

# FOTO-ELEKTRISCH EFFECT

## 1. ACHTERGRONDINFORMATIE

In 1887 experimenteerde de Duitse fysicus Heinrich Hertz met de vorming en voortplanting van elektromagnetische golven. Terwijl hij onderzocht hoe vonken ontstaan tussen elektrisch geladen platen, ontdekte Hertz dat de vonken toenamen in hevigheid en aantal wanneer de platen werden blootgesteld aan ultraviolet licht.

Een andere Duitse fysicus, Wilhelm Hallwachs, ontdekte in 1888 dat een negatief geladen zinken plaat zijn lading aanzienlijk sneller verloor wanneer hij werd blootgesteld aan ultraviolette straling. Hij verbond dit verschijnsel aan de uitstoot van negatief geladen deeltjes. De fysicus Lenard ontdekte in 1900 dat de ontstekingsspanning van een elektrische lichtboog aanzienlijk afnam wanneer de negatieve elektroden werden blootgesteld aan ultraviolette straling, en bewees daarmee dat deze deeltjes elektronen zijn. In 1902 probeerde Lenard de benodigde energie te meten die nodig is om elektronen van fotogevoelige platen te verwijderen wanneer deze platen worden blootgesteld aan licht. Met dit verband ontdekte hij een drempelspanning waaronder geen elektronen konden worden verwijderd van de plaat, en dat deze drempelspanning niet afhing van de intensiteit van de straling. Hij ontdekte tevens dat de kinetische energie van de elektronen na absorptie afhing van de kleur van de invallende straling. Bovendien nam hij waar dat er geen elektronen konden worden verwijderd van de platen met behulp van straling met een relatief lange golf lengte, hoe groot de intensiteit van die straling ook was. De uitkomsten van de experimenten van Lenard kunnen niet worden verklaard met behulp van de door Maxwell geformuleerde klassieke lichttheorie. In 1905 opperde Albert Einstein een scherpzinnige verklaring voor deze experimentele ontdekkingen. Hij veronderstelde dat de optredende straling bestond uit energiekwanta, (zoals Max Planck opperde in zijn theorie), waarvan de energie evenredig is met de frequentie van de straling. Einstein stelde dat de grootte van het energiekwantum  $hf$  was, waarbij  $h$  Plancks constante is en  $f$  de stralingsfrequentie. Om elektronen uit de plaat te stoten is energie nodig, dit noemen we de uittreearbeid<sup>1</sup> ( $\Phi$ ). De door de plaat uitgestoten elektronen hebben een snelheid  $v$  en daarmee een hoeveelheid kinetische energie  $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ . De energievergelijking die uit Einstein's theorie af te leiden is, wordt daarmee:

$$E_{kin} = h \cdot f - \phi$$

$E$  = kinetische elektronenenergie na uitstoot

$h$  = de constante van Planck

$f$  = frequentie van de oppervlaktestraling

$\Phi$  = uittreearbeid

Dit verschijnsel werd bekend onder de naam (uitwendig) **foto-elektrisch effect**. Voor zijn scherpzinnige verklaring ontving Einstein de Nobelprijs in 1921 – en niet voor zijn relativiteitstheorie die op dat moment nog uiterst omstreden was.

Niet overtuigd door Einsteins uitleg voerde Robert Millikan een aantal proeven uit om aan te tonen dat de theorie niet juist was. Echter, na jaren van experimenteren, moest Millikan tot zijn eigen teleurstelling toegeven dat Einsteins theorie wel degelijk klopte. Gedurende deze pogingen bleek hij in staat om de constante van Planck vast te stellen binnen een foutmarge van 0,5%.

---

<sup>1</sup> de termen uittree-energie of werkfunctie worden ook in de literatuur gebruikt.

## 2. HET INWENDIGE FOTO-ELEKTRISCHE EFFECT

Het **inwendig foto-elektrisch effect** is de naam voor het later ontdekte verschijnsel dat optreedt binnen halfgeleiders. Wanneer elektrische energie wordt toegevoerd aan bepaalde halfgeleiders, komen fotonen vrij (bijv. in een LED) of, wanneer fotonen op het oppervlak van andere halfgeleiders inslaan, wordt er spanning opgewekt (fotocellen, fotodiodes, fototransistoren, fotonvoltaïsche energie, enz.).

## 3. WELK FOTO ELEKTRISCH-EFFECT IS MEER GESCHIKT IN HET ONDERWIJS?

Als proef heeft het **uitwendige** foto-elektrisch effect duidelijk de voorkeur voor VO-leerlingen of universitaire studenten, omdat:

- Het uitwendig foto-elektrisch effect eenvoudiger uit te leggen en te begrijpen is.
- Leerlingen door middel van het uitwendige foto-elektrisch effect bovendien meer vertrouwd raken met het belangrijke concept van de arbeidspotentiala.
- Het uitwendige foto-elektrisch effect gebruikt kan worden om de kwantumeigenschappen van licht uit te leggen, samen met Einsteins eenvoudige doch scherpzinnige verklaring.
- Het effect kan worden uitgelegd en gedemonstreerd zonder enige (of slechts met onbelangrijke) versimpelingen.
- Omstandigheden in een halfgeleider zijn van een hoge complexiteit; veel details moeten worden vereenvoudigd om deze processen begrijpelijk te maken. Vereenvoudiging leidt snel tot foute denkbeelden.
- Wanneer het uitwendige foto-elektrisch effect eenmaal begrepen is door het uitvoeren van de proef, is het inwendige foto-elektrisch effect ook eenvoudiger uit te leggen.

## 4. DE KLASSIEKE PROEF

De kathode van een vacuüm fotodiode wordt blootgesteld aan licht van een spectraal lamp. De lichtstralen worden vervolgens gefilterd met behulp van verschillende scheidingsfilters, waardoor er telkens monochromatisch licht op de kathode valt.

Wanneer de energie van de elektronen van de oppervlaktestraling hoog genoeg is (bijvoorbeeld bij ultraviolette straling), dan worden er elektronen ( $e^-$ ) uitgezonden van de kathode (foto-emissie). Omdat ze kinetische energie bezitten, verplaatsen deze elektronen zich naar de anode van de fotodiode. Als we dan met behulp van een gevoelige ampèremeter de anode van de fotocel aansluiten op de kathode, dan zien we dat, onafhankelijk van de lichtintensiteit, stroom (in dit geval een "**fotostroom**") gaat lopen. Dan verbinden we de kathode en de anode met een variabele spanningsbron met een omgekeerde polariteit, in dit geval een positieve kathode (+) en negatieve anode (-). Wanneer de spanning geleidelijk wordt opgevoerd, neemt de hoeveelheid fotostroom, zoals gemeten door de ampèremeter (A), af en wordt zelfs nul onder een bepaald spanningsniveau zoals gemeten door de voltmeter (V). Dit spanningsniveau, het "remmend vermogen" ( $U_{rem}$ ), hangt alleen af van het kathodemateriaal en de golflengte van de straling, echter niet van zijn intensiteit (Lenards proeven). De benodigde hoeveelheid kinetische energie ( $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ ) om een door de kathode uitgezonden elektron de anode te laten bereiken (dit betekent dat hij tegen het elektrische veld in moet bewegen) noemen we  $e \cdot U_{rem}$ .

Dit leidt tot Einstein's vergelijking:

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = e \cdot U_{rem} = h \cdot f - \phi \quad (\text{Vergelijking 1})$$

$E$  = kinetische elektron energie na uitstoot

$m$  = massa van het elektron

$v$  = snelheid van het elektron na uitstoot

$e$  = elementair lading ( $1 e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  of  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A.s}$ )

$U_{rem}$  = remspanning

$h$  = constante van Planck ( $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ )

$f$  = frequentie van de oppervlaktestraling

$\phi$  = uittreearbeid

De uittreearbeid is dus de minimale hoeveelheid energie die nodig is om een foton van het metaal van de kathode los te maken. De grootte van de uittreearbeid is een eigenschap van het materiaal en hangt ook af van de temperatuur.

Uittreearbeid (uittreepotentiaal) van bepaalde metalen:

Natrium  $\phi = 2,06 \text{ eV}$

Kalium  $\phi = 2,30 \text{ eV}$

Cesium  $\phi = 2,14 \text{ eV}$

Het verband tussen  $U_{rem}$  en  $f$  wordt beschreven door een lineaire vergelijking, omdat  $e$ ,  $h$  en  $\phi$  constanten zijn. Deze lijn is verschillend is voor elk metaal, maar alle lijnen hebben dezelfde helling: deze helling is gelijk aan  $h/e$  (zie verderop in dit document).

De in deze set gebruikte fotodiode is een 1P39 vacuümdiode met een kathode die bestaat uit cesium. Dit model werd ongeveer 60 jaar geleden gebruikt voor toepassingen rond het zichtbare bereik van licht. Omdat de uittreearbeid van cesium betrekkelijk laag is, kan zelfs een rode lichtstraal in staat zijn om elektronen van een cesiumkathode te verwijderen. De uittreearbeid voor cesium bedraagt  $2,14 \text{ eV}$  bij  $0 \text{ K}$  en  $1,95 \text{ eV}$  bij kamertemperatuur.



## 5. PROEF MET HET HIERBOVEN GETOONDE APPARAAT

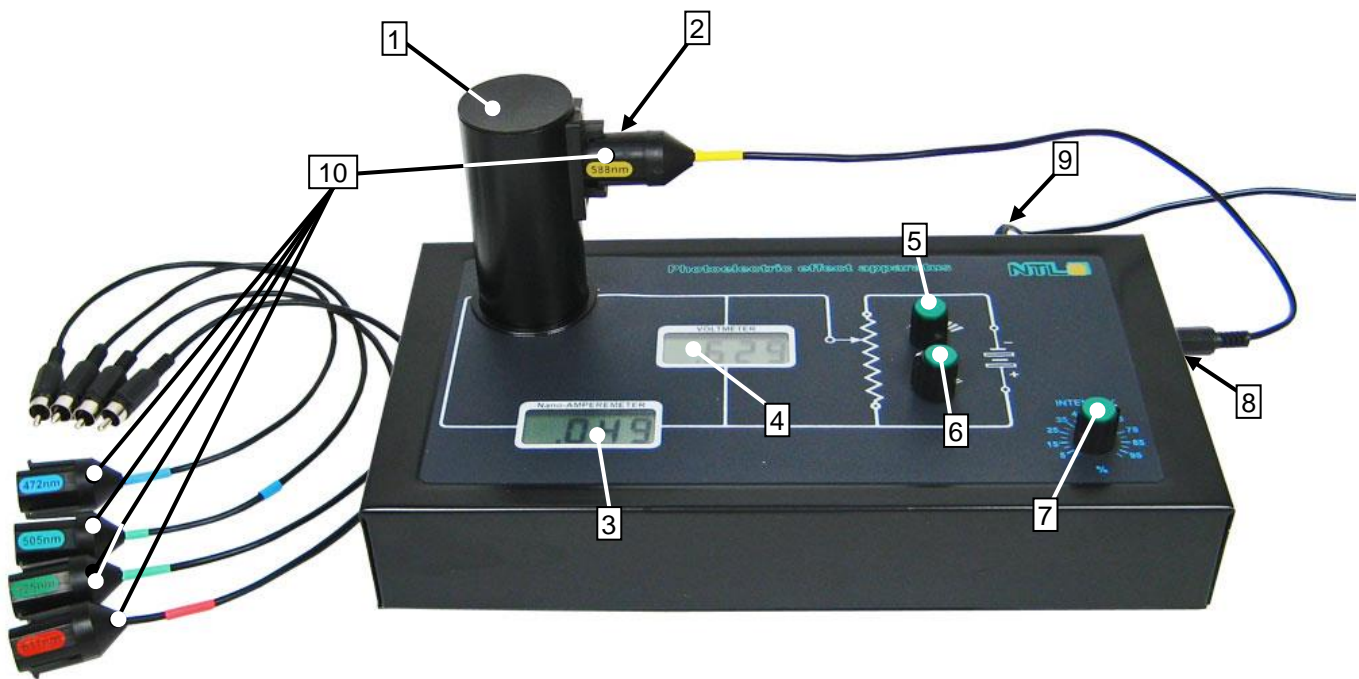
We gaan met ons apparaat de klassieke proef uitvoeren, d.w.z. het uitwendige foto-elektrisch effect. We hebben voor foto-elektrische proeven een lichtstraal nodig die sterk monochromatisch is, voor zowel het uitwendige als het inwendige effect. De hierboven beschreven methode, waarbij een spectraal lamp en een scheidingsfilter worden gebruikt, is duur, tijdrovend en voor middelbare scholieren en universitaire studenten moeilijk uit te voeren. Om deze moeilijkheden te omzeilen hebben we gekozen om als lichtbronnen LEDs van vijf verschillende kleuren te gebruiken.

De door een LED uitgezonden frequentieverdeling is Gaussisch verdeeld, waarin de breedte van de Gauss curve, bij half vermogen afhankelijk van de kleur, varieert van 15 tot 37 nm. LEDs zijn daarom niet echt monochromatische lichtbronnen (in de strikte betekenis van het begrip). We hebben een methode ontwikkeld waarbij de resultaten alleen worden ontleend aan de dominante (~maximum) stralingsgolflengte die door de LED wordt uitgezonden. Zodoende kunnen we de gebruikte LEDs als monochromatische lichtbronnen beschouwen.

We kunnen in de literatuur een aantal verklaringen vinden waarom het niet mogelijk is om de uitreearbeid met dit soort apparatuur, waarbij de kathode en anode zijn aangesloten en daarmee beide Fermi-niveaus dezelfde potentiaal bereiken, te meten. Deze moeilijkheid is echter op eenvoudige wijze opgelost in het apparaat. Hiernaast zijn nog andere moeilijkheden overwonnen om het met dit apparaat mogelijk te maken om snel en eenvoudig heel precieze uitkomsten te leveren. We gaan daar echter niet verder op in.

## 6. BELANGRIJKE OPMERKINGEN

- **Lees de handleiding van de apparatuur zorgvuldig door voordat u het apparaat gebruikt.**
- Vervang een defecte zekering alleen door een zekering met dezelfde waarde als de oorspronkelijke.
- Zet het apparaat niet op een oppervlak waarbij het wordt blootgesteld aan schokken of heftige trillingen.
- Verwijder de beschermende folie van de vacuüm fotocel nooit. Volle blootstelling van de fotocel aan licht zorgt ervoor dat hij snel slijt en zal een negatieve invloed hebben op de werking.
- Stel het apparaat niet bloot aan extreme temperaturen, vochtigheid of condens, of directe zonnestraling.
- Schakel het apparaat na voltooiën van de proeven uit en bedek de licht geleidende buis met de meegeleverde beschermkap, om de fotocel te beschermen tegen onnodige slijtage.



## 7. BESCHRIJVING VAN DE ONDERDELEN VAN HET APPARAAT

- (1) Beschermende afdekking van de fotocel
- (2) Licht-geleidende buis: de LED lichtbronnen worden hierop aangesloten
- (3) Nano-ampèremeter: gevoelig instrument om fotostroom mee te meten
- (4) Spanningsmeter om remspanning te meten
- (5) Draaiknop voor globale aanpassing van de rem potentiaal
- (6) Draaiknop voor precieze aanpassing van de rem potentiaal
- (7) Draaiknop om de sterkte van de lichtbron in te stellen
- (8) Ingang voor de lichtbron
- (9) Ingang voor de elektrische voeding
- (10) LEDs met kabel

## 8. DE PROEF UITVOEREN

- a. Sluit de bijgeleverde transformator aan op een stopcontact (230 V/50 Hz) en daarna de connector aan op de ingang voor de netspanning (9). Het apparaat is nu gereed voor gebruik. De ampèremeter en de voltmeter zijn nu aan en vertonen een getal op de display.



- b. Zet de intensiteit (7) op 75%.

- c. Selecteer de eerste lichtbron, bijv. de rode, en sluit hem aan op de linkerkant van het apparaat.\*



- d. Schuif de lichtbron volledig in de lichtgeleidende buis.



- e. Zet de schakelaar voor fijn afstemming (6) in de middelste stand.
- f. Draai de schakelaar voor globale afstemming (5) geleidelijk totdat de ampèremeter een fotostroom uitslag laat zien van ongeveer nul.
- g. Draai de schakelaar voor fijn afstemming (6) geleidelijk totdat de ampèremeter een fotostroom uitslag laat zien van nul en het display **wisselt tussen 0 en -0**.
- h. Let op de uitslag op de voltmeter. Dit is de remspanning ( $U_{rem}$ ) voor deze bepaalde lichtbron.
- i. Ga op dezelfde manier te werk (vanaf onderdeel c) met de andere lichtbronnen.

\* Bij de eerste meting wordt aanbevolen om een paar minuten te wachten voordat u de remspanning gaat instellen.

## 9. UITKOMSTEN – ANALYSE

Er bestaan verschillende manieren om de uitkomsten te analyseren. We beschrijven hieronder drie methoden:

### 9.1 DE DIAGRAMMETHODE

We zetten de uitkomsten voor elk van de kleuren (in dit geval de vijf punten) in een coördinatensysteem, waarbij de x-as de frequentie-as is ( $f$ -as), en de y-as, de  $U_{rem}$ -as. Tenslotte doen we een poging om de vijf punten door middel van een “optimaal aangepaste” of “beste rechte” lijn te verbinden met elkaar.

Waarden voor  $\phi$  en  $h$  kunnen uit het diagram worden afgeleid.

Ondanks dat deze methode misschien heel eenvoudig te begrijpen is, is de precisie van de uitkomsten afhankelijk van hoeveel ervaring u heeft met deze proef.

### 9.2 DE WISKUNDIG METHODE

Door gebruik te maken van de gemeten punten wordt de optimale lijn gevonden door lineaire regressie toe te passen. Vergelijking (1) wordt enigszins aangepast om te veranderen in:

$$U_{rem} = \frac{h}{e}f - \frac{f}{e} \quad (1.a)$$

Wanneer  $U_{rem} = y$  en  $f = x$  dan voegen we ze in:

$$y = \frac{h}{e}x - \frac{f}{e} \quad (1.b)$$

Terwijl, volgens de bekende methode van lineaire regressie, het volgende van toepassing is:

$$\frac{h}{e} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\Delta}$$
$$\frac{\phi}{e} = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n x_i y_i)}{\Delta}$$

en

$$\Delta = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2$$

Deze oplossing is duidelijk complex en tijdrovend. Er zijn echter zakrekenmachines die deze functie voorgeprogrammeerd hebben, waardoor deze oplossing eenvoudig, snel en heel precies wordt.

### 9.3 DE MODERNE OPLOSSING

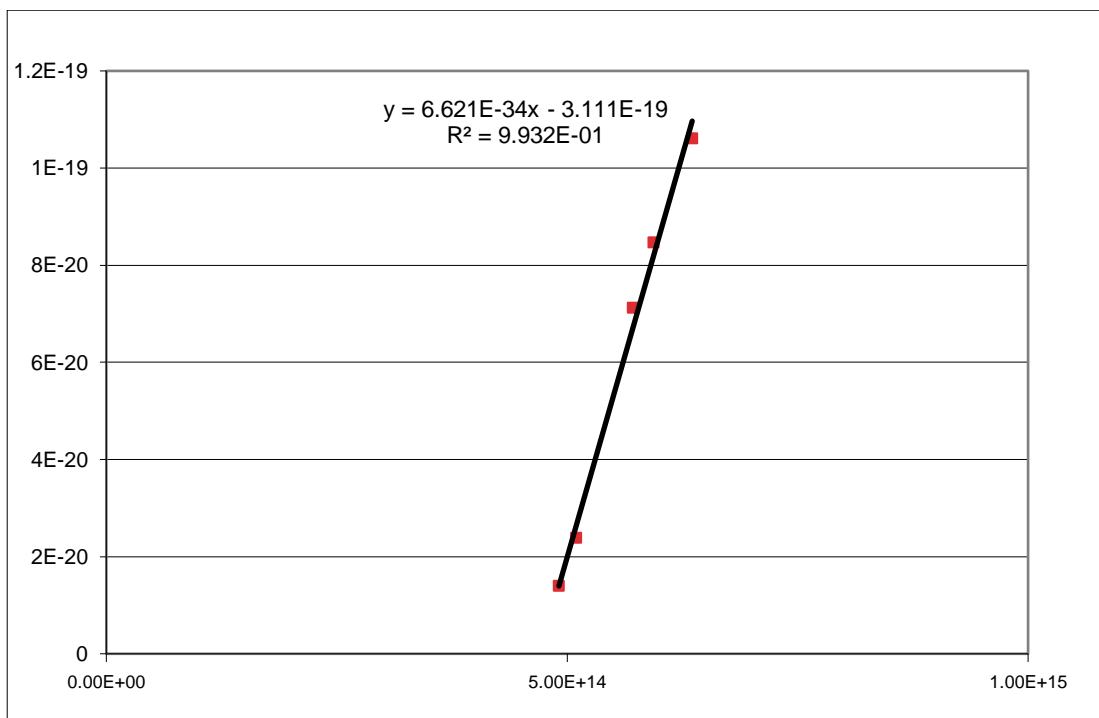
De uitkomsten worden berekend met behulp van een Excel werkblad (meegeleverd).

De afgelezen waarden voor de remspanning zetten we in de kolom  $U_{\text{rem}}$  van Rekenblad 1 (Tabblad 1). De frequentie kun je in het werkblad uit laten rekenen met het verband:  $f = c / \lambda$ .

Grootheid	$\lambda$ [ $\cdot 10^{-7}$ m]	$U_{\text{rem}}$ [V]	$f$ [ $\cdot 10^{14}$ Hz]	$E = e \cdot U_{\text{rem}}$ [ $\cdot 10^{-20}$ J]	$E = h \cdot f - \Phi$ [ $10^{-20}$ J]
	6,11	0,087	4,91	1,39	1,334
	5,88	0,149	5,10	2,38	2,606
	5,25	0,445	5,71	7,12	6,663
	5,05	0,529	5,94	8,46	8,162
	4,72	0,663	6,36	10,61	10,91

Rekenblad 1

De lijn wordt dan automatisch getekend en getoond in een sheet (Tabblad) 2.



Afbeelding 5

De waarden voor  $h$  en  $\Phi$  kunnen worden verkregen uit de getoonde lineaire vergelijking.



Deze waarden worden in Rekenblad 2 (Sheet / Vel 1) gezet en het programma berekent vervolgens automatisch de afwijking (fout) van de theoretische waarden voor  $h$  en  $\Phi$ .

UITKOMSTEN PROEF	PLANCKS CONSTANTE [Js]	ELECTRON UITTREETARBEID [J]
THEORETISCH	$6,626 \cdot 10^{-34}$	$3,120 \cdot 10^{-19}$
GEMETEN UITKOMST	$6,621 \cdot 10^{-34}$	$3,111 \cdot 10^{-19}$
FOUT [%]	-0,08%	-0,29%

Rekenblad 2

## 10. SCHOONMAKEN VAN HET APPARAAT

Verwijder de connector van de transformator om het apparaat uit te schakelen voor het schoonmaken. Maak het apparaat schoon met een licht vochtige, pluisvrije doek. Gebruik alleen afwasmiddelen die u in de winkel kunt kopen. Gebruik absoluut geen bijtende schuurpoeders. Wanneer u schoonmaakt, let er dan op dat er geen vloeistoffen aan de binnenkant van het apparaat terechtkomen. Dit kan de juiste werking van het apparaat flink schaden.

## 11. GRENZEN AAN DE PROEVEN MET DIT APPARAAT

Aan het begin van deze beschrijving noemden we al de door Philipp von Lenard uitgevoerde proeven. Kunnen we deze proeven herhalen? Het antwoord is Ja en Nee. Als u bijvoorbeeld wilt aantonen dat de remspanning onafhankelijk is van de intensiteit van de lichtstraal, dan zult u ontdekken dat dit slechts onder bepaalde omstandigheden waar is; een (kleine) afhankelijkheid bestaat inderdaad. Hier is een aantal oorzaken voor aan te wijzen, waarvan de belangrijkste is dat de frequentie van het LED licht afhangt van de stroom die door de LED loopt (volgens de specificaties van alle producenten). Desondanks kan deze proef bij benadering worden uitgevoerd door de draaiknop te gebruiken om de door de instelling niet te veel te laten wijken van de aanbevolen stand van 75%.

Het hier getoonde apparaat is de één van de weinige ter wereld dat in staat is om heel precies de uitkomsten van Plancks constante en de uittreetarbeid van elektronen in metalen heel eenvoudig en snel weer te geven. De afwijking van deze twee waarden is  $< 5\%$ . Daarnaast kunnen, zoals al eerder genoemd, ook Lenards andere proeven bij benadering worden uitgevoerd.

## 12. TECHNISCHE SPECIFICATIES

<b>TECHNISCHE SPECIFICATIES</b>		
Fotocel	Materiaal	Cesium (Cs)
Voltmeter	Display	3 1/2 Punt, LCD
	Precisie	0,5% (typisch)
Ampèremeter	Display	3 1/2 Punt, LCD
	Precisie	1% (typisch)
Afmetingen	BxHxD = 280 mm x 120 mm x 160 mm	
Gewicht	ca. 1 kg	