

Elektrotechnik/Informatik	PHYSIKLABOR	Anwesenheit
Name / Datum Marcel Plösch 20.10.04	V 2.1 Solarzelle, Diode 15.09.2004	Testat

Vor der Versuchsdurchführung müssen die Schlagworte mit Hintergrundwissen erklärt werden können und die nachfolgenden Fragen beantwortet sein.

TIP: Machen Sie sich schon vor Ihrem Versuchstermin mit dem Versuchsaufbau vertraut!

Schlagworte:

Halbleiter, p-n-Übergang, Bändermodell, innerer Fotoeffekt, Diffusionsspannung, Leerlaufspannung, Kurzschlußstrom, Lastwiderstand, Wirkungsgrad einer Solarzelle, Lichtintensität, Beleuchtungsstärke, fotometrisches Abstandsgesetz

Fragen zur Vorbereitung:

1. Was ist ein Halbleiter? Was bedeutet p- bzw. n-Dotierung?
2. Erläutern Sie die Funktionsweise eines p-n-Übergangs!
3. Wie sieht die Kennlinie einer Halbleiterdiode aus?
4. Was passiert, wenn Photonen "passender" Energie auf einen Halbleiter treffen?
5. Warum benötigt man für eine Solarzelle (Halbleiter-Flächendiode) einen p-n-Übergang? *Wegen der Ladungsströmung*
6. Erläutern Sie die Begriffe "Leerlaufspannung", "Kurzschlußstrom", "Lastwiderstand", "Wirkungsgrad", "maximum power point MPP"!

- Wirkungsgrad einer Solarzelle

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{U_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{in}}$$

das Verhältnis zwischen der abgegebenen elektrischen Leistung und der eingestrahlten Leistung
man muss beide Werte kennen, die durch gemessen wird

Dieser gute gilt solange die Last ganz
mit Formel angenommen wird eine
abw. von 2 V 200 mA

- Beleuchtungsstärke nimmt quadratisch
mit dem Abstand ab

Mr. J. J. J.

FACHHOCHSCHULE BINGEN			
Elektrotechnik/Informatik	PHYSIKLABOR	Anwesenheit	Testat
Name / Datum	V 2.1 Solarzelle, Diode 15.09.2024		

Alper + Sofie
KOG

Vor der Versuchsdurchführung müssen die Schlagworte mit Hintergrundwissen erklärt werden können und die nachfolgenden Fragen beantwortet sein.

TIP: Machen Sie sich schon vor Ihrem Versuchstermin mit dem Versuchsaufbau vertraut!

Schlagworte:

Halbleiter-p-n-Übergang, Bändermodell, innerer Fotoeffekt, Diffusionsspannung, Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom, Lastwiderstand, Wirkungsgrad einer Solarzelle, Lichtintensität, Beleuchtungsstärke, fotometrisches Abstandsgesetz

Fragen zur Vorbereitung:

1. Was ist ein Halbleiter? Was bedeutet p- bzw. n-Dotierung? ✓
2. Erläutern Sie die Funktionsweise eines p-n-Übergangs! ✓
3. Wie sieht die Kennlinie einer Halbleiterdiode aus? ✓
4. Was passiert, wenn Photonen "passender" Energie auf einen Halbleiter treffen? ✓
5. Warum benötigt man für eine Solarzelle (Halbleiter-Flächendiode) einen p-n-Übergang? ✓
6. Erläutern Sie die Begriffe "Leerlaufspannung", "Kurzschlussstrom", "Lastwiderstand", "Wirkungsgrad", "maximum power point (MPP)". ✓

Aufgabe 1: Kennlinie einer Diode in Durchlaß- und Sperrrichtung

Bitte schalten Sie vor jeder Schaltungsänderung das Netzgerät aus und kontrollieren Sie die Schalterstellung der Meßgeräte! Verändern Sie die Einstellung der Strombegrenzung am Netzgerät nicht!

Schaltung (z.B. Spannungsrichtung, bei Bedarf bitte Stromrichtig messen):

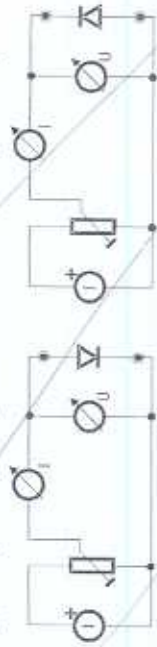


Tabelle 1a: Diode in Durchlaßrichtung $I = f(U)$ mit $I_{\text{beg}} = 0,1 \text{ A}$ und $U = 0 \dots 2,0 \text{ V}$

Tabelle 1b: Diode in Sperrrichtung $I = f(U)$ mit $I_{\text{beg}} = 0,1 \text{ A}$ und $U = 0 \dots 3,0 \text{ V}$

Grafik 1: Kennlinie $I(U)$

Aufgabe 2: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Lichtquellenentfernung

Schließen Sie den Beleuchtungsstärke-Sensor an das Meßgerät an (Bereich DC-Strom 2 mA). Stellen Sie die Halogenlampe so auf, daß ihre Position mit der Nullmarke der Entfernungsskala zusammenfällt. Beginnend mit einer Entfernung von 25 cm zur Lampe, verschieben Sie den Sensor in 3 cm-Schritten parallel von der Lampe weg und bestimmen jeweils die Beleuchtungsstärke aus dem gemessenen Strom unter Zuhilfenahme der Gleichung $E = \frac{I_{\text{phot}}}{0,07 \mu\text{A}}$. Warum dürfen Sie dabei den Sensor nicht verdrehen oder kippen?

Tabelle 2: Entfernung x , I_{phot} , E (11 Meßwerte)

Grafik 2: $E = f(x)$

Durch welche Funktion kann der Kurvenverlauf beschrieben werden? Diskutieren Sie Abweichungen von der erwarteten Funktion!

Aufgabe 3: Spannungs-Strom-Kennlinien einer Solarzelle bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken

Verbinden Sie die Solarzelle und das Strom- und das Spannungsmeßgerät mit den dafür vorgesehenen Eingängen der Meßbox. Lassen Sie die Meßgeräte während der Messung angeschlossen. Für die Messung der Spannungs-Strom-Kennlinie der Solarzelle wird jeweils bei den drei Beleuchtungsstärken 3000 lx, 6000 lx und 9000 lx der Lastwiderstand schrittweise durch Verstellen des Drehknopfes im Uhrzeigersinn vergrößert (empfehlenswerte Schrittweite 2 V).

Sie erhalten 3 x 7 Meßwerte jeweils für die Spannung U und den Strom I . Die zusätzlichen Werte für den Kurzschlussstrom (hier müßte der Lastwiderstand ja 0 Ω betragen) und die Leerlaufspannung (hier müßte der Lastwiderstand unendlich groß sein) erhalten Sie, in dem Sie die Solarzelle bei den 3 Beleuchtungsstärken direkt mit dem Strom- bzw. Spannungseingang des Meßgerätes verbinden.

Tabelle 3: 3 Meßreihen mit 7 Meßwerten I , U für jede Beleuchtungsstärke

Grafik 3a: Kennlinie I (y-Achse) über U (x-Achse)

Bestimmen Sie aus den Kurvenverläufen jeweils auch den Punkt maximal entnehmbarer elektrischer Leistung ["maximum power point" (MPP)]

Grafik 3b: Abhängigkeit der Leerlaufspannung und des Kurzschlußstroms von der Beleuchtungsstärke auf (2 Kurven mit je 3 Punkten).
Welche elektrische Kenngröße ändert sich beim Wechsel von strahlendem Sonnenschein zu trübem Himmel stärker?

Aufgabe 4: Parallel- und Reihenschaltung - von Solarzellen zu Solarmodulen

Stellen Sie eine Solarzelle im Abstand von 35 cm zur Lampe auf, eine zweite sollte mit angeschlossenem Strommeßgerät daneben so ausgerichtet werden (Flächennormale etwa Richtung Lampe, ca. gleiche Entfernung), daß ein maximaler Kurzschlußstrom fließt. Bestimmen Sie die Beleuchtungsstärke am Ort der Solarzelle. Messen Sie zunächst für beide Solarzellen einzeln den Kurzschlußstrom im DC-Strommeßbereich 20A und die Leerlaufspannung im DC-Spannungsmeßbereich 2 V. Schalten Sie nun die Solarzellen einmal parallel und dann in Reihe und messen Sie jeweils Kurzschlußstrom und Leerlaufspannung. Interpretieren Sie das Ergebnis.

Tabelle 4: Kurzschlußstrom, Leerlaufspannung bei konstantem E jeweils einzeln, bei Parallelschaltung und bei Reihenschaltung

Für Studenten der Elektrotechnik/Ingenieurinformatik zusätzlich:

Decken Sie bei gleicher Versuchsanordnung wie zuvor eine Solarzelle halb ab (dies kommt durch Abschattung oder Verschmutzung von Modulen häufig vor). Halten Sie Kurzschlußstrom und Leerlaufspannung jeweils für Parallel- und Reihenschaltung beider Solarzellen in einer Tabelle fest. Interpretieren Sie Ihre Ergebnisse!

Auswertung:

Geben Sie die „Genauigkeit“ für **alle** Ihre Meßwerte an. Schätzen Sie hierzu die Genauigkeit der Messungen ab und begründen Sie Ihre Annahmen (Meßgerätauflösung etc.).
Bei errechneten Größen verwenden Sie eine geeignete Methode der Fehlerfortpflanzung.
Tragen Sie in alle Graphen die entsprechenden Fehlerbalken bzw. -kreuze ein!

Anmerkung:

Statistische Auswertungen sind nicht nötig.

Schlagworte

- Halbleiter = die Grundlage der Elektronik sind Festkörper, wie Silicium, Germanium und Selen, die sich in ihrem Leistungsverhalten anders verhalten als Metalle. Halbleiter besitzen bei 0K keine freien Elektronen! sind bei dieser Temperatur Isolatoren. Bei höheren Temperaturen erhalten sie eine gewisse Leitfähigkeit. Der Widerstand eines Halbleitermaterials nimmt bei Temperaturerhöhung ab. Halbleiter werden als Halbleiter verwendet.

pn-Übergang

Verhalten	positiver Pol am p-Leiter	negativer Pol am p-Leiter
Verhalten der Majoritätsträger	Elektronen & Defektelektronen werden in die Grenzschicht getrieben	Elektronen & Defektelektronen entfernen sich aus der Grenzschicht
Trägerdichte in der Grenzschicht	wird erhöht, die Grenzschicht wird aufgebaut	wird vermindert, die Grenzschicht wird verbreitert
elektrisches Verhalten des pn-Übergangs	niederohmig der pn-Übergang ist in Durchlassrichtung gepolt	hochohmig, der pn-Übergang ist in Sperrrichtung gepolt

- Leerlaufspannung



$$U_L = U_0$$

Spannung der Quelle ohne Belastung

- Kurzschlussstrom

$$I_K = \frac{U_0}{R_P}$$



- Beleuchtungsstärke

ist bei senkrechtem Lichteinfall proportional zur Lichtstärke I und umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung r

$$E = \frac{I}{r^2}$$

ein Lux (lx) ist diejenige Beleuchtungsstärke, die eine Lichtquelle von der Lichtstärke 1 Candela aus 1m Abstand auf eine Fläche von 1m² bei senkrechtem Lichteinfall erzeugt. Die Beleuchtungsstärke E ist der Quotient aus dem Lichtstrom Φ und dem Flächeninhalt A der beleuchteten Fläche

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

- Bändermodell

werden die Zustände von Elektron in einem Kristall beschreiben. Es gibt mehrere Energiebereiche, in denen viele quantenphysikalisch mögliche Zustände existieren, die energetisch so dicht liegen, dass sie als Kontinuum - als Energieband angesehen werden können.

- Innerer Photoeffekt

Die Solarzelle Material:

- hauptsächlich kristallines Silizium
- Auch andere Halbleitermaterialien sind verwendbar Funktionsweise
- Energiezufuhr durch Licht $\rightarrow$ Anhebung von Valenzelektronen in ein höheres Energieniveau, das sog. Leitungsband $\rightarrow$ elektrische Leitfähigkeit $\rightarrow$ Entstehung freier Ladungsträger
 - $\rightarrow$ Elektronen: negative Ladungsträger
 - $\rightarrow$ Löcher: positive Ladungsträger
- Verwendung einer negativ dotierten und einer positiv dotierten Si-Schicht
- zur Erzeugung eines elektrischen Feldes
- Elektronen und Löcher werden in entgegengesetzte Richtungen getrieben
- Verbindung von Zellen Vorder- und Rückseite
- geschlossener Stromkreis
- Solarzelle als Spannungsquelle

- Lastwiderstand

eines Verstärkers ist als Eingangswiderstand der Abschlusswiderstand einer Vortergeschalteten Verstärkerschaltung, die als Quelle vorhanden ist. Er wird auch mit Außenwiderstand bezeichnet.

Antwort

1) siehe Schlagwörter!

p = Konzentration der Defektelektronen m^{-3}
 n = " " Elektronen m^{-3}

n -dotierung = Dotierung erfolgt mit einem Element höherer Wertigkeit (Elektronenspendendes Element wird Donator genannt).

p -dotierung = Dotierung erfolgt mit einem Element niedriger Wertigkeit (Elektronen aufnehmendes bzw. Defektelektronenspendendes Element wird Akzeptor genannt).

→ Wirkungsgrad einer Solarzelle

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{inc}}} = \frac{J_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}}{J_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}}$$

das Verhältnis aus abgegebener elektrischer Leistung und der eingestrahlten Leistung.

Man muss beachten welche Fläche angenommen wird.

→ Automatisches Abstandsgerate

Dieses gilt so lang die Lichtstrahlung für ein angenommenes Licht
kann also $r \gg d$ oder $r > 10 \cdot d$

- Beleuchtungsstärke nimmt quadratisch mit der Abstandsgerate ab

- Beleuchtungsstärke am größten wenn senkrecht zur Lichtquelle liegt

3)



- a) $\ominus$ Elektronen und $\oplus$ Löcher beweglich
Ga-Ionen As^+ -Ionen fest, b) Konzentration von Elektronen und Löchern, logarithmische Auftragung --- ohne äußeres Feld --- Feld in Durchlassrichtung, --- Feld in Sperrrichtung

- 6) Leerlaufspannung
Kurzschlussstrom siehe Schlagsort
Lastwiderstand S

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzarbeit}}{\text{zugeführte Arbeit}} \quad \eta = \frac{W_{\text{abs}}}{W_{\text{zug}}}$$

Der Wirkungsgrad η ergibt sich durch den Quotienten von Nutzenenergie W_{Nutz} und der gesamten aufgewendeten Energie W

$$\eta = \frac{W_{\text{Nutz}}}{W}$$

- 4) Durch Photonen passender Energie werden Elektronen des pn-Übergangs vom Valenzband in das Leitungsband erhoben. Es kann also ein Strom fließen. Durch eine entsprechende Vorspannung kann man die Energie bestimmen, die nötig ist um eine Elektron in das Leitungsband zu erheben.

- zu 3) Die Kennlinie einer Halbleiterdiode kann im Durchlaßfall durch folgende Gleichung beschrieben werden.

$$I_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_{TS}}} - 1) \quad \text{im Sperrfall wird } I_D$$

idealisiert mit 0 angenommen



- zu 6) Leerlaufspannung $\rightarrow$ Spannung an der Solarzelle bei einem unendlich großem Lastwiderstand (Strom = 0)
Kurzschlussstrom $\rightarrow$ Strom bei Vollast (Lastwiderstand = 0)
Lastwiderstand $\rightarrow$ Der Widerstand an dem die Solarzelle Leistung abgibt

Wirkungsgrad $\rightarrow$ Verhältnis von abgegebener (elektrischer) Leistung zu zugeführter (Strahlungs) Leistung
Hier: $\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$

MPP $\rightarrow$ Der Punkt der Kennlinie, an dem die Solarzelle maximale Leistung abgibt.

2) Fügt man p- und n-dotiertes Halbleitermaterial zusammen, so rekombinieren Elektronen des n-Materials mit den Löchern. Es entsteht an dem Übergang eine ladungsneutrale Zone. Sobald diese Zone hinreichend groß geworden ist, sodass keine Elektronen mehr in das p-Material aufzunehmen können, ist die Diffusionsspannung von ca. 0,7V messbar. Mit einer von außen angelegten Spannung kann man diese Sperrschicht vergrößern (Sperrpolung) oder überwinden werden (Durchlasspolung), indem die Elektronen und Löcher entweder von der Sperrschicht weg oder zu der Sperrschicht hin gedrängt werden.

5) Wegen der Ladungstrennung

Solarzelle

Aufgabe 2: Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Lichtquellenentfernung

S/m	0,25	0,28	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,52
I/mA	0,46	0,38	0,32	0,28	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,13
E/Ix	6571	5428	4571	4000	3285	2857	2571	2285	2000	1852

Grafik 2



Messwert Genauigkeit $\frac{S}{m}$ für I bis 0,001 mit

Durch welche Funktion kann der Kurvenverlauf beschrieben werden?

Der Kurvenverlauf kann durch $f = k \frac{1}{s^2}$ angenähert werden, wobei k als konstante passend zu wählen ist. Die Intensität nimmt also quadratisch mit der Entfernung ab. Die Abweichungen in der Grafik sind als Meßfehler zu deuten.

Aufgabe 3: Spannungs-Strom-Kennlinien einer Solarzelle bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken

Tab 3.1
E = 3000 lx
38 cm

R_L/Ω	0	3	6	9	12	15	18	20
U/mV	18	81	193	295	373	422	440	448
I/mA	140	137	136	130	122	109	94	87

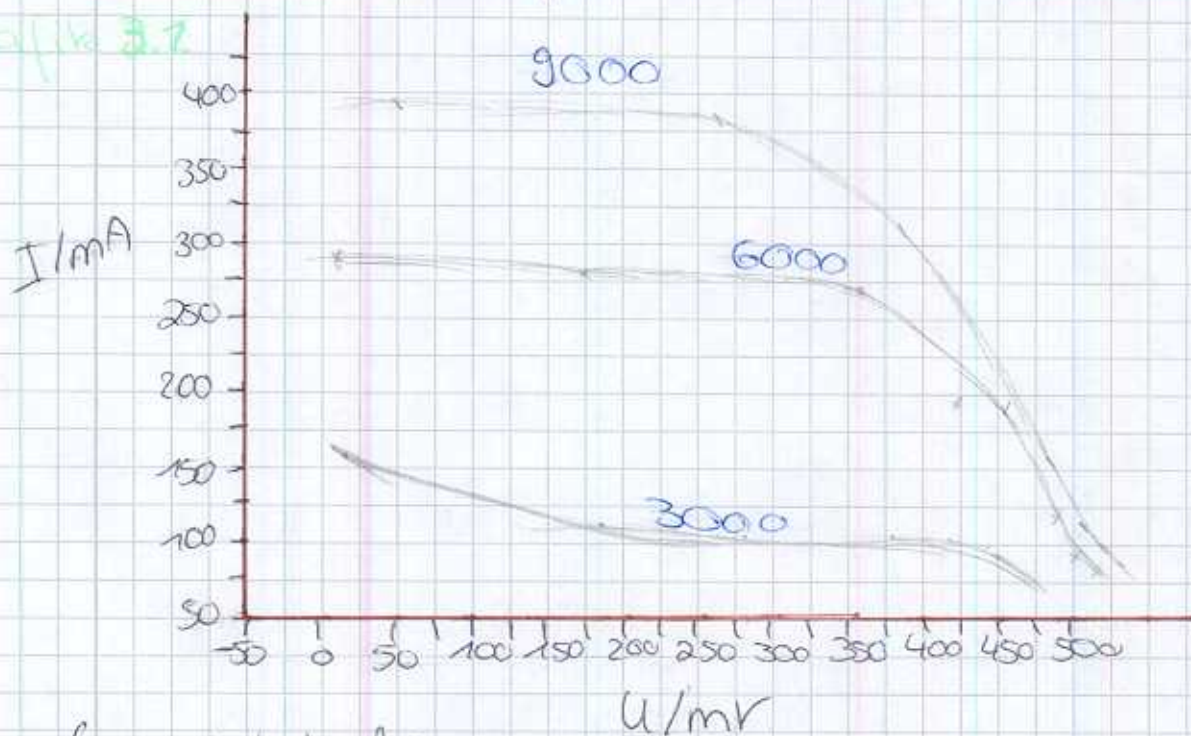
Tab 3.2
E = 6000 lx
26 cm

R_L/Ω	0	3	6	9	12	15	18	20
U/mV	36	175	370	453	479	493	500	503
I/mA	270	267	248	196	153	124	105	98

Tab 3.3
E = 9000 lx
20,5 cm

R_L/Ω	0	3	6	9	12	15	18	20
U/mV	50	262	437	483	498	505	510	511
I/mA	385	382	313	217	160	128	108	95

Graphik 3.1



Genauigkeit für

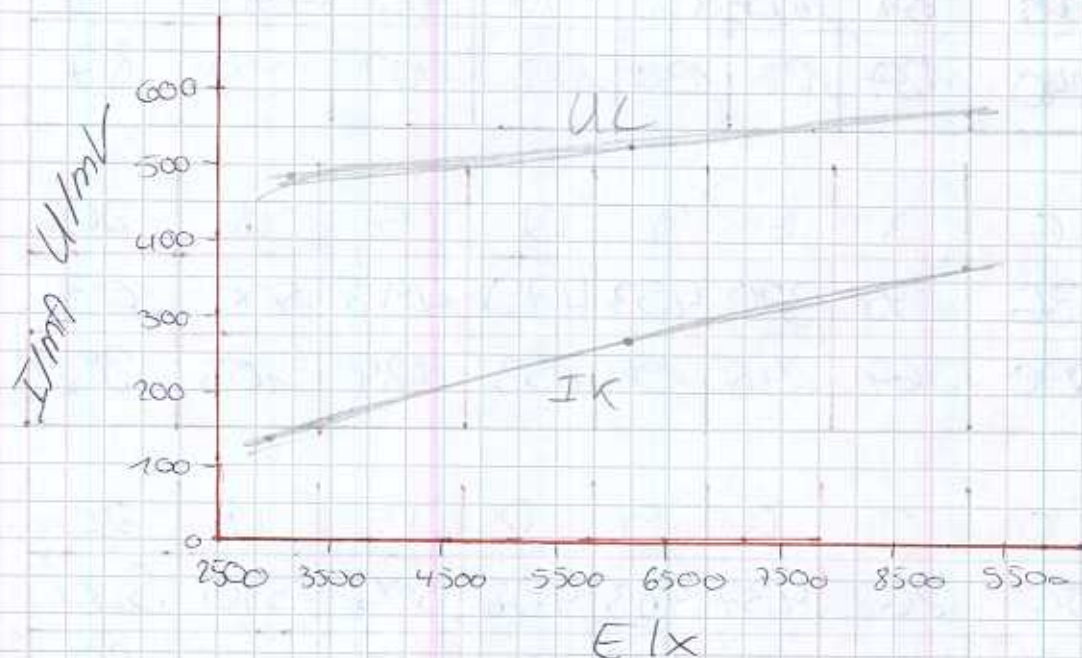
$\Delta I \approx 0,001 \text{ mA}$ und $U \approx 1 \text{ mV}$

• 3000
x 6000
✓ 9000

Der MPP ist der Punkt maximaler Leistungsabgabe. Man kann ihn in dem Diagramm bestimmen, es ist der Punkt auf der Kennlinie, der das Rechteck mit der größten Fläche aufspannt.

$$i \cdot f(u) \cdot \text{MPP} : u_i \cdot \left| \frac{d(u \cdot f(u))}{du} \right| = 0 \quad \frac{d^2(u \cdot f(u))}{du^2} < 0$$

E / I_x	3000	6000	9000
U_L / mV	490	516	529
I_K / mA	142	268	383



Aufgabe 4

Parallel- und Reihenschaltung von Solarzellen zu Solarmodulen

	Solarzelle 1	Solarzelle 2	Mittelwert Solarzelle 3
I_k / mA	182	177	179,5
U_k / mV	496	466	481
E / lx	2600	2529	2564

	Parallelschaltung	Reihenschaltung
I_k / mA	351	183
U_k / mV	480	959

	Parallelschaltung	Reihenschaltung
I_k / mA	264	98
U_k / mV	466	929