

**Schriftliche Abiturprüfung 2005 – Sachsen-Anhalt**  
**Physik 13 n**  
**(Leistungskursniveau)**

**Thema G1: Impulserhaltung in der Mechanik und in der Quantenphysik**

**1 Stoßprozesse**

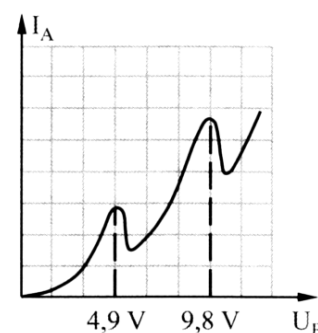
Bei der Diskussion von Stoßprozessen in der Physik ist der Impuls als Erhaltungsgröße von fundamentaler Bedeutung.

- 1.1 Betrachtet werden gerade zentrale Stöße für ein Teilchen der Masse  $m_1$  und der Geschwindigkeit  $v_1$  mit einem ruhenden Teilchen der Masse  $m_2$  für die folgenden Bedingungen:
- (a)  $m_2 = 2 m_1$  und  
 (b)  $m_2 = 3,6 \cdot 10^5 m_1$  .

Berechnen Sie für die genannten Bedingungen die Geschwindigkeiten der Teilchen in Vielfachen von  $v_1$  nach einem vollkommen elastischen Stoß und die Energie, die auf das Teilchen mit der Masse  $m_2$  übertragen wird. Geben Sie diese in Vielfachen der Anfangsenergie an.

Vergleichen und kommentieren Sie für die genannten Bedingungen den Verlust an mechanischer Energie bei einem vollkommen unelastischen Stoß.

- 1.2 Ein bedeutsames Stoßexperiment zur Quantenphysik ist der Franck-Hertz-Versuch, dessen Ergebnisse für eine mit Quecksilber gefüllte Röhre im Bild 1 dargestellt sind.



- 1.2.1 Stellen Sie den Versuchsaufbau anhand eines beschrifteten Schaltplanes dar und beschreiben Sie die Durchführung des Frank-Hertz-Versuches.

- 1.2.2 Berechnen Sie die Endgeschwindigkeit der Elektronen, die mit  $U_B = 4,0 \text{ V}$  beschleunigt werden.

Diskutieren Sie in diesem Zusammenhang die Stöße der Elektronen mit den Quecksilberatomen.

Begründen Sie Ihre Meinung rechnerisch ( $m_{\text{Hg}} = 200 \text{ u}$ ).

- 1.2.3 Begründen Sie den beginnenden Abfall des Anodenstromes bei den Beschleunigungsspannungen von  $U_B = 4,9 \text{ V}$  und  $U_B = 9,8 \text{ V}$  mithilfe von Stoßprozessen. Gehen Sie dabei auch auf den Nachweis der Energieumwandlung ein.

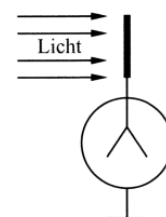
Bild 1

**2 Fotoeffekt**

- 2.1 Hallwachs entdeckte 1887 den äußeren lichtelektrischen Effekt, der 1905 durch Einstein theoretisch erklärt wurde.

Eine Zinkplatte, die mit einem Elektroskop verbunden ist, wird negativ aufgeladen und mit Licht verschiedener Frequenzen bestrahlt (Bild 2).

Beschreiben Sie die experimentellen Beobachtungen.



- 2.2 Bei einem Versuch an einer Fotozelle zur Untersuchung der Abhängigkeit der kinetischen Energie der Photoelektronen werden mit der Gegenfeldmethode folgende Messwerte ermittelt:

Bild 2

|   |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|
| Frequenz $f$ des einfallenden Lichtes in $10^{14} \text{ Hz}$ | 5,19 | 5,49 | 6,10 | 6,88 | 7,41 |
| Spannung $U$ in V (für $I_{\text{Foto}} = 0$ )                | 0,20 | 0,32 | 0,58 | 0,89 | 1,12 |

Zeichnen Sie die Einstein'sche Gerade in einem entsprechenden Diagramm.

Bestimmen Sie die Austrittsarbeit der Elektronen für die Fotokathode.

Aus welchem Material könnte sie bestehen?

- 2.3 Beim Fotoeffekt gilt neben dem Energieerhaltungssatz auch der Impulserhaltungssatz. Eine Fotokatode aus Cäsium wird mit Photonen der Energie  $E_{\text{PH}} = 2,85 \text{ eV}$  bestrahlt. Bei diesem Vorgang werden Fotoelektronen mit der maximalen kinetischen Energie  $E_{\text{kin}} = 0,91 \text{ eV}$  nachgewiesen. Berechnen Sie den Betrag des Impulses eines einfallenden Photons und den eines mit maximaler kinetischer Energie  $E_{\text{kin}} = 0,91 \text{ eV}$  emittierten Elektrons. Vergleichen Sie die beiden Impulsbeträge und begründen Sie daraus, dass das Elektron vor dem Stoß gebunden war.

Lösung:

1.1

**Elastischer Stoß:**

Geschwindigkeiten der Teilchen in Vielfachen von  $v_1$ :

(a)

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot v_1 + 2 \cdot m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } v_2 = 0$$

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } m_2 = 2m_1$$

$$u_1 = \frac{(m_1 - 2m_1) \cdot v_1}{3m_1} = \frac{-m_1 \cdot v_1}{3m_1} = \underline{\underline{-\frac{1}{3}v_1}}$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot v_2 + 2 \cdot m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } v_2 = 0$$

$$u_2 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } m_2 = 2m_1$$

$$u_2 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1}{3m_1} = \underline{\underline{\frac{2}{3}v_1}}$$

- Teilchen 1 bewegt sich nach dem Stoß in entgegengesetzter Richtung zurück
- Teilchen 2 bewegt sich in der ursprünglichen Richtung von Teilchen 1

(b)

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot v_1 + 2 \cdot m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } v_2 = 0$$

$$u_1 = \frac{(m_1 - m_2) \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } m_2 = 3,6 \cdot 10^5 m_1$$

$$u_1 = \frac{(m_1 - 3,6 \cdot 10^5 m_1) \cdot v_1}{3,6 \cdot 10^5 m_1}$$
$$= \frac{1 - 3,6 \cdot 10^5}{3,6 \cdot 10^5} v_1 = -0,9999 v_1 \approx \underline{\underline{-v_1}}$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1) \cdot v_2 + 2 \cdot m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } v_2 = 0$$

$$u_2 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } m_2 = 3,6 \cdot 10^5 m_1$$

$$u_2 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot v_1}{m_1 + 3,6 \cdot 10^5 m_1} = \frac{2}{3,6 \cdot 10^5} v_1 = 5,55 \cdot 10^{-6} v_1 \rightarrow \underline{\underline{0}}$$

- Teilchen 1 bewegt sich nach dem Stoß mit fast gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zurück
- Teilchen 2 bleibt fast in Ruhe

### Energie in Vielfachen der Anfangsenergie:

(a)

$$\begin{aligned} E_{\text{kin}_{\text{nach}_2}} &= \frac{m_2}{2} u_2^2 && \text{mit } m_2 = 2 m_1 \\ &= \frac{2 m_1}{2} u_2^2 && \text{mit } u_2 = \frac{2}{3} v_1 \\ &= \frac{2 m_1}{2} \cdot \frac{4}{9} v_1^2 = \frac{8}{9} \cdot \frac{m_1}{2} v_1^2 = \underline{\underline{\frac{8}{9} E_{\text{kin}_{\text{vor}}}}} \end{aligned}$$

(b)

Geschwindigkeiten der beiden Körper beim Stoß bleiben praktisch erhalten.

⇒ praktisch keine Energieübertragung

### Unelastischer Stoß:

#### Verlust an Energie:

(a)

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } m_2 = 2 m_1$$

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1}{3 m_1} = \underline{\underline{\frac{1}{3} v_1}}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{kin}_{\text{nach}_2}} &= \frac{m_1 + m_2}{2} u^2 && \text{mit } m_2 = 2 m_1 \\ &= \frac{3 m_1}{2} u^2 && \text{mit } u_2 = \frac{1}{3} v_1 \\ &= \frac{3 m_1}{2} \cdot \frac{1}{9} v_1^2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{m_1}{2} v_1^2 = \underline{\underline{\frac{1}{3} E_{\text{kin}_{\text{vor}}}}} \end{aligned}$$

⇒ Energieverlust:

$$\Delta E = E_{\text{kin}_{\text{nach}}} - E_{\text{kin}_{\text{vor}}}$$

$$\Delta E = \frac{1}{3} E_{\text{kin}_{\text{vor}}} - E_{\text{kin}_{\text{vor}}}$$

$$\Delta E = \underline{\underline{-\frac{2}{3} E_{\text{kin}_{\text{vor}}}}}$$

oder:

$$\Delta E = E_{\text{kin}_{\text{nach}}} - E_{\text{kin}_{\text{vor}}}$$

$$= \frac{m_1 + m_2}{2} u_2^2 - \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 \quad \text{mit } m_2 = 2 m_1$$

$$= \frac{3 m_1}{2} u_2^2 - \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 \quad \text{mit } u_2 = \frac{1}{3} v_1$$

$$= \frac{3 m_1}{2} \cdot \frac{1}{9} v_1^2 - \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2$$

$$= \frac{1}{3} \cdot \frac{m_1}{2} v_1^2 - \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 = \underline{\underline{-\frac{2}{3} \cdot \frac{m_1}{2} \cdot v_1^2 = -\frac{2}{3} E_{\text{kin}_{\text{vor}}}}}$$

- $\frac{2}{3}$  der Energie werden beim Stoß „vernichtet“

(b)

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2} \quad \text{mit } m_2 = 3,6 \cdot 10^5 m_1$$

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1}{m_1 + 3,6 \cdot 10^5 m_1}$$

$$u = \frac{1}{1 + 3,6 \cdot 10^5} v_1 = 2,77 \cdot 10^{-6} v_1 \approx \underline{0}$$

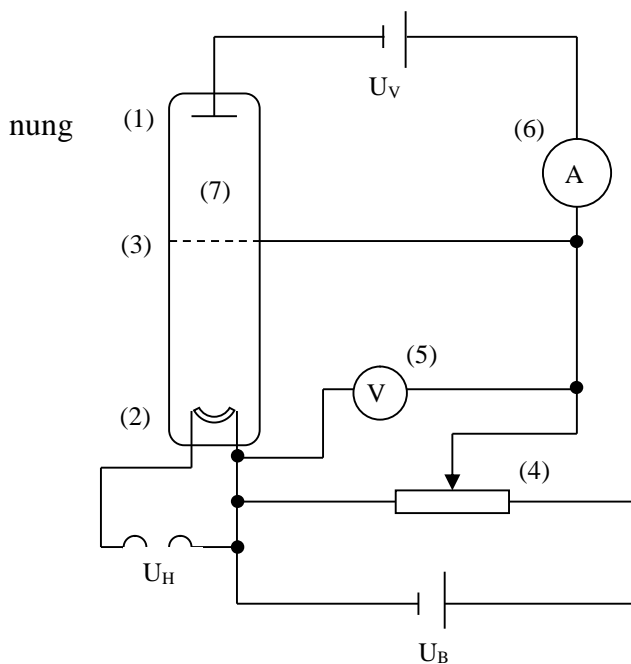
Die Geschwindigkeit beider Körper ist nach dem Stoß praktisch Null (sie bleiben stehen)  
⇒ totaler Energieverlust!

Vergleichen und Kommentieren:

- Energieverlust im Fall (a) geringer als im Fall (b).
- Massenverhältnis  $\frac{m_2}{m_1}$  von ruhender zu bewegter Masse ist im Fall (b) größer.
- Für den Energieverlust ist das Massenverhältnis entscheidend.

### 1.2.1

Beschriftete Schaltskizze:



- $U_H$  ... Heizspannung
- $U_B$  ... Anodenspannung, Betriebsspannung
- $U_V$  ... Vorspannung
- (1) ... Anode
- (2) ... Kathode
- (3) ... Gitter
- (4) ... Potenziometer
- (5) ... Voltmeter  $U_B$
- (6) ... Amperemeter  $I_A$
- (7) ... luftevakuierter mit Quecksilber gefüllter Glaskolben

Beschreibung der Durchführung:

1. Schaltung entsprechend Abbildung aufbauen
2. Glaskolben mit Heizofen auf gewünschte Temperatur aufheizen
3. Heizspannung und Gitterspannung einschalten
4. Anodenspannung langsam erhöhen und zugehörige Stromstärken messen
5. Alternativ: Verwendung eines Oszillografen und eines entsprechenden Stromversorgers liefert die Kurven auf dem Schirm

Aufbau:

- Luftevakuierter Glaszylinder, in dem sich Hg befindet, Glaskolben wird von außen geheizt, so dass das Quecksilber verdampft (nur sehr geringer Druck)
- Zwischen Kathode und Gitter liegt eine Beschleunigungsspannung (Gitterspannung), die über ein Potenziometer im Bereich von 0 bis ca. 60 V regelbar ist.

- Zwischen Gitter und Anode liegt eine Gegenspannung an (Vorspannung ca. 1 - 2 V)
- Heizung, um Elektronen zu emittieren
- Voltmeter, um die Anodenspannung zu messen → Maß für die Energie der beschleunigten Elektronen
- Amperemeter → Maß für die pro Zeiteinheit an der Anode ankommenden Elektronen

### 1.2.2

#### Berechnung der Endgeschwindigkeit:

$$E_{el} = E_{kin}$$

$$e \cdot U = \frac{m_e}{2} \cdot v_e^2$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}}$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A s} \cdot 4 \text{ V}}{9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 1,19 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Rightarrow [v] = \sqrt{\frac{\text{A s} \cdot \text{V}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{\text{kg}}} = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

#### Diskussion der Stöße mit Quecksilber + Begründung (rechnerisch):

- Massenverhältnis  $\frac{m_{\text{Hg}}}{m_e} = \frac{200 \text{ u}}{9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = \frac{200 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 3,64 \cdot 10^5$
- praktisch wird keine Energie auf die Quecksilberatome übertragen (siehe 1.1. (b))
- elastische Stöße ohne Energieverlust
- Beweis: bei  $U_B = 4 \text{ V}$  fällt die Kurve nicht ab

### 1.2.3

#### Begründung des Abfalls des $I_A$ mit Stoßprozessen und Nachweis der Energieumwandlungen:

Beschleunigte Elektronen treffen auf Quecksilberatome → Wechselwirkung

- $U_B < U_1 < 4,9 \text{ V}$  :
  - elastische Stöße zwischen Elektron und Gasatom Elektronen behalten ihre Energie
- $U_B = U_1 = 4,9 \text{ V}$  :
  - unelastischer Stoß zwischen Elektron und Gasatom vollständige Energieübertragung auf Gasatom
- $U_1 < U_B < U_2 = 9,8 \text{ V}$  :
  - unelastischer Stoß bei  $U_1$ , Restenergie - elastischer Stoß  
Wenn Restenergie größer als 1eV – 2eV (Gegenspannung), können Elektronen das Gegenfeld überwinden und gelangen zur Anode
- $U_B = U_2 = 9,8 \text{ V}$  :
  - zwei unelastische Stöße zwischen Elektron und Gasatom vollständige Energieübertragung auf Gasatome
- Dieser Vorgang kann sich bei ganzzahligen Vielfachen von 4,9 eV wiederholen.
- Die von den Quecksilberatomen bei den unelastischen Stößen aufgenommene Energie wird in Form von Lichtquanten  $\left( E_{\text{ph}} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \right)$  emittiert.
- Die Stromstärke fällt bei unelastischen Stößen zwischen Elektron und Gasatomen nicht vollständig auf null ab, da nicht alle Elektronen auf Quecksilberatome treffen.

#### Schlussfolgerung:

- Atome können nur diskrete Energien absorbieren

- Energieinhalt von Atomen kann nicht kontinuierlich geändert werden

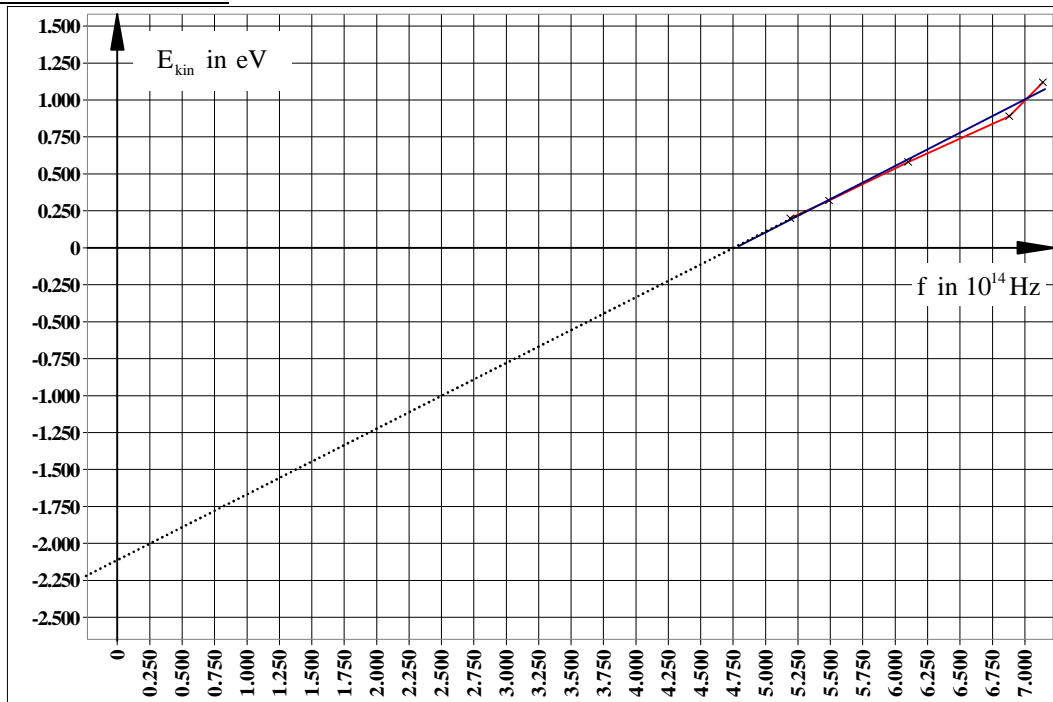
2.1

Beschreibung der experimentellen Beobachtung:

- Bei Bestrahlung mit Licht geringer Frequenz bleibt die Ladung der Zinkplatte erhalten.
- Bei Bestrahlung mit Licht ab einer bestimmten Frequenz (Grenzfrequenz) wird die Zinkplatte entladen.
- Entladegeschwindigkeit steigt mit
  - zunehmender Frequenz des Lichtes bei gleicher Lichtintensität
  - zunehmender Lichtintensität bei gleicher Frequenz des Lichtes

2.2

Einsteinsche Gerade:



Austrittsarbeit der Elektronen:

Ablezen:  $W_A \approx 2,2 \text{ eV}$

wenn berechnet:

$$\begin{aligned}
 W_A &= h \cdot f - e \cdot U = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ V A s} \cdot 5,19 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} - 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A s} \cdot 0,20 \text{ V} = \\
 &= 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 5,19 \cdot 10^{14} \text{ V A s} \cdot \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ e} - 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,20 \cdot \text{V} \cdot \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ e} \\
 &= 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 5,19 \cdot 10^{14} \text{ V A s} \cdot \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ e} - 0,20 \cdot \text{eV} = \underline{1,946 \text{ eV}}
 \end{aligned}$$

Kathodenmaterial:

Cäsium oder Barium

2.3

Impuls – einfallendes Photon:

$$p_{\text{Ph}} = m \cdot c \quad \text{mit } 1 = \frac{c}{c}$$

$$p_{\text{Ph}} = \frac{m \cdot c^2}{c} = \frac{E_{\text{Ph}}}{c}$$

$$p_{\text{Ph}} = \frac{2,85 \text{ eV}}{3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{2,85 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A s} \cdot \text{V}}{3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = \underline{1,52 \cdot 10^{-27} \text{ N s}}$$

$$[p_{\text{Ph}}] = \frac{\text{V A s}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{\text{N m}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}} = \text{N s}$$



Impuls – emittiertes Elektron:

$$p_e = m_e \cdot v_e \quad \text{mit } v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m_e}} \quad (\text{siehe Aufgabe 1.2.2})$$

$$p_e = m_e \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m_e}} = \sqrt{2 \cdot E_{\text{kin}} \cdot m_e}$$

$$p_e = \sqrt{2 \cdot 0,91 \text{ eV} \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = \sqrt{2 \cdot 0,91 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot \text{V} \cdot 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = \underline{5,15 \cdot 10^{-25} \text{ Ns}}$$

$$[p_e] = \sqrt{\text{As} \cdot \text{V} \cdot \text{kg}} = \sqrt{\text{kg}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}} = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \text{Ns}$$

Vergleich:

$$p_e \gg p_{\text{Ph}}$$

Begründung:

- Impuls ist Erhaltungsgröße
- Wenn emittiertes Elektron größeren Impuls hat als das „zugeführte“ Photon, muss das Elektron Impuls aus dem Cäsiumkern bei der Emission „mitgenommen“ haben.
- Das ist nur möglich, wenn das Elektron im Cäsiumkern negative Bindungsenergie besitzt, also muss das emittierte Elektron im Metallgitter gebunden sein.
- Beim Photoeffekt werden keine freien Elektronen aus dem Metall emittiert.