

Name: \_\_\_\_\_ BE: \_\_\_\_\_ / 138  $\hat{=}$  \_\_\_\_\_ % Note: \_\_\_\_\_ P.

### 1. Aufgabe: Termschema – das Kombinationsprinzip (46 BE)

Im Jahr 1929 hat Paschen das Spektrum von  $He^+$  - Ionen untersucht und fand neben anderen Frequenzen auch die **in den Materialien** angegeben fünf Frequenzen.

- a) Zeichne einen beschrifteten Versuchsaufbau, mit dem man das Spektrum objektiv beobachten kann! Zeichne die Begrenzungsstrahlen ein! 10 BE  
 Begründe, weshalb die Beobachtung nicht nur mit einem einfachen Schirm durchgeführt werden kann! 03 BE
- b) Erläutere das Kombinationsprinzip! 03 BE  
 Fertige dazu eine geeignete Skizze an! 02 BE
- c) Skizziere mit Hilfe der fünf bekannten Frequenzen des  $He^+$  - Spektrums einen Ausschnitt des  $He^+$  - Termschemas und begründe dein Vorgehen! 10 BE  
 Untersuche, ob in deinem Termschema weitere Frequenzen beobachtbar sein müssten, und gib diese gegebenenfalls an! 02 BE
- d) Die Spektrallinien können unter einem wellenlängenabhängigen Winkel  $\alpha$  vermessen werden.  $\alpha$  ist der Winkel der Wellennormalen zur optischen Achse.  
 Es gilt:  $\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)$ , wobei  $\lambda$  die Wellenlänge und  $d$  der Abstand benachbarter Gitteröffnungen ist.  
 Leite diese Formel mit Hilfe einer geeigneten Skizze begründet her! 10 BE  
 Berechne die Mindestbreite eines geeigneten Schirms, der in der Entfernung  $e = 80\text{cm}$  vom Gitter stehen soll, wenn man alle fünf Linien auf beiden Seiten der optischen Achse beobachten will! Das Gitter besitzt 600 Striche pro Millimeter. 06 BE

**2. Aufgabe: Die Planck-Konstante (46 BE)**

Die Planck-Konstante  $h$  soll mit Hilfe von Leuchtdioden (LED) bestimmt werden. Das Schaltbild in **Abb.1** zeigt den Aufbau des entsprechenden Experiments, in dem die von außen an die Platine angelegte Spannung  $U$  variiert wird. Das von einer LED ausgesandte Licht ist zwar nicht monochromatisch, lässt sich aber durch eine die LED charakterisierende Wellenlänge beschreiben. Die **Tab.1** zeigt für verschiedene Leuchtdioden jeweils diese charakterisierende Wellenlänge und die gemessene Schwellenspannung  $U_S$ , bei der das Leuchten der LED sichtbar einsetzt.

- a) Beschreibe anhand des Schaltbildes in **Abb.1** die Durchführung eines Experiments zur  $h$ -Bestimmung mit Hilfe von Leuchtdioden! 05 BE
- b) Erläutere kurz die Funktion des Vorwiderstandes und die Bedeutung der Polarität der angelegten Spannung  $U$  für das Experiment! 03 BE
- c) Für die blaue LED werden die Spannungen  $U$  und  $U_R$  gemessen. Die Messergebnisse sind der **Tab.2** zu entnehmen.  
Berechne die in **Tab.2** fehlenden Stromstärken! 05 BE  
Der Vorwiderstand der blauen LED beträgt  $R = 430 \Omega$ .  
Erkläre, wie man den Wert für die Spannung  $U_S$  aus **Tab.1** auch aus den Werten von **Tab.2** näherungsweise ermitteln kann! 03 BE
- d) Bestimme auf der Grundlage der Angaben in **Tab.1** einen Wert für die Planck-Konstante  $h$ !  
Nenne eine mögliche Ursache für eine Abweichung des von dir ermittelten Wertes von  $h$  vom Literaturwert! 07 BE  
*Hinweis: Auch bei Verwendung eines grafikfähigen oder CAS-Taschenrechners sind die Arbeitsschritte so zu dokumentieren, dass der Lösungsweg nachvollziehbar ist.* 03 BE
- e) Der hier bearbeitete Versuch wird in der Literatur als „Umkehrung des Fotoeffekts“ bezeichnet.  
Erläutere diese Bezeichnung! 04 BE  
Beschreibe und erläutere mit Hilfe geeigneter Skizzen ein anderes Experiment zur Bestimmung der Planck-Konstante! 16 BE

**3. Aufgabe: Absorption und Emission (46 BE)**

- a) In einer Röhre werden Elektronen beschleunigt und treffen auf einen Leuchtschirm, dessen Leuchtstoff Mangan enthält. Beim Auftreffen der Elektronen auf den Leuchtschirm entsteht ein Leuchtfleck. Die **Abb.3** enthält Informationen darüber, Licht welcher Wellenlängen von diesem Leuchtfleck emittiert wird.

Bestätige mit Hilfe des Energieniveauschemas für Mangan in **Abb.4**, dass das vom Leuchtfleck ausgehende Licht an den Stellen A, B und C im Spektrum der **Abb.3** aufgrund des vorhandenen Mangans entstanden sein kann!

12 BE

- b) In einem Experiment nach **Abb.5** wird eine Flamme mit Licht aus einer Quecksilber- und einer Natriumdampfampe bestrahlt, deren Spektren **Abb.6** zeigt. Gleichzeitig wird Natriumsalz in der Flamme verdampft, was die Flamme intensiv gelb färbt. Auf dem Schirm ist an der Stelle (a) ein Schatten der Flamme zu beobachten, an der Stelle (b) ist kein Schatten der Flamme zu beobachten.

Erkläre die beschriebenen Beobachtungen!

10 BE

- c) Ein He-Ne-Laser emittiert Licht mit der Wellenlänge  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ . Der Abstand zwischen den beiden Spiegeln des He-Ne-Lasers beträgt  $L = 0,5 \text{ m}$ .

Erläutere das physikalische Funktionsprinzip eines Helium-Neon-LASERS mit Hilfe eines Termschemas!

12 BE

Begründe, warum nur diskrete Frequenzen auftreten können!

05 BE

Berechne die kleinste und größte Wellenlänge der emittierten Strahlung und die Linienbreite  $\Delta f$ !

07 BE

## Materialien zu den Aufgaben

### 1. Aufgabe

$$f_1 = 1,2336 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$$

$$f_2 = 1,1696 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$$

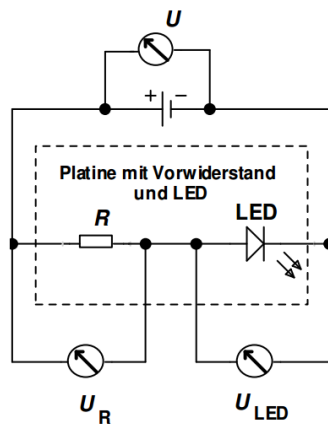
$$f_3 = 0,9869 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$$

$$f_4 = 0,2467 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$$

$$f_5 = 0,0639 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$$

Fünf Frequenzen des von Paschen untersuchten  $He^+$  - Spektrums

### 2. Aufgabe



**Abb.1** Schaltbild zum Experiment

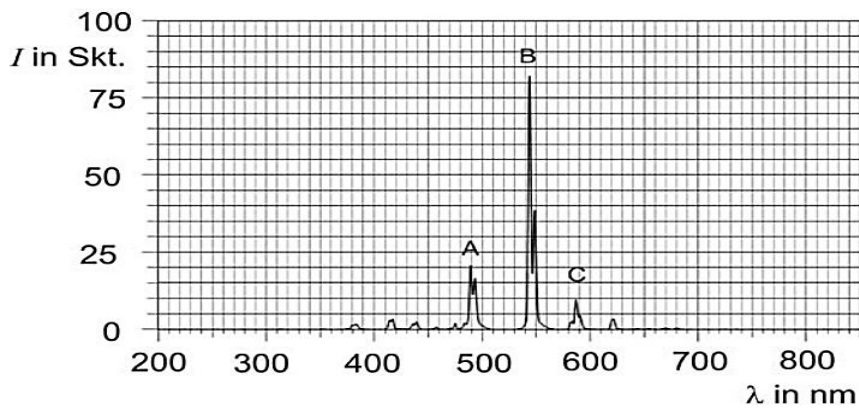
Farbe der LED	$\lambda$ in nm	$U_S$ in V
Blau	463	2,70
Grün	514	2,40
Rot	632	1,98

**Tab.1** Wellenlängen und gemessene Schwellenspannung

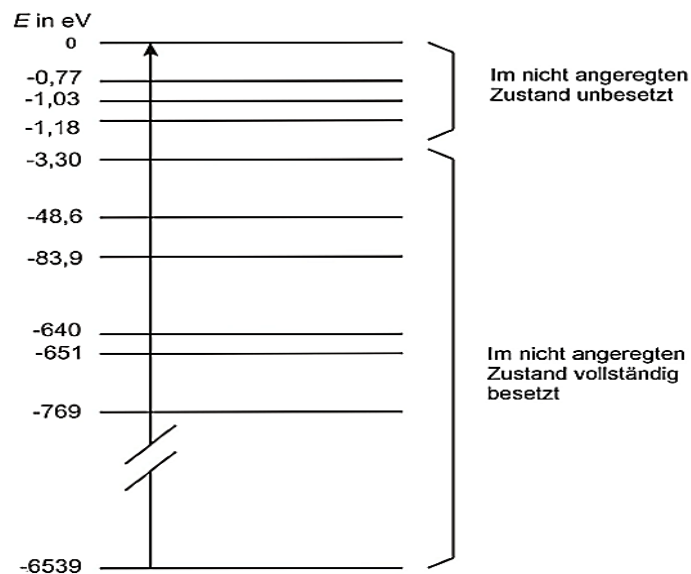
$U$ in V	$U_R$ in V	$I$ in mA
0,22	0,01	
1,74	0,01	
2,50	0,01	
2,66	0,02	
2,77	0,06	
2,89	0,16	
3,22	0,44	
3,65	0,82	
4,04	1,17	
4,52	1,61	

**Tab.2** Weitere Messungen des Versuchs

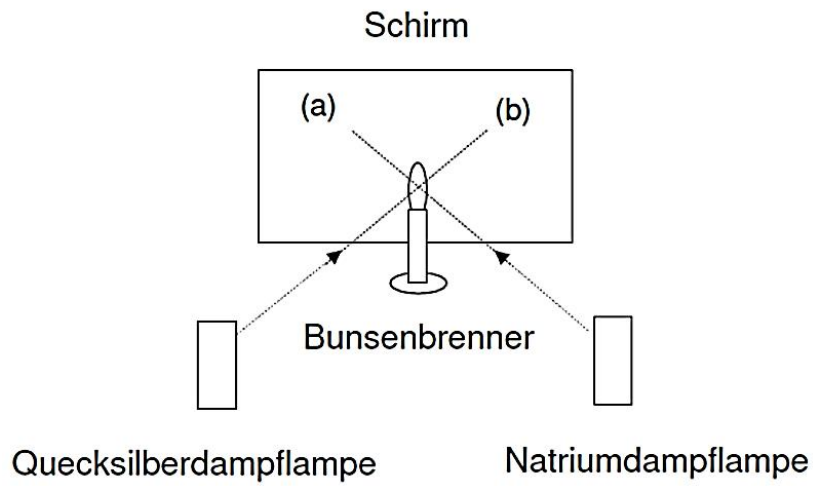
**3. Aufgabe**



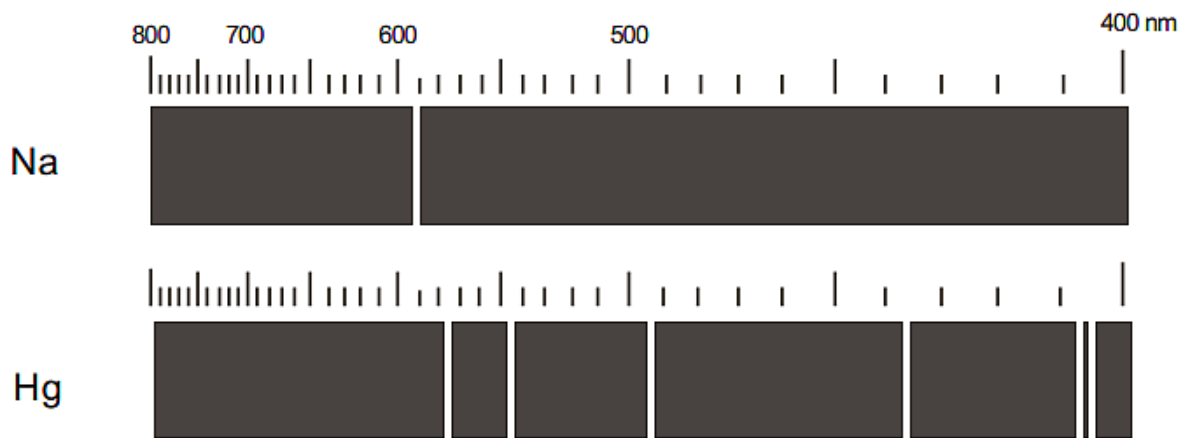
**Abb.3** Vom Leuchtfleck emittierte Wellenlängen



**Abb.4** Energieniveauschema von Mangan (nicht maßstabsgerecht)



**Abb.5** Versuchsaufbau zum Experiment

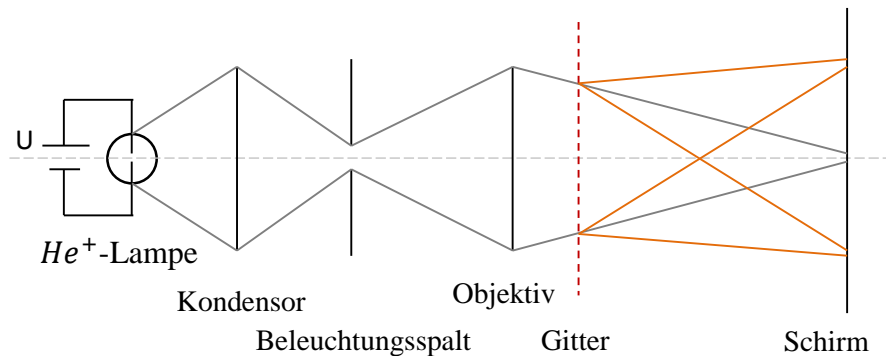


**Abb.6** Linienspektren der Elemente Natrium und Quecksilber

# Lösungen

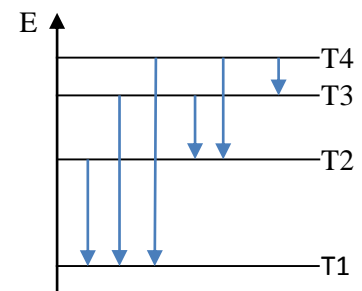
## 1. Aufgabe:

a)



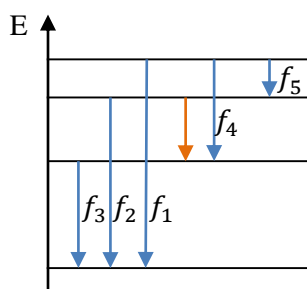
Da nur  $\lambda_5 = \frac{c}{f_5} = 469,2nm$  im sichtbaren Bereich liegt und  $\lambda_4 = \frac{c}{f_4} = 121,5nm$  sowie alle anderen noch kleineren Wellenlängen im UV-Bereich liegen, muss der Schirm für diese Wellenlängen fluoreszierend sein.

- b) Jeder Energiezustand eines Atoms lässt sich durch einen Term darstellen.  
 Der Übergang von einem höheren in einen niedrigeren Term entspricht einer beobachtbaren Spektrallinie.  
 Jede beobachtete Spektrallinie entspricht einem Übergang von einem höheren in einen niedrigeren Term.



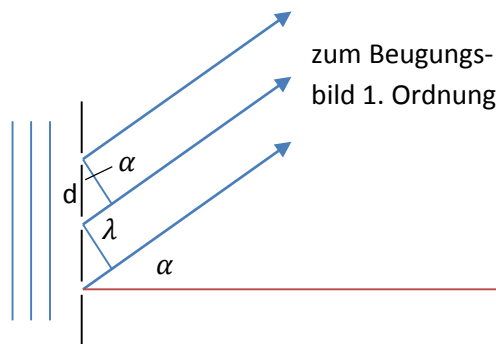
- c) An einer Differenzentabelle erkennt man, dass Differenzen bestimmter Frequenzen bereits angegebene Frequenzen sind. Die Kombination der benötigten Terme muss diese Beobachtung berücksichtigen.

	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$
$f_1$	-				
$f_2$	$f_5$	-			
$f_3$	$f_4$	$0,1827E+16$	-		
$f_4$	$f_3$	$0,9229E+16$	$0,7402E+16$	-	
$f_5$	$f_2$	$1,1057E+16$	$0,9230E+16$	$0,1828E+16$	-



Im Termschema erkennt man einen zusätzlichen Übergang (braun), der sich aus  $f_4 - f_5$  ergibt.  
 Die abgestrahlte Frequenz muss  $0,1828 \cdot 10^{16} Hz$  betragen.

- d) Das Licht wird am Gitter gebeugt. Die Wellennormalen laufen unter dem Winkel  $\alpha$  zum Beugungsbild 1. Ordnung auf dem weit entfernten Schirm. Deshalb kann man den Wegunterschied mit Hilfe eines Lots von der oberen auf die untere Wellennormale konstruieren (Fraunhofer'sche Betrachtung). Der Wegunter-



schied zweier Wellen benachbarter Huygens'scher Elementarwellen-Zentren beträgt für eine konstruktive Interferenz  $\lambda$ .  $d$ ,  $\lambda$  und das Lot bilden ein rechtwinkliges Dreieck mit der Hypotenuse  $d$ . Da die optische Achse (braun) und die Wellennormale (blau) den Winkel  $\alpha$

ein-schließen, beträgt der Winkel zwischen Wellennormale und Gitter  $90^\circ - \alpha$ , denn optische Achse und Gitter stehen aufeinander senkrecht. Da die Winkelsumme im Dreieck  $180^\circ$  beträgt, muss der Winkel zwischen dem Lot und dem Gitter ebenfalls  $\alpha$  betragen.

Im rechtwinkligen Dreieck gilt:  $\sin(\alpha) = \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda}{d}\right)$ .

Für die Breite  $B = 2 \cdot b$  des Schirms gilt:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda_{max}}{d}\right) = \arcsin\left(\frac{c \cdot 600}{f_{min} \cdot 10^{-3} m}\right). \text{ Mit } f_{min} = f_5 \text{ folgt: } \alpha = 16,35^\circ.$$

$$\text{Aus } \tan(\alpha) = \frac{b}{e} \text{ folgt: } b = 23,5 cm \Rightarrow B = 47,0 cm.$$

## 2. Aufgabe:

- a) Die Spannung  $U$  wird von  $0V$  beginnend langsam hochgeregelt. Dabei wird die LED (in einem abgedunkelten Raum) genau beobachtet. In dem Moment, in dem sie gerade anfängt zu leuchten, wird das Hochregeln der Spannung gestoppt und die so genannte Schwellenspannung  $U_S$  an der LED abgelesen und in einer Tabelle der von der LED hauptsächlich emittierten Wellenlänge zugeordnet. Dieser Versuch wird auch für die anderen LEDs durchgeführt.
- b) Der Vorwiderstand  $R$  soll die LED schützen, da die Stromstärke beim Erreichen der Schwellenspannung stark ansteigt und die Diode zerstören könnte. Damit die LED leuchten kann, muss sie in Durchlassrichtung gepolt werden. Das Pfeilsymbol gibt die technische Stromrichtung an.



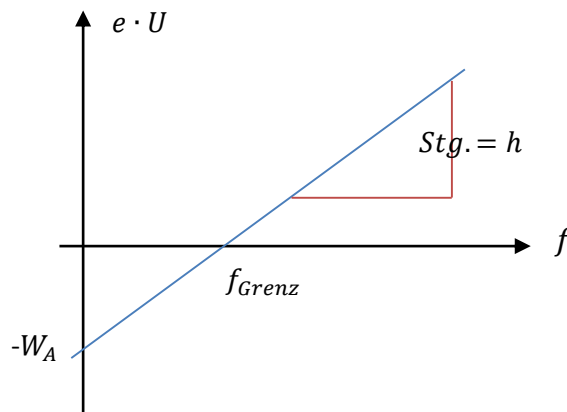
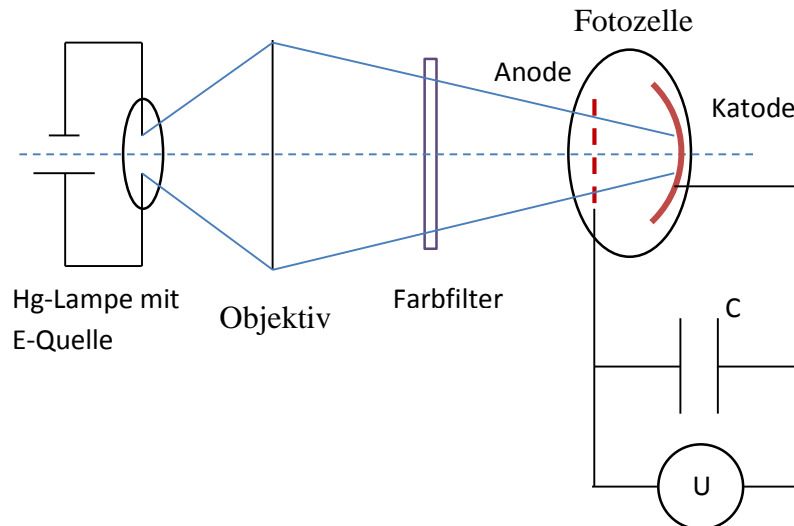
- c) Es gilt:  $I = \frac{U_R}{R}$ . Mit  $R = 430\Omega$  ergeben sich die Werte in der Tabelle.  
 In **Tab.1** ist für die blaue LED  $U_S = 2,70V$  angegeben. Aus dem Schaltbild **Abb.1** geht hervor:  $U_{LED} = U - U_R$ . Ist die Schwellenspannung  $U_S$  erreicht, steigt die Stromstärke  $I$ , also wäre nach **Tab.2**  $U_S = 2,66V - 0,02V = 2,64V$  oder auch  $U_S = 2,77V - 0,06V = 2,71V$ . Dieses Verfahren kann aber nur eine Näherung sein, da der genaue Moment des Anstiegs von  $I$  aus **Tab.2** nicht entnommen werden kann.

$U$ in V	$U_R$ in V	$I$ in mA
0,22	0,01	0,023
1,74	0,01	0,023
2,50	0,01	0,023
2,66	0,02	0,047
2,77	0,06	0,140
2,89	0,16	0,372
3,22	0,44	1,023
3,65	0,82	1,907
4,04	1,17	2,721
4,52	1,61	3,744

- d) Bei dieser Methode der  $h$ -Bestimmung wird elektrische Energie in Strahlungsenergie umgesetzt:  $W = e \cdot U_S = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ . Trägt man  $\frac{c}{\lambda}$  auf der  $x$ -Achse ab und  $e \cdot U_S$  auf der  $y$ -Achse, so ergibt sich eine Ursprungsgerade.  
 $L1: \frac{c}{\lambda}$  in Hz;  $x$ -List.  $L2: e \cdot U_S$  in J;  $y$ -List. LinReg L1, L2 liefert:  
 $y = 6,611426 \cdot 10^{-34} + 2,345818 \cdot 10^{-21}$ . Dies bedeutet physikalisch:  
 $W(f) = 6,611426 \cdot 10^{-34} \text{Js} \cdot f = h_{exp} \cdot f$ . Der  $y$ -Achsenabschnitt kann vernachlässigt werden, da  $W(0) = 0$ . Es wird keine Frequenz emittiert, wenn keine Energie emittiert wird.  
 Relativer Fehler:  $\Delta = \frac{h_{exp} - h_{Lit}}{h_{Lit}} = -0,22\%$ . Dieser sehr geringe Fehler liegt in der Schwierigkeit, den Beginn des Leuchtens genau zu erkennen. Werden die Spannungswerte zu hoch gemessen, ergibt sich ein zu großer Wert für  $h$ . Regelt man die Spannung beim Messen wieder etwas zurück, um den Startpunkt des Aufleuchtens genauer zu erfassen, kann es zu kleineren Spannungen führen und  $h$  wird zu klein ermittelt. Dies könnte hier der Fall gewesen sein.
- e) Beim Photoeffekt wird die Energie eines Photons, das auf ein geeignetes Material trifft, in Ablösearbeit und kinetische Energie eines Elektrons umgewandelt, das daraufhin das Material verlässt.  
 Hier werden in der Grenzschicht einer LED durch Zufuhr elektrischer Energie Ladungsträger-Paare („Loch“ und „Elektron“) zusammengeführt. Die frei werdende elektrische Energie wird als Strahlung emittiert. Aufgrund dieser Umkehr der Energieumwandlung spricht man von der „Umkehrung des Photoeffekts“.

Mit Hilfe der Gegenfeldmethode lässt sich  $h$  ebenfalls bestimmen. Das Licht einer Quecksilber-Lampe wird auf die Katode einer Fotozelle projiziert. Vor die Fotozelle werden verschiedene Farbfilter gehalten, so dass nur Licht einer Frequenz  $f$  die Fotokatode erreicht. Parallel zur Zelle liegt ein Kondensator, der sich während der Bestrahlung der Zelle auflädt. Verändert sich die Kondensatorspannung  $U(f)$  nicht mehr, so wird durch ein parallel geschaltetes Voltme-

ter diese Spannung am Kondensator gemessen und der gerade benutzten Frequenz  $f$  zugeordnet. Trägt man die Energie  $e \cdot U$  der energiereichsten Elektronen, die den Kondensator noch laden konnten, gegen die Frequenz  $f$  auf, ergibt sich die „Einstein'sche Gerade“. Ihre Steigung ist die Planck-Konstante  $h$ , ihre Schnittstelle mit der  $f$ -Achse die Grenzfrequenz  $f_{Grenz}$ , ab der der Fotoeffekt in der Fotozelle eintreten kann, und die Schnittstelle mit der Energieachse ist die Ablösearbeit  $-W_A$ , deren Betrag mindestens aufgebracht werden muss, um ein Elektron aus dem Katodenmaterial abzulösen.



**3. Aufgabe:**

a) In **Abb.3** ist ablesbar:

A liegt bei ca.  $490\text{nm}$ , B bei ca.  $542\text{nm}$  und C bei ca.  $589\text{nm}$ .

Mit  $f = \frac{c}{\lambda}$  und  $\Delta W = h \cdot f$  entsprechen diese Wellenlängen den emittierten Energiebeträgen:

A:  $2,53\text{eV}$ , B:  $2,29\text{eV}$  und C:  $2,10\text{eV}$ .

Betrachtet man **Abb.4**, so entspricht:

A dem Übergang von  $-0,77\text{eV}$  auf  $-3,30\text{eV}$  ( $2,53\text{eV}$  werden emittiert),

B dem Übergang von  $-1,03\text{eV}$  auf  $-3,30\text{eV}$  ( $2,27\text{eV}$  werden emittiert),

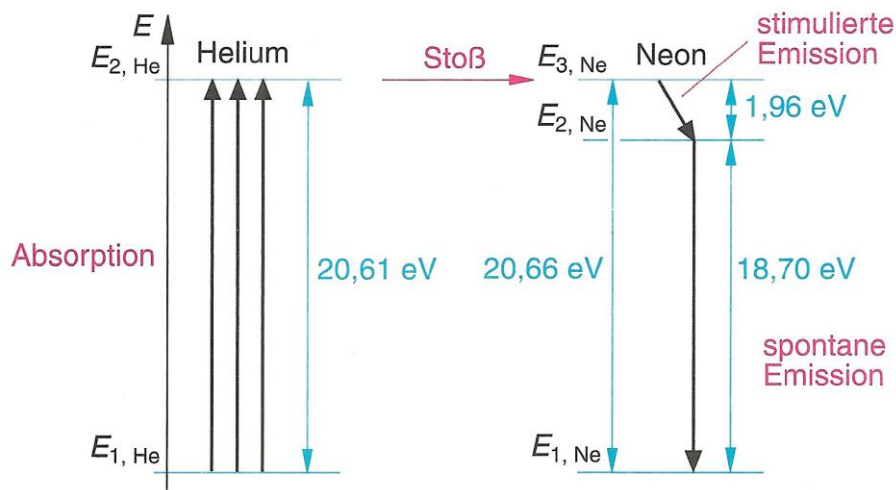
C dem Übergang von  $-1,18\text{eV}$  auf  $-3,30\text{eV}$  ( $2,12\text{eV}$  werden emittiert).

b) Bei diesem Experiment handelt es sich um Resonanzabsorption. Die Natriumdampflampe emittiert Licht der Wellenlänge  $\lambda = 589\text{nm}$ . Dieses Licht durchstrahlt die Bunsenbrenner-Flamme. Solange noch kein Natriumsalz in der Flamme verdampft wird, sieht man nur Schlieren im Bereich (a), in dem ein Schatten der Flamme entstehen könnte. Die Flamme ist bereits gelb, da eine Anregung der Na-Atome durch thermische Energie erfolgt, die sich durch Emission der „gelben Photonen“ schnell wieder abbaut. Wird jetzt Natriumsalz in der Flamme verdampft, können Natriumatome in der Flamme aus dem Licht der Na-Lampe genau die Energie quantenhaft absorbieren, die sie für einen Quantensprung aus ihrem momentanen Zustand in ein höheres Energieniveau benötigen. Aus diesem fallen sie aber bereits nach ca.  $10^{-8}\text{s}$  wieder zurück und emittieren dabei den gleichen Energiebetrag, den sie vorher aufgenommen haben – die Flamme leuchtet gelb. Da im Bereich der Flamme ein großer Anteil der gelben Photonen der Na-Lampe absorbiert wird, erscheint ein dunkler Schatten in (a) auf dem Schirm. Da die Flamme ihr gelbes Licht diffus in alle Raumrichtungen abstrahlt, kommen zwar auch einige gelbe Photonen der Flamme wieder auf den Schirm, aber der in andere Richtungen abgestrahlte Teil fehlt.

Im Bereich (b) sieht man nur die Schlieren, unabhängig davon, ob Natriumsalz in der Flamme verdampft wird oder nicht. Dies hängt damit zusammen, dass die von der Hg-Lampe emittierten Photonen nicht von den Na-Atomen in der Flamme aufgenommen werden können, denn für eine quantenhafte Absorption fehlen die passenden Photonen bzw. Frequenzen bzw. Wellenlängen. Dies kann man an der **Abb.6** deutlich erkennen.

c) Im He-Ne-LASER befindet sich in einer Gasentladungsröhre Helium- und Neongas. Helium dient als so genanntes Pumpgas, da die Helium-Atome als Energiespeicher dienen, um dann durch unelastische Stöße mit den Neonatomen diese anzuregen. Beide Gase besitzen ein Anregungsniveau auf etwa gleicher Höhe ( $E_{2,He}$ ,  $E_{3,Ne}$ ). Der geringe Unterschied, um den das Anregungsniveau von Neon höher liegt, wird durch zusätzliche Stoßenergie der Heliumatome ausgeglichen. Das Anregungsniveau  $E_{2,He}$  von He ist metastabil, es befinden sich also immer

mehr He-Atome in diesem Zustand als im niedrigeren. Die Anregung geschieht durch Energieaufnahme aus dem elektrischen Feld. Optische Übergänge zum niedrigeren Zustand sind nicht möglich, so dass ein He-Atom seine Energie nur beim Zusammenstoß mit einem Ne-Atom wieder abgeben kann. Dies führt zur Besetzungsinversion beim Ne-Atom auf dem Niveau  $E_{3,Ne}$ . Da sich jetzt mehr Ne-Atome auf  $E_{3,Ne}$  befinden als auf einem niedrigeren Niveau, fällt das Ne-Atom aus diesem Niveau durch stimulierte Emission in einen Zwischenzustand  $E_{2,Ne}$  unter Aussendung eines roten Photons der Energie  $1,96\text{eV}$  zurück. Es hat die Wellenlänge des bekannten roten He-Ne-LASERS. Aus dem Zwischenzustand  $E_{2,Ne}$  fällt das Ne-Atom danach in seinen ursprünglichen Zustand  $E_{1,Ne}$  zurück und sendet nicht sichtbares Licht aus.



Es können nur diskrete Frequenzen auftreten, da auch der Wellencharakter der LASER-Photonen berücksichtigt werden muss. In dem LASER-Resonator werden nur die Photonen, die genau senkrecht auf einen der beiden parallel zueinander liegenden Spiegel treffen, auf gleichen Wegen reflektiert und durchqueren das angeregte Ne-Gas. Durch die stimulierte Emission nimmt die Energie im Inneren des Resonators ständig zu. Dies bedeutet im Wellenmodell, dass sich eine stehende Welle mit Knoten an den festen Spiegel-Enden bildet. Durch das Hin- und Herfliegen der Photonen verstärkt sich deren Amplitude; die stehende Welle ist ein Energiespeicher.

Es gilt:  $L = k \cdot \frac{\lambda}{2}$ , wobei  $k$  ganzzahlig sein muss. Mit  $\lambda = \frac{c}{f}$  folgt:  $L = k \cdot \frac{c}{2 \cdot f}$  und  $f = \frac{k \cdot c}{2 \cdot L}$ . Da  $k$  nur ganzzahlig sein kann, gibt es nur diskrete Frequenzen im Resonator der Länge  $L$ .

Aus  $L = k \cdot \frac{632,8 \cdot 10^{-9} \text{m}}{2}$  folgt:  $k = 1580278,129$ .  $k$  muss aber ganzzahlig sein, also gibt es ein  $k_{min} = 1580278$  und ein  $k_{max} = 1580279$ . Hieraus ergibt sich für die kleinste Wellenlänge, die emittiert werden kann:  $\lambda_{min} = \frac{2L}{k_{max}} = 632,7996512 \text{nm}$  und für die größte  $\lambda_{max} = \frac{2L}{k_{min}} = 632,8000516 \text{nm}$ .

Die Linienbreite beträgt  $\Delta f = \frac{c}{\lambda_{min}} - \frac{c}{\lambda_{max}} = 299,76570MHz \approx 300MHz$ .