

Quantenausbeute bei der inneren lichtelektrischen Wirkung im Gebiet starker Absorption.

Von Alfred Schröppel.

Inhaltsübersicht.

	Seite
A. Einführung	88
B. Meßverfahren	89
a) Verstärker	89
b) Lichtquellen und Lichtmodulation	90
c) Intensitätsmessung	91
C. Quantenausbeute an Selenphotoelementen	96
a) Empfindlichkeitsverteilung auf der Oberfläche von 12 SAF- und 4 Elektrocell-Photoelementen	96
b) Vergleich der Gleich- und Wechselstrommessungen	97
c) Quantenausbeute an der empfindlichsten Stelle unter 24 Photo- elementen	97
D. Becquereleffekt an Selen	100
a) Die Becquerelzelle	100
b) Einfluß des Elektrolyten und zeitliche Konstanz	101
c) Temperaturabhängigkeit des Kurzschlußstroms	103
d) Spektrale Verteilung	103
e) Vergleich von Kurzschlußstrommessungen und solchen mit Ohm- scher Belastung	103
f) Frequenzabhängigkeit	104
g) Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Ausbeute	104
h) Quantenausbeute	105
E. Becquereleffekt an Bleiglanz	106
a) Die Becquerelzelle	106
b) Meßanordnung und Ergebnisse	106
F. Becquereleffekt an Silbersulfid	108
a) Die Becquerelzelle	108
b) Frequenzabhängigkeit	109
c) Spektrale Ausbeute	109
G. Becquereleffekt an Antimonselenid	110
H. Zusammenfassung	110

A. Einführung.

Bei der inneren lichtelektrischen Wirkung sind die wichtigsten Größen die Quantenausbeute

$$\left(\frac{\text{Anzahl der befreiten Elektronen}}{\text{Anzahl der absorbierten Quanten}} \right)$$

und die Geschwindigkeit (Energie) der befreiten Elektronen.

Für die lichtelektrische Leitung in Isolatoren ist im Bereich schwacher Absorption in einigen Fällen eine Quantenausbeute von rund 1 nachgewiesen ¹⁾, bei stärkerer Absorption bleibt sie weit dahinter zurück ²⁾; über die Energie der befreiten Elektronen ist infolge der angelegten Spannung keine Aussage möglich.

Eine andere Beobachtungsmöglichkeit innerer lichtelektrischer Wirkung ist im Sperrschicht- und Becquereleffekt gegeben. Hier lassen sich sowohl Aussagen über die Energie der ausgelösten Elektronen machen, wie über die Quantenausbeute.

Während früher veröffentlichte spektrale Verteilungen in Sperrschicht- und Becquerelanordnungen keineswegs konstante Quantenausbeute im Spektrum zeigen, sondern eine bei stärkerer Absorption abnehmende, ist in letzter Zeit sowohl für Cu_2O in der Becquerelanordnung ³⁾ wie für PbS im Lichtdetektor ⁴⁾ eine konstante Quantenausbeute auch für Spektralgebiete stärkster Absorption beobachtet. Hieraus ist der Schluß gezogen worden, daß entgegen früher bevorzugten Auffassungen die innere lichtelektrische Wirkung nicht an Störstellen gebunden ist, sondern auch bei der Absorption im Gitter selbst statthaben kann.

Je nach den Vorstellungen, die man sich über die Bewegung der befreiten Elektronen im Gitter macht, wird man als Grenzwert der Quantenausbeute 0,5 oder 1 erwarten. Für Cu_2O im Elektrolyten (Becquerelanordnung) ist der Wert 1 gefunden ⁵⁾; jedenfalls ist der Wert 0,5 überschritten. An Selen

1) B. Gudden, Lichtelektrische Erscheinungen, S. 150, 1928.

2) Vgl. jedoch W. Lehfeldt, Gött. Nachr., math.-physik. Kl. (N. F.) 1, S. 171, 1935.

3) G. Faltz, Ann. d. Phys. (5) 30, S. 193, 1937.

4) Fr. Fischer, B. Gudden und M. Treu, Phys. Ztschr. 39, S. 127, 1938.

5) G. Faltz, a. a. O.

in der Becquerelanordnung hatten Volmer und Moll¹⁾ mit dem Verfahren der Ausgleichsströme ebenfalls eine Quantenausbeute um 1 beobachtet. Für Selenphotoelemente liegen keine genaueren Angaben vor; Kluge²⁾ gibt 0,2 an, Liandrat³⁾ vermutet 0,5 als Grenzwert, während B. Lange⁴⁾ sogar eine Überschreitung des Wertes 1 auf Grund der von ihm bevorzugten Vorstellung der Diffusionspotentiale für möglich hält, ohne jedoch Messungen zu bringen.

Wir hatten nun die Aufgabe:

1. die absolute Ausbeute an Selensperrschichtzellen zu ermitteln und insbesondere zu klären, ob der Wert 0,5 bzw. 1,0 überschritten werden kann;
2. zu prüfen, ob die Ergebnisse von Faltz an Cu_2O auch für Selen gelten, d. h. ob in der Becquerelschen Anordnung für Kurzschlußströme die Quantenausbeute im Gebiet starker Eigenabsorption konstant ist;
3. ob sich diese Befunde auch auf weitere Halbleiter übertragen lassen.

B. Meßverfahren.

a) Verstärker.

Die lichtelektrischen Ströme wurden im Wechsellicht als Wechselströme mit Verstärker gemessen, um nicht durch Zimmerlicht bzw. elektrochemische Veränderungen gestört zu werden.

Der Eingang des verwendeten Niederfrequenzbandverstärkers war durch einen Übertrager an Außenwiderstände von 0,1 bis 100 Ohm anzupassen. Die Spannungsverstärkung konnte bei 300 Hertz (Verstärkungsmaximum) zwischen 10^2 und 10^7 verändert werden.

Um von etwaigen Änderungen der Verstärkereichung unabhängig zu sein, wurde bei Messungen der absoluten Ausbeute

1) M. Volmer u. W. Moll, Ztschr. f. phys. Chem. A, 161, S. 401, 1932.

2) W. Kluge, Ztschr. f. techn. Phys. 16, Nr. 7, S. 185, 1935 bzw. K. O. Kiepenhauer, Die Sterne, 1934, H. 4—5, S. 81.

3) G. Liandrat, Thèses, Paris 1935. Nr. d'ordre 2454, Serie A, Nr. 1588.

4) B. Lange, Die Photoelemente und ihre Anwendung, 2. Teil, S. 9, 1936.

jedesmal im Wechsel mit dem Photoelement eine Vakuum-photozelle mit Licht gleicher Modulation belichtet und dessen Intensität so geregelt, daß bei gleicher Verstärkung die Ausgangsspannung dieselbe war wie beim untersuchten Photoelement; der lichtelektrische Zellenstrom wurde gleichzeitig als arithmetischer Mittelwert mit einem Schleifengalvanometer gemessen.

So ergab die Verstärkerausgangsspannung unmittelbar den Eingangsphotostrom in seinem arithmetischen Mittelwert und eine Umrechnung von Effektivwert auf Scheitelwert wurde überflüssig. Die Photoelemente und -zellen wurden durch abgeschirmte Kabel mit dem Verstärkereingang verbunden; deren Wechselwiderstand blieb unter 0,1 Ohm.

b) Lichtquellen und Lichtmodulation.

Lichtquellen waren eine Quarzquecksilberlampe (110 Volt, 5 Amp.), ein batteriegespeicher Nernststift (95 Volt, 0,5 Amp.) und gelegentlich eine Wolframspirallampe (200 Watt). Das Licht wurde mit einem Quarzdoppelmonochromator¹⁾ spektral zerlegt; wenn größere Intensitäten nötig waren, wurden die Hg-Linien auch mit Filtern²⁾ ausgesondert.

Um einen genügend sinusförmigen Wechsel der Lichtintensität zu erhalten, rotierte eine Scheibe mit 12 bzw. 16 kreisförmigen Löchern³⁾ von 30 mm Durchmesser vor einer quadratischen

1) Bei Benutzung der Hg-Linien wurden zwei Leichtflint-Prismen, für das Nernststiftspektrum von 550—760 m μ zwei Schwerflintprismen verwendet. Zur Eichung des Monochromators in diesem Gebiet benutzten wir außer den lichtstarken Hg-Linien 546 und 577/79 m μ die schwachen Hg-Linien 623,4, 671,7, 690,8 und 708,3 m μ , indem wir den Mittelspalt des Monochromators mit einer Lupe beobachteten.

2) Vorfilter 5 cm H₂O + Schottglas BG 19 4 mm

Filter für 578 m μ Schottgl. OG 1 (2 mm) + BG 7 (1 mm)

„ „ 546 „ „ GG 11 (2 „) + Neodymglass 8 mm

„ „ 436 „ „ BG 12 (5 „) + 2 cm konz. NaNO₂

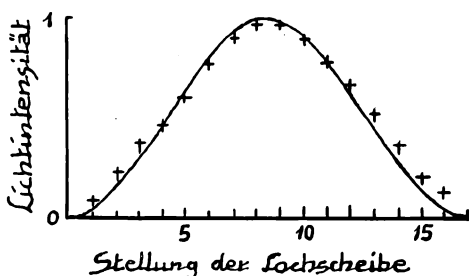
„ „ 365 „ „ UG 1 (2 „).

Die spektrale Prüfung ergab nur für 546 m μ meßbare Beimengung von falschem Licht. (8 % 578 m μ).

3) Gelegentlich benutzten wir auch eine Pertinaxscheibe mit 20 Löchern von 36 mm Durchmesser, um das Licht noch besser auszunützen.

Blende von 30 mm Kantenlänge im parallelen Strahlengang und die Lichtquelle (runde oder rechteckige Blende) wurde auf dem Empfänger abgebildet. Abbildung 1 zeigt, wieweit die Annäherung am sinusförmigen Verlauf geht.

Abb. 1.
Intensitätsverlauf
des Wechsellichtes.
Ausgezogene Kurve:
Sinuslinie;
+ Meßpunkte.



Mit dieser Anordnung war es allerdings nicht möglich, die Photoelemente auszuleuchten; dies war jedoch kein Nachteil, da der verhältnismäßig kleine Lichtfleck von etwa 10 mm² eine Abtastung der Oberflächen erlaubte.

c) Intensitätsmessung.

Besondere Sorgfalt wurde der absoluten Intensitätsmessung gewidmet, da hier Fehler von 100 % leicht unterlaufen können.

Zur Verfügung standen drei empfindliche Strahlungsthermoelemente ohne Fenster und ohne jede Strahlungskonzentration, sowie drei Strahlungsnormale.

I. Die Thermoelemente (vgl. Abb. 2).

1. Thermoelement mit einer Lötstelle von Zeiß [HG]¹⁾
Auffangefläche $7,0 \pm 0,05 \text{ mm}^2$ ²⁾
2. Desgl. Thermoelement mit einer Lötstelle von Zeiß [WA]
Auffangefläche $5,9 \pm 0,05 \text{ mm}^2$ ³⁾

1) Bei diesem Thermoelement [HG] mußte ein konischer Ring (R) (siehe Abb. 2), der bei der normalen Benutzung ein Quarzfenster hielt, entfernt werden, da er auffallende Strahlung zusätzlich auf das Th-El. reflektierte.

2) Bestimmt durch optische Abbildung und Ausmessung des vergrößerten Bildes. Seitlicher Ansatz ist nicht berücksichtigt; seine Hinzunahme vergrößert die Fläche um 11 %.

3) Flächenbestimmung wie bei 1. [HG], seitlicher Ansatz würde die Fläche um rd. 10 % vergrößern.

3. Mikrothermosäule von Kipp & Zonen [FG]

Auffangefläche $27,6 \pm 0,1 \text{ mm}^2$ ¹⁾

Alle drei Empfänger standen in Verbindung mit einem Zernike-Galvanometer Ze; um aperiodische Einstellung ohne Kriechen zu erhalten, war dessen magnetischer Nebenschluß ganz eingeschaltet und lagen noch 200 Ohm in Reihe. Die Stromempfindlichkeit betrug $2,55 \cdot 10^{-10}$ Amp. je mm bei 2 m Skalenabstand ²⁾.

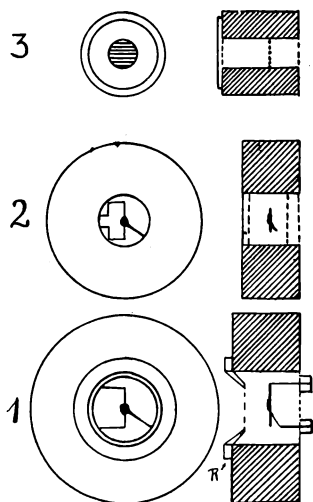


Abb. 2.

Vorderansicht und Querschnitt der verwendeten Thermoelemente.

1. Strahlungsthermoelement [HG] (konischer Ring R abnehmbar)
2. Strahlungsthermoelement [WA]
3. Mikrothermosäule [FG].

II. Die Gesamtstrahlungsnormale.

1. Kohlenfadenglühlampe /12

Eichwert d. PTR vom 30. 12. 37 $71,8_2 \cdot 10^{-8} \text{ W/mm}^2$

2. Kohlenfadenglühlampe /13

Eichwert d. PTR vom 30. 12. 37 $62,2_3 \cdot 10^{-8} \text{ W/mm}^2$

3. Hefnerlampe mit iso-Amylacetat

Wert nach W. Gerlach ³⁾ $23,5 \cdot 10^{-8} \text{ W/mm}^2$

Alle drei Werte für 2 m Abstand.

Normale und Empfänger waren den Vorschriften der PTR entsprechend aufgestellt (vgl. Abb. 3).

Die Glühlampen wurden von einer Sammlerbatterie von 120 Volt gespeist ⁴⁾. Die beiden Glühlampen lieferten innerhalb

1) Mit dem Kathetometer Durchmesser der Kreisöffnung bestimmt.

2) Die offenen Th-El. waren gegen Luftströmungen sehr empfindlich; die Messungen waren daher nur im ungeheizten und daher völlig gleichmäßig temperierten Zimmer möglich. Die Anschlußkontakte waren überdies mit Watte gegen Temperaturschwankungen geschützt.

3) W. Gerlach, Phys. ZS. 14, S. 577, 1913.

4) Eine gewisse Unsicherheit liegt in der Spannungsmessung, da kein Kompensationsapparat verfügbar war.

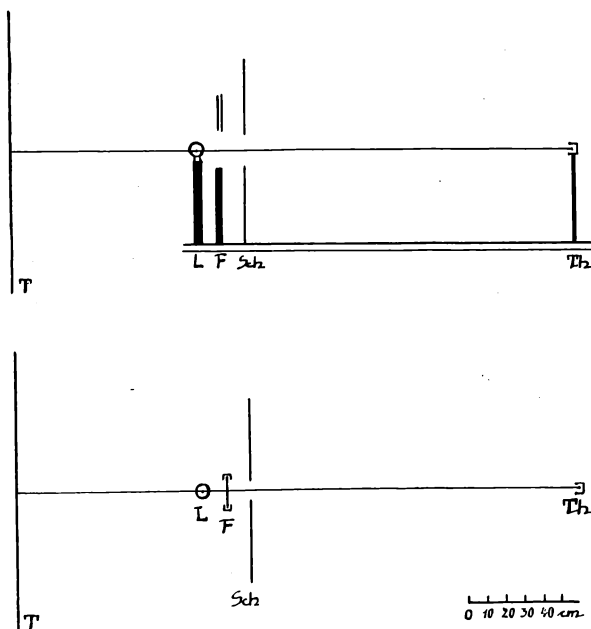


Abb. 3.

Aufriß und Grundriß der Meßanordnung zur Eichung der Thermoelemente nach Angabe der PTR.

T: Schwarzes Tuch; L: Strahlungsnormal (Kohlenfadenlampe der PTR. bzw. Hefnerlampe); F: Fallklappe aus Weißblech, die dem Thermoelement (Th.) zugewandte Seite ist mit mattschwarzer Pappe beklebt; Sch: Schirm aus mattgeschwärzter Pappe mit Blendenausschnitt.

der Meßgenauigkeit von 2 % den gleichen Thermospannungsaus-
schlag je Watt, die Hefnerlampe einen um 4 % größeren.
Die Eichung der drei Strahlungsempfänger mit der Strahlungs-
normale /13 ergab im Mittel aus je 7 Meßreihen die Werte:

Tabelle 1.

Empfänger	Skalenteile	Intensität mal Fläche	Watt/Skalenteil
[HG]	$15,0 \pm 0,2$	$4,35 \mu W \pm 2,7 \%$	$0,29 \mu W/\text{Skt.} \pm 4 \%$
[WA]	$12,2 \pm 0,2$	$3,67 \mu W \pm 2,8 \%$	$0,30 \mu W/\text{Skt.} \pm 4 \%$
[FG]	$87,5 \pm 0,5$	$17,2 \mu W \pm 2,4 \%$	$0,196 \mu W/\text{Skt.} \pm 3 \%$

III. Prüfung der Eichung.

Es kam nun darauf an, ob diese drei Empfänger eine über-
einstimmende Angabe liefern, wenn sie sich nicht in einem aus-

gedehnten, praktisch parallelen Strahlenbündel befinden, sondern eine Lichtquelle auf die Empfängerfläche abgebildet wird. Dieser Vergleich erfolgte sowohl mit Licht der Hg-Linie $546\text{ m}\mu$, wie mit einem Ultrarotbereich, der mit einem Schwarzfilter aus dem Spektrum eines 4 Volt-Glühlämpchens ausgesondert wurde und etwa Wellenlängen $0,8$ bis $3\text{ }\mu$ umfaßte.

Um die Konstanz der Hg-Lampe bei Vergleich der drei Empfänger zu überwachen, wurde ein Teil des Lichtes mit einer planen Glasplatte aus dem Strahlengang abgezweigt und auf eine Selensperrschichtzelle geworfen. Das Bild auf den Empfängern war so klein, daß alles Licht aufgefangen wurde. Für den Ultrarotbereich wurde Spiegeloptik benutzt, um die Abbildung im Sichtbaren prüfen zu können. In Tabelle 2 sind die von den drei Thermoelementen jeweils gemessenen Strahlungsenergiewerte zusammengestellt.

T a b e l l e 2.

Empfänger	Gemessene Energien für	
	$\lambda = 546\text{ m}\mu$	Ultrarot
[HG]	$7,3\text{ }\mu\text{ W}$	$70,0\text{ }\mu\text{ W}$
[WA]	$7,0\text{ }\mu\text{ W}$	$68,0\text{ }\mu\text{ W}$
[FG]	$8,5\text{ }\mu\text{ W}$	$104,0\text{ }\mu\text{ W}$

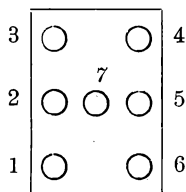
Während also die beiden Empfänger mit einer Lötstelle befriedigend übereinstimmende Werte lieferten, weicht der von der Mikrothermosäule gelieferte Wert stark ab. Grund dafür ist, daß die Thermospannung der Mikrothermosäule stark von der Verteilung der Strahlung über die Fläche abhängt. Diese ist aber bei freier Strahlung (Eichung mit der Strahlungsnormale) und Abbildung notwendig verschieden. Der Empfänger [FG] schied also trotz seiner größeren Empfindlichkeit für unsere Absolutmessungen aus.

Die Angaben der beiden Empfänger unterscheiden sich um $\pm 2\%$, die Größe ihres Absorptionsvermögens ist nicht bekannt, liegt aber — mindestens im Sichtbaren — nicht weit von 100% . Schätzen wir schließlich die Zuverlässigkeit unserer Normale auf $\pm 3\%$, so glauben wir, daß unsere Angaben über die absolute Ausbeute bezogen auf auffallende Intensität auf $\pm 5\%$ zuverlässig sind.

C. Quantenausbeute an Selen-Photoelementen.

a) Empfindlichkeitsverteilung auf der Oberfläche von 12 SAF- und 4 Elektrocell-Photoelementen.

Gemessen wurde im monochromatischen, sinusförmigen Wechsellicht ($\lambda = 578 \text{ m}\mu$ und $f = 166$ Hertz) mit Verstärker bei 100 Ohm Anpassung. Die Zellen wurden mit einem Lichtfleck von 3 mm Durchmesser nach nebenstehendem Schema abgetastet.



Aus Tabelle 3 ist die Empfindlichkeit für 7 Stellen jeder Zelle ersichtlich.

Tabelle 3.

Zelle	Relative Empfindlichkeitverteilung auf der Oberfläche							Relative Empfindlichkeit der empfindlichsten Stelle jeder Zelle bezogen auf Zelle 18	Quantenausbeute für die empfindlichste Stelle jeder Zelle bezogen auf Zelle 18 $\lambda = 578 \text{ m}\mu$
	1	2	3	4	5	6	7		
SAF.									
301	88	94	99	100	95	88	90	96	0,45
302	98	98	85	72	89	100	93	99	0,47
303	91	100	86	93	86	97	86	95	0,45
4	84	89	71	89	98	98	100	70	0,33
5	92	94	96	100	94	92	96	83	0,40
6	100	98	90	88	90	97	93	90	0,43
8	100	85	74	100	99	96	93	88	0,42
9	92	95	98	98	100	95	97	95	0,45
11	95	50	79	65	50	100	56	81	0,39
13	97	100	96	91	93	91	97	74	0,35
17	88	93	88	95	100	100	93	74	0,35
18	97	100	97	93	91	74	91	100	0,475
Elektrocell									
21	100	90	97	90	90	92	90	72	0,34
22	90	90	90	95	96	100	96	78	0,37
23	81	90	100	90	82	72	81	74	0,35
24	65	74	96	100	88	65	75	84	0,40

Neben Elementen, die sehr gleichmäßig sind, zeigen andere Empfindlichkeitsschwankungen von 30 % und mehr ¹⁾. Dafür

1) J. S. Preston, Journ. of the Inst. of Electr. Eng. Vol. 79, No. 478, S. 431, 1936.

kann der Widerstand der Deck-Elektrode nicht verantwortlich gemacht werden, da die Randstellen nicht bevorzugt sind. Weil wir auch an einzelnen Selenbecquerelzellen entsprechende Empfindlichkeitsschwankungen feststellten, können Inhomogenitäten des Sells selber die Ursache sein.

b) Vergleich der Gleich- und Wechselstrommessungen.

18 Photoelemente wurden im Wechsellicht ($f = 166 \text{ Hz}$) mit solcher Intensität belichtet, daß der Effekt bei allen Zellen gleich war (Verstärkeranpassung 10 Ohm). Gleichzeitig wurde der Kurzschluß-Photostrom mit dem Schleifengalvanometer gemessen. Gearbeitet wurde im monochromatischen Licht ($\lambda = 578 \text{ m}\mu$) und die empfindlichste Stelle jeder Zelle belichtet. Vor jeder Messung wurde geprüft, daß der Kurzschlußstrom intensitätsproportional ist ¹⁾. Der Kurzschlußstrom als modulierter Gleichstrom mit dem Schleifengalvanometer (Widerstand rd. 8 Ohm) und als Wechselstrom mit dem Verstärker bei 1 und 100 Ohm Anpassung gemessen, war erfreulicherweise innerhalb der Meßgenauigkeit fast ausnahmslos gleich ²⁾. Es sind somit keine trägen Anteile überlagert.

c) Quantenausbeute an der empfindlichsten Stelle unter 24 Photoelementen.

Da die Quecksilberlampe in ihrer Lichtintensität gelegentlich schwankt, wurde die empfindlichste Stelle an den 24 untersuchten Photoelementen mit dem gefilterten Licht eines 4 Volt-Lämpchens gesucht, das von Sammlern gespeist war. Mit Schottfiltern OG1 (2 mm) BG7 (1 mm) und BG 19 (4 mm) wurde ein Bereich um $560 \text{ m}\mu$ ausgefiltert. Gemessen wurde wieder im Wechsellicht bei 100 Ohm Verstärker-Anpassung.

1) Die eingestrahlte Lichtintensität = 100 % wurde mit geeichten Netzblenden im parallelen Strahlengang auf 56 % bzw. 30 % geschwächt. Geeicht waren die Netzblenden mit einer sicher intensitätsproportionalen Vakuumphotozelle bei Sättigungsstrom.

2) Eine der Selenperrschichtzellen (Nr. 11), die über die Oberfläche in ihrer Empfindlichkeit um den Faktor 2 schwankt, hatte einen um 25 % kleineren Gleichstrom als Wechselstrom an ihrer unempfindlichsten Stelle. Die Ursache für diese Abweichung der Gleich- und Wechselstromwerte dürfte in einem Nebenschluß zu suchen sein. Dies wird auch durch den geringen Zellenwiderstand von nur 10000 Ohm bei 10 mVolt nahegelegt.

1. Quantenausbeute für auffallende Intensität.

Die empfindlichsten Stellen unter den 24 Photoelementen hatten die Elemente Nr. 18 und W. Die Quantenausbeute wurde im Gleich- und Wechsellicht für die Hg-Wellenlänge $578\text{ m}\mu$ gemessen. Für diese Wellenlänge ist die Ausbeute am größten (vgl. Abb. 4).

Das Ergebnis für Element Nr. 18:

a) Gleichlicht:

aufgestrahlte Lichtintensität

$$E = 44,7 \cdot 29 \cdot 10^{-8} = 13,0 \mu \text{ Watt}$$

$$\text{Kurzschlußstrom } i_k = 2,8 \mu \text{ Amp.}$$

$$\text{also Ausbeute } \frac{2,8}{13,0} = 0,215 \frac{\text{Amp.}}{\text{Watt}} \text{ oder eine Quantenausbeute von } 0,46.$$

b) bei Wechsellicht $f = 250\text{ Hz}$

aufgestrahlte Lichtintensität im

$$\text{Gleichlicht } E = 47,1 \cdot 29 \cdot 10^{-8} = 13,6 \mu \text{ Watt}$$

$$\text{umgerechnet auf Wechsellicht}^1) E = 6,8 \mu \text{ Watt}$$

Kurzschlußwechselstrom (arithmetischer Mittelwert)

$$i_k = 1,55 \mu \text{ Amp., also Ausbeute } \frac{1,55}{6,8} = 0,23 \frac{\text{Amp.}}{\text{Watt}} \text{ oder Quantenausbeute } 0,49.$$

Noch höher war der Wert bei Zelle W. Im Mittel aus 5 Meßreihen war hier die Ausbeute $0,28 \frac{\text{Amp.}}{\text{Watt}}$ (Gleich- und Wechsellicht). Die Quantenausbeute ist daher 0,60 bezogen auf auffallende Intensität.

2. Quantenausbeute bei Berücksichtigung der Lichtverluste durch Reflexion und Streuung, sowie Absorption in der Deck-Elektrode.

Es bleibt zu ermitteln, wie hoch die Ausbeute für das in das Selen eindringende Licht ist.

Wir ließen zu diesem Zwecke monochromatisches Licht ($578\text{ m}\mu$) konvergent durch eine Öffnung von 3 mm Durchmesser in der Mitte eines kreisförmigen Selenphotoelements (I) von 57 mm wirksamem Durchmesser abwechselnd auf einen Spiegel(II)

1) Vgl. mit Vakuumphotozelle ergab das Umrechnungsverhältnis 2,02.

bzw. auf die zu untersuchende Oberfläche (II) fallen (Abb. 5). Das Selenphotoelement war dieser Oberfläche zugekehrt und fing das von dieser in einem Raumwinkel ϱ reflektierte und gestreute Licht auf. Der Spiegel selbst reflektierte 92 %. Tabelle 4 bringt die Reflexions- und Streungsverluste für verschiedene Photoelemente.

Abb. 5.

Meßanordnung zur Bestimmung der Reflexion und Streuung an der Oberfläche von Selenphotoelementen bzw. Selenplatten.

I: Selenphotoelement;

II: zu untersuchende Oberfläche bzw. Spiegel.

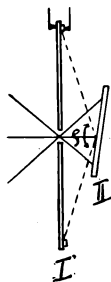


Tabelle 4.

Zelle		Lichtverluste durch Reflexion und Streuung in % des auffallenden Lichtes
SAF	13	14,0
	18	17,8
	302	14,2
	7	11,6
Elektrocell	23	9,3
	22	9,6

Um einen Anhalt für die Absorptionsverluste zu erhalten, wurde außerdem Reflexion und Durchlässigkeit für die Quecksilberlinie $578\text{ m}\mu$ an 3 auf Glas aufgestäubten Schichten, wie sie für die Photoelemente als Deck-Elektrode dienen, ermittelt.

Tabelle 5.

Auf Glas aufgestäubte Schicht Nr.	Durchgelassenes Licht (gemessen)	Reflektiertes und gestreutes Licht (gemessen)	Absorbiertes Licht bezogen auf auffallendes Licht (berechnet)
76	66 %	11 %	23 %
35	33 %	47 %	20 %
SAF	70 %	12 %	18 %

Berücksichtigen wir also die Lichtverluste durch Reflexion, Streuung und Absorption mit rund 40 %, so zeigt sich, daß das Selenpersperrschichtelement die Quantenausbeute 1,0 erreichen kann, aber offenbar nicht überschreitet.

D. Becquereleffekt an Selen.

Die Messungen des vorstehenden Abschnittes hatten gezeigt, daß für die Wellenlänge $578\text{ m}\mu$ das volle Quantenäquivalent an Selenphotoelementen erreicht werden kann, Abb. 4 zeigt jedoch, daß für die stärker absorbierten kürzeren Wellenlängen die Quantenausbeute geringer ist. Die Messungen der Lichtverluste an auf Glas aufgestäubten Metallschichten, wie sie für Photoelemente als Deck-Elektrode dienen, zeigen die in Abbildung 6 dargestellte spektrale Verteilung.

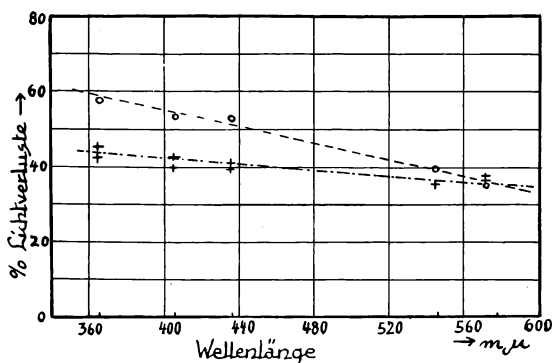


Abb 6.
Lichtverluste durch
die Deck-Elektrode
der Selsperr-
schichtzelle.
(Schicht auf Glas
aufgebracht.)

Wie man sieht, kann der Abfall der Ausbeute an Selenphotoelementen gegen kürzere Wellen durch die Zunahme der Lichtabsorption in der Deck-Elektrode zum Teil erklärt werden. (Abb. 4.)

Volmer und Moll¹⁾ hatten nun in der Becquerelschen Anordnung für Selen festgestellt, daß die bei der Belichtung zur Aufrechterhaltung des Dunkelpotentials erforderlichen Ströme für die Wellenlängen 436, 405 und $365\text{ m}\mu$ dem Quantenäquivalent entsprechen. Wir maßen daher im Anschluß an die Arbeit von Faltz²⁾ (Kupferoxydul) die Kurzschlußströme im Wechsellicht an Selenplatten.

a) Die Becquerelzelle.

Verwendet wurden Selenphotoelemente, auf die noch keine Deck-Elektrode aufgebracht war. Die Fläche war $40 \times 22\text{ mm}$. Ränder und Rückseite (vernickelte Eisenplatte) wurden mit

1) M. Volmer und W. Moll, a. a. O.

2) G. Faltz, a. a. O.

Schellack oder Paraffin gegen den Elektrolyten isoliert. Ein starker Kupferdraht, der an die Eisenplatte mit Woodmetall gelötet war, diente als Abnahmeelektrode und Halterung. Um auch die schwache Erwärmung bei der Lötung mit Woodmetall noch zu vermeiden, wurde in Einzelfällen der Halter lediglich angeklemt. Gegenelektrode war im allgemeinen eine identische Selenplatte; in besonders erwähnten Fällen ein Metallblech (Zink, Kupfer, Blei und Silber). Beide Elektroden und der Elektrolyt befanden sich in einem Leyboldtrog von $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Als Elektrolyt dienten KCl , NH_4Cl , NaNO_3 , ZnSO_4 , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ meist in $1/10$ normaler Lösung. Die belichtete Fläche war 4 bis 7 cm^2 unter Verzicht auf rein sinusförmige Lichtmodulation.

b) Einfluß des Elektrolyten und zeitliche Konstanz.

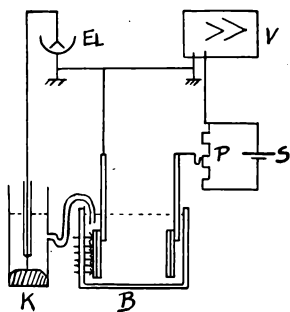
Die Photoströme waren in KCl , NH_4Cl und NaNO_3 von Art und Konzentration dieser Elektrolyten weitgehend unabhängig.

Die Konstanz war in $1/10 \text{ n-NH}_4\text{Cl}$ -Lösung bei Selengegenelektrode recht befriedigend. Innerhalb 40 Stunden (Zelle kurzgeschlossen und im Dunkeln) ging die Ausbeute nur um 15 % herunter; da auch hier etwas Selen in Lösung gegangen war und den Elektrolyt trübt, ist die tatsächliche Konstanz noch besser. Bei Zinkgegenelektrode in KCl oder NH_4Cl ist der Effekt anfänglich besonders groß, nimmt aber unter Abscheidung von amorphem Selen rasch ab. Innerhalb von 12 Stunden fiel hier die ganze, etwa 80μ dicke Selenschicht amorph aus. Das Potential der Selenplatte im Elektrolyten betrug gegen $1/10 \text{ n-Calomelektrode}$ — 0,45 Volt (Zelle unbelichtet), d. h. gegen die Wasserstoffelektrode rund — 0,1 Volt; bei einer Senkung auf — 0,37 Volt (vgl. Abb. 7) war der Höchstwert des Effekts erreicht. Der Kurzschlußstrom verdoppelte sich dabei etwa (Abb. 8).

Abb. 7.

Anordnung für die Polarisationsversuche.

B: Becquerelzelle; K: $1/10 \text{ n}$ Calomelektrode; P: Potentiometer; S: Sammler; V: Niederfrequenzbandverstärker; El: Einfadenelektrometer.



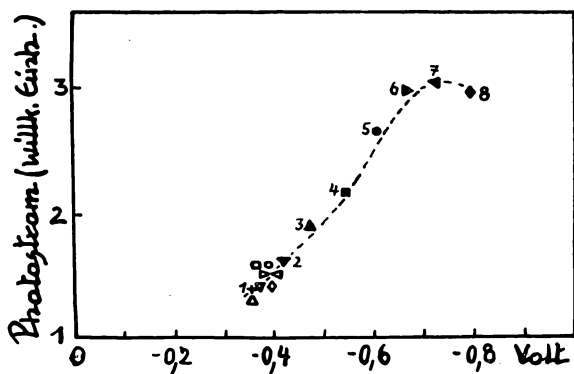


Abb. 8.

Abhängigkeit des Photostromes vom Potential der belichteten Selen-Elektrode gegenüber 0,1 n-Calomelektrode.

Se/Se in 0,1 n-NH₄Cl-Lösung; Elektrolyt gerührt; nach jeder Messung bei aufgezwungenem Potential (ausgefüllte Zeichen) Vergleichsmessung bei natürlichem Potential (∇ $\triangle$ $\square$ $\circ$ $\triangleright$ $\triangleleft$ $\diamond$). Die Zahlen bezeichnen die Reihenfolge der Messungen.

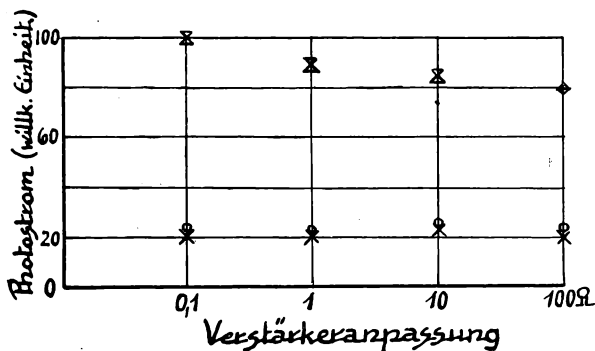


Abb. 9.

Photostrom in Abhängigkeit von der Verstärkeranpassung.

I. Selensperrschichtzelle ($\times$).

II. Becquerelzelle: Selen/Selen in 0,1 n-NH₄Cl-Lösung bei 15° C ($\triangle$) und 50° C (∇).

III. Zum Vergleich Vakuumphotozelle ($\circ$).

Eine Abhängigkeit des günstigsten Potentialwertes von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes fanden wir nicht.

c) Temperaturabhängigkeit des Kurzschlußstroms.

Die Temperatur des Elektrolyten — $1/10\text{ n NH}_4\text{Cl}$ — wurde von 15° C bis 50° C verändert. Abb. 9 zeigt, daß der Kurzschlußstrom in diesem Bereich konstant bleibt.

Dies gilt jedoch nur für frische Selenflächen; bei solchen, die schon zu mehreren Messungen gedient hatten, ging der Strom bei dieser Temperatursteigerung auf die Hälfte zurück, obwohl die Quantenausbeute bei Raumtemperatur noch durchaus von der ursprünglichen Größenordnung ist.

d) Spektrale Verteilung.

Da die Kurzschlußströme bei den angewandten Intensitäten innerhalb der Fehlergrenzen intensitätsproportional waren, ließ sich eine spektrale Verteilung angeben. Wir ermittelten sie durch Vergleich mit dem oben erwähnten Selensperrschicht-photoelement für die Wellenlängen 365, 405, 436, 546 und 578 $\text{m}\mu$ der Hg-Lampe und im kontinuierlichen Spektrum des Nernststiftes von 550—760 $\text{m}\mu$. Abb. 4 bringt das Ergebnis zahlreicher Meßreihen.

In Übereinstimmung mit dem Befund von Faltz¹⁾ am Cu_2O und den Ausgleichsstrommessungen von Volmer und Moll²⁾ ist die Quantenausbeute im gesamten Gebiet starker Absorption von 580 $\text{m}\mu$ ³⁾ abwärts bis mindestens 365 $\text{m}\mu$ konstant und zeigt die bei Sperrschichtzellen zu beobachtende Abnahme nicht.

e) Vergleich von Kurzschlußstrommessungen und solchen mit Ohmscher Belastung.

Da der Verstärker eine höhere Anpassung als 100 Ohm nicht zuließ, waren keine Messungen der Leerlaufspannung möglich. Wir begnügten uns daher 10 bis 30 $\text{K}\Omega$ mit dem Element in Reihe zu schalten. Abweichend von dem Befund

1) G. Faltz, a. a. O.

2) M. Volmer und W. Moll, a. a. O.

3) Faltz, bzw Volmer und Moll haben allerdings nur von 365 $\text{m}\mu$ bis rund 450 $\text{m}\mu$ konstante Quantenausbeute festgestellt.

an Cu_2O blieb die spektrale Verteilung unverändert. Dagegen wird schon bei 30 K Ω Reihenwiderstand der Effekt temperaturabhängig: von + 20° C bis + 50° C nimmt der Effekt um 10% ab.

f) Frequenzabhängigkeit.

Die Frequenzabhängigkeit des Effektes wurde in üblicher Weise durch Vergleich mit einer frequenzunabhängigen Vakuumphotozelle gemessen; bei der Messung waren dem Verstärkereingang 10 Ohm parallelgeschaltet, um Anpassungsfehler der beiden Zellen auszuschließen. Abbildung 10 zeigt den Kurzschlußstrom einer Selen-Becquerelzelle in seiner Frequenzabhängigkeit.

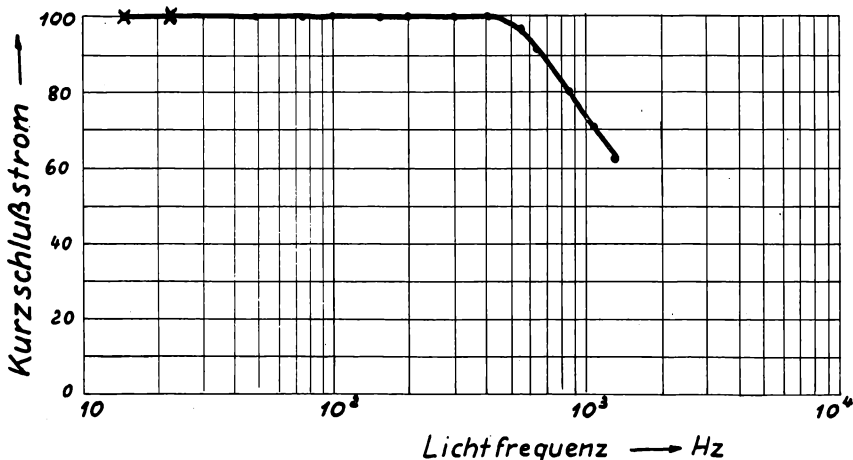


Abb. 10.

Frequenzabhängigkeit des Kurzschlußstromes der Becquerelzelle:

Selen/Selen in 0,1 n- NH_4Cl -Lösung.

•: Messung mit Verstärker; x: Messung mit Schleifengalvanometer.

Unterhalb 50 Hz wurde der Kurzschlußphotostrom mit dem Schleifengalvanometer gemessen; er scheint bis ins Gleichlicht konstant zu bleiben.

g) Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf die Ausbeute.

Frisch hergestellte Selenplatten zeigten die beste Ausbeute. Dies scheint damit zusammenzuhängen, daß die Selenoberfläche vom Elektrolyten nicht benetzt wird. War die Quantenausbeute gesunken, so konnte sie durch Abätzen der Oberfläche mit konzentrierter Schwefelsäure oder konzentrierter Salpetersäure

wieder gehoben werden, die Platten mußten jedoch nach der „Ätzung“ noch einige Stunden zur Erholung an Luft liegen, da frisch geätzte Selenplatten meist noch schlechter waren als vorher. War die Selenplatte nicht gerade durch Abscheidung von amorphem Selen (Polarisationsversuche) schlechter geworden, so genügte auch oft ein Abreiben der Platte mit einem feuchten Wattebausch, um sie in den nichtbenetzbaren Zustand zu bringen. Abschmirgeln bedingte Verschlechterung der Ausbeute, während Absanden (Sandstrahlgebläse) den Effekt nicht beeinflusst, dabei sind die geänderten Reflexionsbedingungen der jetzt grauen Selenoberfläche nicht berücksichtigt. Wurde nur ein kleiner Bezirk der rechteckigen, abgesandeten Selenplatte belichtet, so wurde die belichtete Fläche allmählich dunkler und der Effekt nahm ab, während die grau gebliebenen Bezirke der Umgebung die alte Empfindlichkeit beibehalten hatten.

h) Quantenausbeute.

1. Ausbeute für auffallendes Licht.

Die Ausbeute wurde nur im Wechsellicht mit Verstärker ermittelt ($\lambda = 578 \text{ m}\mu$; $f = 166$ bzw. 255 Hz); Gleichstrombeobachtungen verbieten sich wegen der elektrochemischen Dunkelströme. Wir verglichen Becquerelzellen, (Selen/Selen in $1/10 \text{ n NH}_4\text{Cl}$) mit einer unserer absolut geeichten Sperrschichtzellen, die Kurzschlußströme verhielten sich bei der besten Becquerelzelle wie $0,94$ zu 1 . Da die Quantenausbeute der Sperrschichtzelle für auffallendes Licht $0,43$ betrug, erreichte die der Becquerelzellen $0,40$, blieb aber meist darunter. Senkung des Potentials Selen/Elektrolyt ermöglichte rund eine Verdoppelung der Ausbeute. Entsprechend war die Ausbeute von Becquerelzellen, die verschiedene Metalle als Gegenelektroden hatten, höher oder tiefer (Tab. 6).

T a b e l l e 6.

Zellenkombination	Quantenausbeute für auffallendes Licht
Selen Selen in $1/10 \text{ n NH}_4\text{Cl}$	0,40
Selen/Zn in $1/10 \text{ n NH}_4\text{Cl}$	0,67
Selen/Pb in $1/10 \text{ n NH}_4\text{Cl}$	0,57
Selen/Ag in $1/10 \text{ n NH}_4\text{Cl}$	0,27
Selen/Cu in $1/10 \text{ n NH}_4\text{Cl}$	0,18

2. Die absolute Ausbeute.

Zur Berechnung der absoluten Quantenausbeute ist die Kenntnis der Lichtverluste nötig. Die Lichtverluste durch Reflexion und Streuung gegen Luft wurden in der Anordnung (Kap. C c 2) für die Wellenlänge $578\text{ m}\mu$ zu 25 % bestimmt. Im Elektrolyt und Glastrog betragen sie dann rechnerisch rund 22 %. Bei Berücksichtigung dieser Verluste erreicht somit der Kurzschlußstrom bei natürlichem Potential eine Quantenausbeute von 0,51; bei Potentialsenkung kann der Wert 1 erreicht werden, wird aber anscheinend auch hier nicht überschritten. Diese Zahlen liegen niedriger, als sie Faltz¹⁾ für Cu_2O angegeben hat.

Im gesamten Bereich von $365\text{ m}\mu$ bis $578\text{ m}\mu$ ergeben sich die Reflexions- und Streuverluste praktisch konstant. Ihre Berücksichtigung beeinflußt daher die oben angegebene spektrale Verteilung nicht.

E. Becquereleffekt an Bleiglanz.

Über den Becquereleffekt an Sardinischem Bleiglanz liegt bereits eine Mitteilung aus dem hiesigen Institut vor²⁾. Wir haben die noch unbekannte spektrale Verteilung des Effekts im Gebiet 365 bis $578\text{ m}\mu$ untersucht.

a) Die Becquerezelle.

Von Sardinischem Bleiglanz wurden Platten von 2—3 mm Dicke abgesägt, auf verzinnzte kupferne Becquerelelektrodenhalter mit Woodmetall gelötet und bis auf eine Fläche von rund 1 cm^2 mit Schellack bzw. Paraffin gegen den Elektrolyten isoliert. Elektrolyt war reine 10 % ige Schwefelsäure ($s_{20} = 1,066$), Gegenelektrode eine Platte aus Analysenblei.

b) Meßanordnung und Ergebnisse.

Gemessen wurde bei 300 Hz. Die Linien des Hg-Spektrums wurden nur ausgefiltert, um gegenüber dem Monochromator größere Intensitäten zu erhalten.

1) G. Faltz, a. a. O.

2) Fr. Fischer, B. Gudden und M. Treu, Ztschr. f. Phys. 107, S. 200, 1937.

1. Spektrale Empfindlichkeit.

Gemessen wurde die spektrale Empfindlichkeit bei günstigster Verstärkeranpassung (Eingangswiderstand 30 Ohm), bei 1 und 100 Ohm Anpassung. Abbildung 11 zeigt die erhaltenen spektralen Verteilungen bei den verschiedenen Anpassungen, sie unterscheiden sich innerhalb der Meßgenauigkeit nicht. Die Quantenausbeute ist von der Wellenlänge unabhängig, erreicht jedoch bei unseren Proben nur rund 0,03.

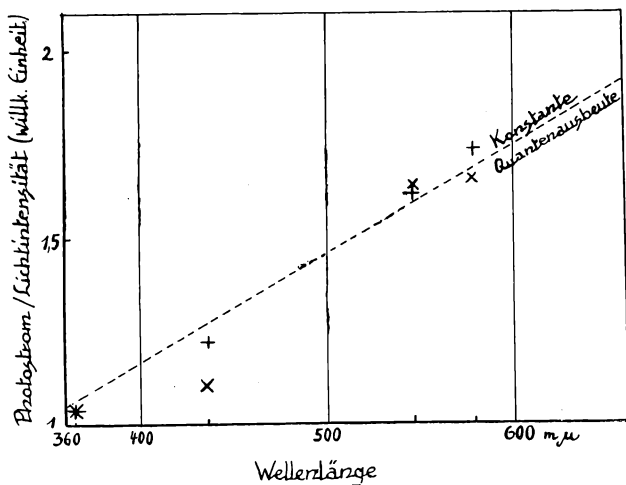


Abb. 11.

Spektrale Empfindlichkeit der Becquerelzelle:

Sardinischer Bleiglanz/Pb in 10 % iger H_2SO_4 .

+: Messung bei angenähertem Kurzschlußstrom (Anpassung 0,1 bis 1 Ohm);

x: Messung bei 30 und 100 Ohm Anpassung.

2. Temperaturabhängigkeit.

Da Fischer, Gudden, Treu Temperaturabhängigkeiten angegeben hatten, wurde geprüft, ob sie auch vorliegen, wenn Kurzschlußstrom gemessen wurde. In der Tat nahm auch bei kleinsten Anpassungswiderständen bei Temperatursteigerung von $0^\circ C$ bis $+50^\circ C$ der Photostrom rund um die Hälfte ab, im Gegensatz zu dem Verhalten von Kupferoxydul und Selen. Ob wir allerdings wirklich Kurzschlußstrom messen, bleibt zweifelhaft. In Abb. 12 ist der Photostrom einer Bleiglanzbecquerelzelle für die Anpassungen 0,1, 1, 10 und 100 Ohm dargestellt.

Die Abhängigkeit wurde bei Zimmertemperatur und bei $+50^{\circ}\text{C}$ aufgenommen; ersichtlich ist auch bei 0,1 Ohm Anpassung ein Kurzschlußstrom noch nicht erreicht; die Anpassung 0,1 Ohm könnte an sich eine Scheingröße sein, doch zeigen Messungen mit der Vakuumzelle auch für diese Anpassung noch richtige Werte. (Vgl. Abb. 9.) Wir müssen daher die Frage offen lassen, ob beim PbS nicht doch der wahre Kurzschlußstrom temperaturunabhängig ist.

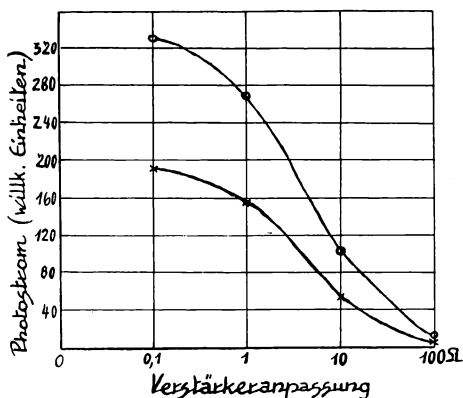


Abb. 12.

Photostrom der Becquerelzelle:

Sardinischer Bleiglanz/Pb in 10 % iger H_2SO_4 ; Abhängigkeit von der Verstärkeranpassung bei 16°C (○) und 50°C (×), (Lichtfrequenz 300 Hz).

F. Becquereleffekt an Silbersulfid.

Schon mehrfach ist der Becquereleffekt an Silbersulfid nach den älteren Meßverfahren untersucht worden. Da die Ergebnisse recht unübersichtlich sind, sollten auch derartige Zellen im Wechsellicht untersucht werden.

a) Die Becquerelzelle.

Wir benutzten künstlich hergestelltes Ag_2S geringer Reinheit. Ein altes holländisches Guldenstück wurde nach Abschleifen der Münzzeichen 15 Minuten in flüssigen Schwefel gebracht. Die Münze war dann bis auf eine dünne Silberseele vollständig in Silbersulfid übergeführt. Die Ag_2S -Platte wurde

in der Mitte gespalten und die beiden Stücke nochmals durchgesägt. Die vier Silbersulfidstücke wurden sodann auf Elektrodenhalter wie üblich aufgelötet und lackiert. Nach zahlreichen Vorversuchen war die Anordnung Ag_2S -10%ige H_2SO_4 -Ag in Konstanz und Ausbeute geeignet gefunden. Die günstigste Anpassung der Zelle lag zwischen 10 und 30 Ohm. Die Quantenausbeute betrug 0,1 bis 0,2.

b) Frequenzabhängigkeit.

Die Frequenzabhängigkeit des Effektes zeigt Abb. 13.

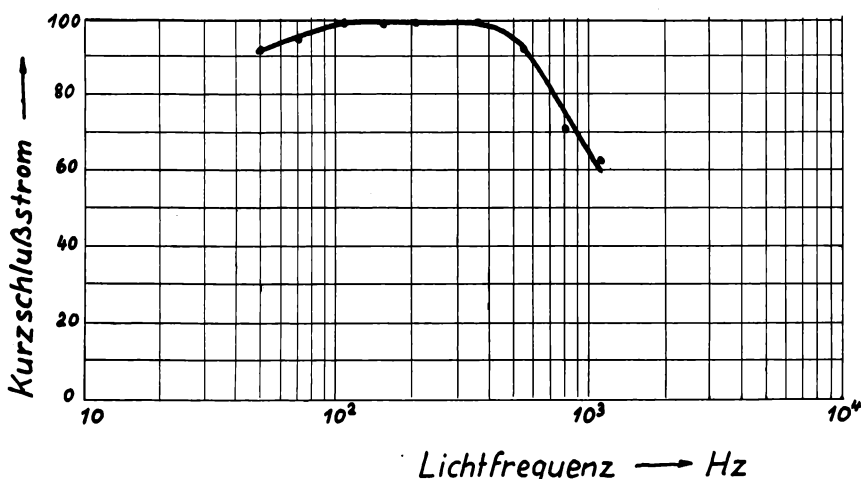


Abb. 13.

Frequenzabhängigkeit des Kurzschlußstromes der Becquerelzelle:
 $\text{Ag}_2\text{S}/\text{Ag}$ in 10 % iger H_2SO_4 .

Sie gleicht der des Sardinischen Bleiglanzes; der Kurzschlußstrom fällt aber schon ab 400 Hz. Auch am Ag_2S beobachteten wir beiläufig eine Temperaturabhängigkeit wie beim Sardinischen Bleiglanz.

c) Spektrale Ausbeute.

Die spektrale Verteilung wurde an der besten Zelle für das sichtbare Hg-Spektrum im Quarzdoppelmonochromator bei Wechsellicht und günstigster Verstärkeranpassung gemessen. Das Ergebnis ist mit konstanter Quantenausbeute wenigstens vereinbar.

G. Becquereleffekt an Antimonselenid.

Eine beiläufige Beobachtung an Sb_2Se_3 , das hier durch Zusammenschmelzen der Elemente¹⁾ erhalten wurde, bringt Abb. 14.

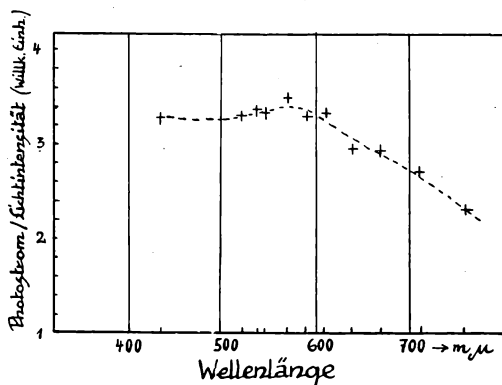


Abb. 14.

Becquerelzelle $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{Ag}$ in 1/10n NH_4Cl -Lösung.

Spektrale Verteilung im Gebiet 400—760 mμ.

Die Anordnung war Sb_2Se_3 -10% ige H_2SO_4 -Ag, die Lichtfrequenz 200 Hz, die Verstärkeranpassung 100 Ohm. Die Empfindlichkeit ist im ganzen sichtbaren Gebiet ziemlich gleich. Die höchste Quantenausbeute betrug rund 0,15.

H. Zusammenfassung.

An 24 Selenphotoelementen wurde für auffallendes Wechsellicht der Wellenlänge 578 mμ die Quantenausbeute bestimmt. Da auf der Selenoberfläche Empfindlichkeitsschwankungen von 30% und mehr auftreten können, wurde an der empfindlichsten Stelle jedes Photoelementes gemessen. Im Gleich- und Wechsellicht ergaben sich übereinstimmende Quantenausbeuten. Die Intensitätsmessung des eingestrahlten Lichtes geschah mit zwei Thermoelementen, die an drei Strahlungsnormale absolut angeschlossen waren. Die Quantenausbeute bezogen auf auffallende Intensität lag zwischen 0,33 und 0,60, überschreitet also bei Berücksichtigung der Lichtverluste durch Reflexion, Streuung und Absorption (Deck-Elektrode) sicher den Wert 0,5 und kann den Wert 1 erreichen, aber anscheinend nicht überschreiten.

1) Wir danken Dr. Ing. U. Krawczynski für die Herstellung.

Während die Quantenausbeute der Selenphotoelemente von $578\text{ m}\mu$ nach kürzeren Wellen fällt (zum Teil ist eine Abnahme der Lichtdurchlässigkeit der Deckelektrode verantwortlich), zeigen Selenbecquerelzellen eine konstante Quantenausbeute der temperaturunabhängigen Kurzschlußströme bei Wechselbelichtung. Die Ausbeute der Selen-Becquerelzellen betrug bei natürlichem Potential rund 0,5 bezogen auf absorbiertes Licht. Durch Senkung des Potentials kann die Ausbeute etwa verdoppelt werden, sodaß auch Selenbecquerelzellen eine Quantenausbeute von rund 1,0 erreichen.

Becquerelzellen von Sardinischem Bleiglanz und künstlichem Silbersulfid zeigen im Wechsellicht eine bemerkenswerte konstante Quantenausbeute im Gebiet starker optischer Absorption. Die erreichte absolute Ausbeute war bei PbS 0,03, bei Ag_2S 0,2. An beiläufig untersuchtem Antimonselenid konnte dagegen bisher keine konstante Quantenausbeute festgestellt werden.

Herrn Professor Dr. B. Gudden bin ich für die Anregung zu dieser Arbeit, sowie für die ständige Hilfe bei der Durchführung zu größtem Danke verpflichtet.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft und dem Nürnberger Sonderfond verdanken wir Quarzdoppelmonochromator, Quarz-Hg-Lampe, Thermoelemente und Zubehör.

Ferner danken wir der Süddeutschen Apparate-Fabrik Nürnberg für mannigfache Unterstützung, ebenso der Firma P. Gossen Erlangen für die Überlassung von 4 Elektrocell-Photoelementen.

ZOBODAT - **www.zobodat.at**

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Sozietät zu Erlangen](#)

Jahr/Year: 1938

Band/Volume: [70](#)

Autor(en)/Author(s): Schröppel Alfred

Artikel/Article: [Quantenausbeute bei der inneren lichtelektrischen Wirkung im Gebiet starker Absorption. 87-](#)

