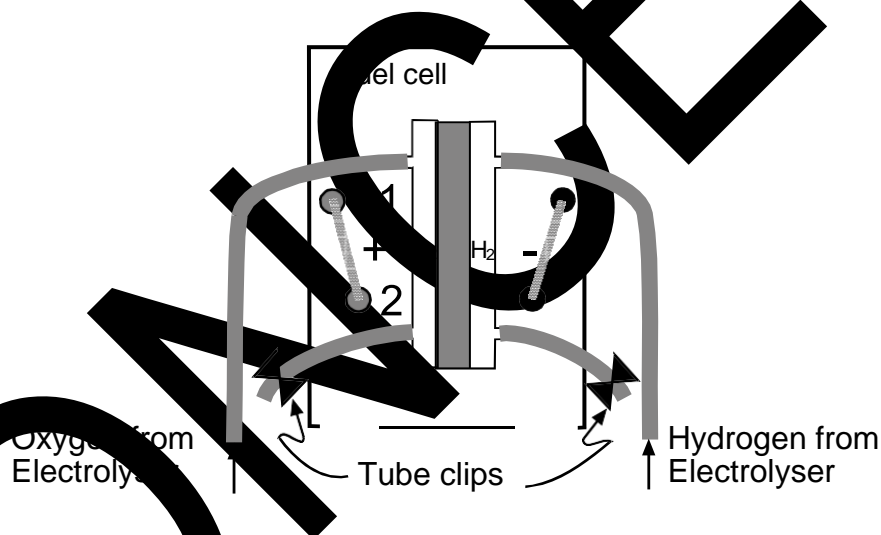
## Fig. g1a (Purging):





1. Stel het apparaat in zoals afgebeeld in Fig. g1a. Als alternatief voor de zonnemodule u ook een DC-voeding gebruiken als u wilt dat de elektrolyser sneller opvult.  
**LET OP: de spanning over de dc-voeding mag niet hoger zijn dan 1,8 volt, de stroom mag niet hoger zijn dan 3 ampère. Controleer de polariteit van de elektrolyser!**
2. Controleer of de gasbuizen tussen de elektrolyser en de brandstofcel correct zijn aangesloten. Pas de draaischakelaar van de belastingsmodule aan op 'OPEN'.
3. Zorg ervoor dat beide gasopslagcilinders van de elektrolyser tot 0 ml met gedestilleerd water worden gevuld. Gebruik de verlichte zonnemodule om een constante stroom in te stellen (kies een waarde van 900 mA). De zonnemodule moet zodanig naar de lichtbron worden uitgelijnd dat de gasproductie gemakkelijk kan worden waargenomen (zie Experiment e1).
4. Zuiver het hele systeem gedurende 5 minuten met de geproduceerde gassen. Stel vervolgens de draaischakelaar in op  $2 \Omega$ . De ammeter moet nu een stroom van ongeveer 400 mA en de voltmeter een spanning van ongeveer 0,75 volt. Zet nu de draaischakelaar op de belastingsmodule terug naar "OPEN".

**Fig. g1b (meting):**



1. Gebruik de clips om de twee korte buizen bij de gasuitlaten van de brandstofcel te sluiten (zie Fig. g1b).
2. Onderbreek de elektrische verbinding tussen de zonnemodule en de elektrolyser wanneer de 60 ml markering wordt bereikt aan de waterstofzijde van de elektrolyser. Meet ook het volume van de zuurstof die in dezelfde periode wordt gegenereerd.
3. Stel de draaischakelaar van de belastingsmodule aan op een weerstand van  $0,5 \Omega$ . Een stroom loopt, en de brandstofcel verbruikt de opgeslagen waterstof.
4. Onderbreek de elektrische verbinding wanneer de markering van 0 ml aan de waterstofzijde wordt bereikt door de draaischakelaar op "OPEN" in te stellen. De brandstofcel heeft nu alle opgeslagen waterstof (60 ml) verbruikt. Meet het volume van verbruikte zuurstof.
5. Verwijder de clips uit de brandstofcel.

Tabel met metingen:

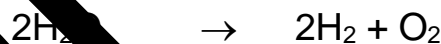
	Decomposition of water in the electrolyser:	Consumption by the fuel cell:
Volume of hydrogen	ml	ml
Volume of oxygen	ml	ml

Evaluatie:

1. Meet de respectieve gasvolumes.
2. Bepaal de verhouding van de gasvolumes die vrijkomt tijdens elektrolyse.
3. Bepaal de verhouding van de gasvolumes die de brandstofcellen tijdens het gebruik verbruikt.

Interpretatie/Opmerkingen:

De uitgevoerde experimenten tonen de afbraak van water in 2 delen van waterstof en 1 deel van zuurstof aan:



In de brandstofcel vindt het omgekeerde van elektrolyse plaats, d.w.z. de gassen die tijdens elektrolyse worden opgeslagen, worden weer omgezet in water.



Dit bewijst dat deze reactie omkeerbaar is. De eerste reactie (elektrolyse) vereist elektrische energie, terwijl de tweede reactie (brandstofcel) elektrische energie vrijgeeft. In totaal gaat een dergelijke cyclus gepaard met energieverliezen, d.w.z. het efficiëntieniveau is minder dan 1.

Heliocentris Academia International GmbH  
Rudower Chaussee 30  
12489 Berlin  
Germany

<http://www.heliocentrisacademia.com>

# CONCEPT

Heliocentris 