

# D20 – Franck-Hertz-Versuch

## Physikpraktikum

Tobias Krähling  
eMail: <Tobias.Kraehling@SemiByte.de>  
Homepage: <www.SemiByte.de>

18.11.2007  
Version: 1.1

<b>Stichworte:</b>	Mechanik der Drehbewegung (Drehimpuls, Trägheitsmoment, Winkelgeschwindigkeit), Bohr'sches Atommodell, Bohr'sche Postulate, Berechnung der Rydbergkonstanten, Quantelung, Quantenzahlen, elastischer Stoß, Anregung, Energie eines Teilchens im Feld, Raumladungsgesetz, Termschema von Hg
<b>Literatur:</b>	[Dem06], [GKV86], [Kuc94], [Lin93], [Tip98], [Mey06], [KSF+04]

## 1. Aufgabenstellung

Bestimmung der Anregungsenergie des 1. über dem Grundzustand von Hg liegenden Niveaus.

## 2. Grundlagen

Niels BOHR entwickelte, basierend auf den experimentellen Ergebnissen der Spektralanalyse und unter der Berücksichtigung der planck'schen Energiegleichung  $E = h\nu$  (Quantisierung), 1913 ein Atommodell (Schalenmodell), bei dem sich die Elektronen auf diskreten Kreisbahnen um den Kern bewegen – aber entgegen der klassischen Physik auf diesen keine Energieabgabe durch die Beschleunigung der Elektronen erfolgt. Zu diesem Atommodell formulierte BOHR die folgenden drei Postulate:

1. Um den Atomkern bewegen sich die Elektronen nach den Gesetzen der klassischen Mechanik auf wohldefinierten, diskreten Kreisbahnen mit einer wohldefinierten Energie  $E_n$ , dem Energieniveau.
2. Die Bewegung des Elektrons erfolgt auf diesen diskreten Kreisbahnen strahlungslos. Der Übergang eines Elektrons von einem höheren in ein niedrigeres Energieniveau wird die wohldefinierte Energie  $\Delta E = h\nu$  in der Form von Strahlung emittiert.
3. Das Elektronensystem ist nur in den so genannten stationären Zuständen stabil. Diese stationären Zustände sind dadurch gekennzeichnet, daß der Drehimpuls des Elektrons nur die diskreten Werte

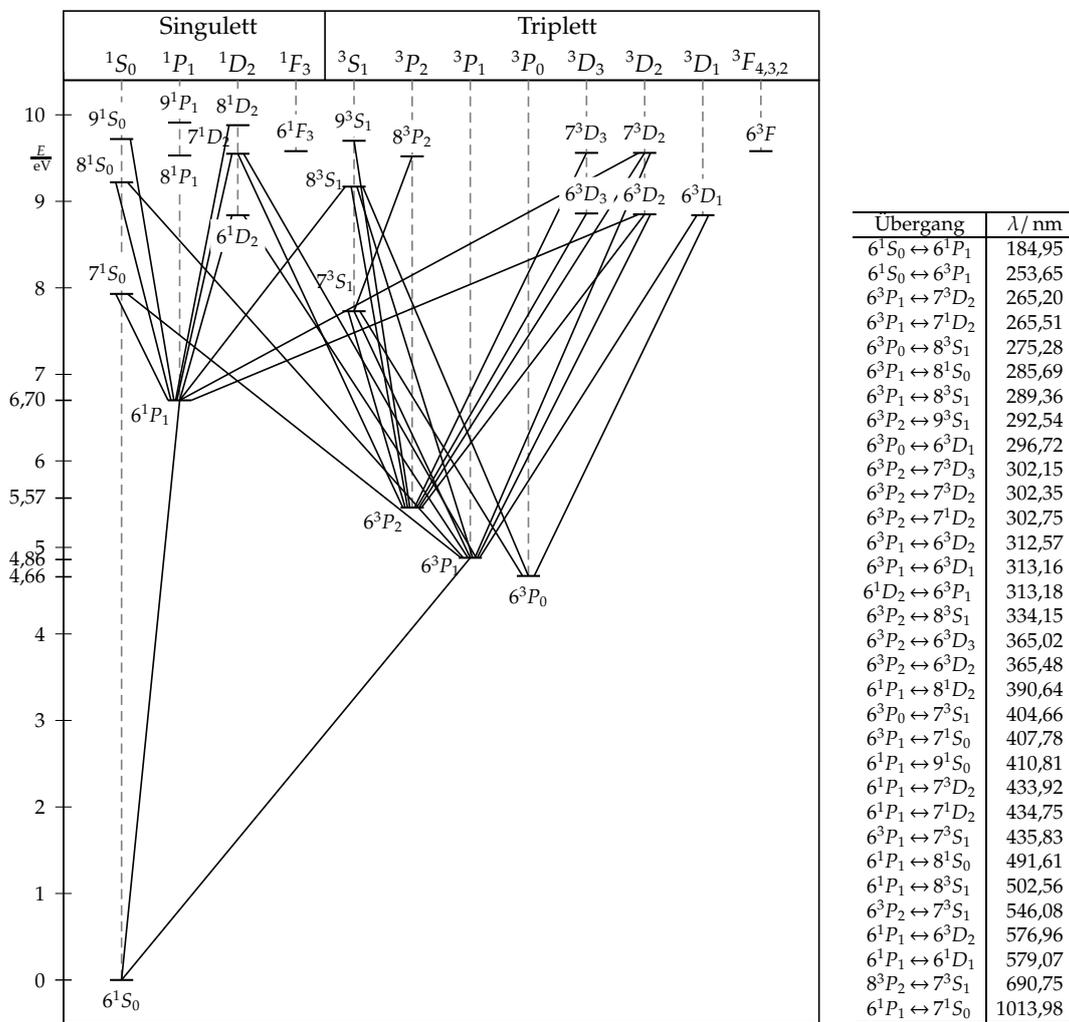
$$mvr = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \quad (1)$$

mit  $n \in \mathbb{N}$  annimmt.

1915 verfeinerte SOMMERFELD das Bohr'sche Atommodell, indem er auch elliptische Bahnen zuließ, wodurch das Spektrum von Atomen mit mehreren Elektronen besser erklärt werden konnte. Durch die Zulassung von elliptischen Bahnen konnten die Elektronen mehrere diskrete Energiezustände (Unterniveaus) annehmen, die mit kleinen Buschstaben (s-, p-, d-, f-Niveau) bezeichnet werden. Die diskrete, emittierte Strahlung wurden nach einem Vorschlag von PLANCK Energiequant (oder kurz Quant) genant und SOMMERFELD übernahm diese

Bezeichnung für die Zahlen, die die Energieniveaus charakterisierten und führte dafür den Begriff *Quantenzahl* ein. Die *Hauptquantenzahl*  $n$  kennzeichnet das Hauptenergieniveau eines Elektrons und bestimmt den Radius der Kreisbahn oder die zugehörige große Halbachse der Ellipsenbahn. Die *Nebenquantenzahl*  $l$  (*Bandrehimpuls-Quantenzahl*) erfasst die Einzelenergieniveaus und bestimmt die Exzentrizität der Ellipsenbahn mit gleicher Hauptquantenzahl sowie deren Anzahl – die Nebenquantenzahl kann Werte im Bereich von  $l \in [0, n - 1]$  annehmen, die Energieniveaus werden wie o. a. mit kleinen Buchstaben bezeichnet. Weitere Untersuchungen und das quantenmechanische Atommodell erfordern die Einführung zweier weiterer Quantenzahlen, um den Zustand eines Elektrons eindeutig beschreiben zu können. Dies ist zum einen die *Magnetquantenzahl*  $m$ , die die Raumorientierung der einzelnen Bahnen bzw. Orbitale beschreibt und Werte im Bereich  $m \in [-l, l]$  annimmt. Zum anderen die *Spinquantenzahl*  $s$ , die den Eigendrehimpuls<sup>1</sup> des Elektrons beschreibt ( $s = \pm 1/2$ ). In einem *Termschema* werden alle aufgrund der Quantenzahlen möglichen Energieniveaus dargestellt.

### 2.1 Termschema von Quecksilber

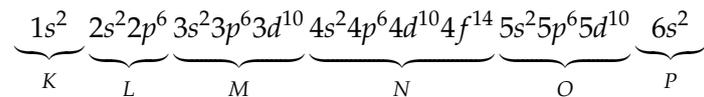


Der tiefgestellte Index in der Termbezeichnung für die Energiezustände der Valenzelektronen gibt den Gesamtdrehimpuls  $J$ , der hochgestellte Index die Multiplizität ( $2 \cdot S + 1$ ) und der Faktor die Schalennummer an. Datenquelle: [RJK<sup>+</sup>07]

**Abbildung 1:** Termschema von Quecksilber (Auswahl)

<sup>1</sup> Trägheitsmoment eines Massenpunktes:  $J = mr^2$ , Drehimpuls:  $L = J\omega$ , Winkelgeschwindigkeit bei Kreisbahn:  $\omega = 2\pi\nu$

Im neutralen Zustand enthält Quecksilber 80 Elektronen in der Atomhülle, die im Grundzustand folgendermaßen angeordnet sind:



Die Energieniveaus bis zur N-Schale sind aufgefüllt, obwohl die O-Schale ist noch nicht vollständig aufgefüllt ist, ist die P-Schale teilweise besetzt – die Spektraleigenschaften werden durch die zwei Elektronen in der P-Schale (Valenzelektronen) bedingt. Wie beim Helium zerfällt das Energieniveausystem der beiden Valenzelektronen in Singulett- und Triplett-Zustände (s. Abb. 1). Bei Singulett-Zuständen ist die Gesamtspinquantenzahl der Valenzelektronen  $S=0$  – d. h. die Eigendrehimpulse der Elektronen sind antiparallel ausgerichtet – bei Triplett-Zuständen ist  $S=1$  – d. h. parallele Ausrichtung der Eigendrehimpulse. Die Termbezeichnung für den Grundzustand ist  $6^1S_0$ .

## 2.2 Rydbergkonstante

Das Energieniveau der Elektronenbahn läßt sich als Summe aus potentieller und kinetischer Energie darstellen – für die  $n$ -te Bahn erhält man

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8n^2 \epsilon_0^2 h^2} \quad (2)$$

Beim Übergang von der kernfernen Bahn  $m$  auf die kernnähere Bahn  $n$  wird die Energie  $\Delta E = E_m - E_n = h\nu$  abgestrahlt, zusammen mit Gl. (2) kann die Abstrahlungsfrequenz ermittelt werden:

$$h\nu = \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \Rightarrow \nu = \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} = \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right) R \quad (3)$$

wobei  $R = 3,289842 \cdot 10^{15}$  Hz die Rydberg-Frequenz ist und sich aus dem hinteren, nur aus Konstanten bestehenden, Term ergibt. Die Rydberg-Konstante ist definiert über:

$$R_\infty = \frac{R}{c_0} = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (4)$$

James FRANCK und Gustav HERTZ führten 1913/14 erstmal den Anregungsversuch durch Elektronenstoß durch und konnten damit zeigen, daß Atome beim Zusammenstoß mit beschleunigten Elektronen nur diskrete Energiequanten aufnehmen können – die Quantelung im Bohr'schen Atommodell konnte damit verifiziert werden (Franck und Hertz erhielten hierfür 1925 den Physik-Nobelpreis). Das elektrische Feld  $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}}$  der Ladung  $Q$  ist konservativ, einem Raumpunkt  $P$  kann daher das *elektrostatische Potential*

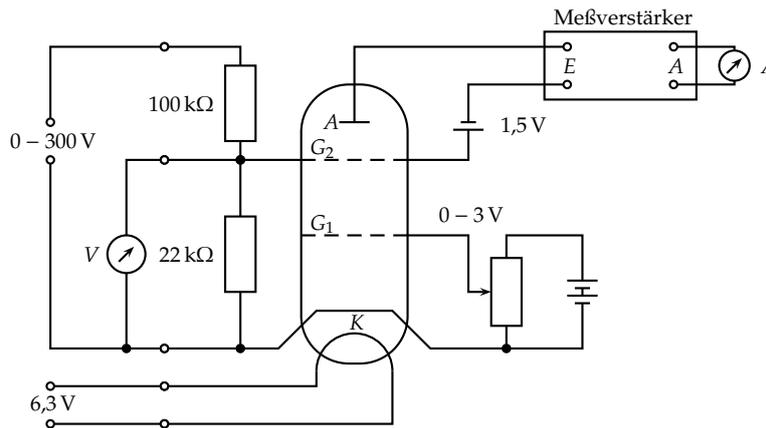
$$\phi(P) = \int_P^\infty \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (5)$$

zugeordnet werden. Soll eine Ladung  $q$  vom Punkt  $P$  ins Unendliche gebracht werden, so muß die Arbeit  $q \cdot \phi(P)$  verrichtet werden. Als Spannung wird die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten  $P_1$  und  $P_2$  bezeichnet (Gl. (6)). Durchläuft eine Ladung  $q$  eine Potentialdifferenz  $U$ , so ändert sich seine potentielle Energie zu Gl. (7) – da die Gesamtenergie jedoch konstant bleibt, gilt für die Änderung der kinetischen Energie Gl. (8).

$$U = \phi(P_1) - \phi(P_2) = \int_{P_1}^{P_2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (6) \quad \Delta E_{pot} = -qU \quad (7) \quad \Delta E_{kin} = -\Delta E_{pot} = qU \quad (8)$$

## 2.3 Frank-Herz-Versuch

Beim Frank-Hertz-Versuch befindet sich in einer evakuierten Glasröhre eine Kathode, Beschleunigungsgitter und Anode (siehe Abb. 2). Elektronen werden an der Kathode mittel Glühemission freigesetzt und in einem elektrischen Feld zw. Kathode und Beschleunigungsgitter beschleunigt. Einige der Elektronen verfehlen die Gitterstäbe und bewegen sich weiter in Richtung Anode. Zwischen Beschleunigungsgitter und Anode liegt eine Gegenspannung  $U_G$  an, so daß nur die Elektronen auf die Anode treffen können, deren Geschwindigkeit ausreichend zur Überwindung der Gegenspannung ist ( $\frac{1}{2}mv^2 > eU_G$ ) – die an der Anode auftreffenden Elektronen können dann als Stromfluß nachgewiesen werden. In der Glasröhre befindet



**Abbildung 2:** Schematische Skizze des Versuchsaufbaus

sich zusätzlich etwas Quecksilber, das durch Beheizung teilweise verdampft. Die mittlere freie Weglänge der Elektronen wird durch den Hg-Dampf reduziert und die beschleunigten Elektronen stoßen mit den Hg-Atomen zusammen. Bei kleinen Beschleunigungsspannungen  $U_B$  sind diese Zusammenstöße elastisch, d. h. Energie- und Impulserhaltung gelten. Da  $m_e \ll m_{Hg}$ , verlieren die Elektronen praktisch keine Energie und können die Anode erreichen (sobald  $U_B > U_G$ ). Bei weiterer Erhöhung der Beschleunigungsspannung  $U_B$  erreichen die Elektronen die notwendige Energie, um ein Hg-Atom anzuregen – d. h. ein Elektron des Hg-Atoms wird auf ein höheres Energieniveau durch den Energieübertrag beim Stoßprozeß gebracht. Das Hg-Elektron kehrt nach etwa  $10^{-8}$  s vom angeregten zum Grundzustand zurück und emittiert dabei ein Quant der Energie  $\Delta E = h\nu$  – der Differenz zw. beiden Energieniveaus. Bei diesem Stoßprozeß zw. Elektron und Hg-Atom handelt es sich somit um einen inelastischen Stoß – die Energie des Elektrons ist nach dem Stoß geringer und die Überwindung der Gegenspannung ist nicht mehr möglich – folglich sinkt der zu messende Strom an der Anode.

Wird die Beschleunigungsspannung weiter erhöht, so haben die Elektronen bereits nach einer kürzeren Beschleunigungsstrecke die notwendige Energie für einen inelastischen Stoß mit einem Hg-Atom aufgenommen (Stoßzone), jedoch können sie auf der noch verfügbaren Beschleunigungsstrecke so weit beschleunigt werden, daß sie wiederum die Gegenspannung überwinden können – dies führt zu einem höheren Stromfluß an der Anode. Bei genügend hoher Beschleunigungsspannung können die Elektronen auch mehrfach die notwendige Energie für den inelastischen Stoß erreichen – die Stoßzonen wandern vom Beschleunigungsgitter in Richtung Kathode, am Beschleunigungsgitter bildet sich jeweils eine neue Stoßzone. Die meßbaren Minima im Stromfluß an der Anode treten jeweils zu gleichen Abständen auf – dies entspricht der für einen inelastischen Stoß erforderlichen kinetischen Energie der Elektronen.

Das zusätzliche Beschleunigungsgitter  $G_2$  in der Glasröhre mit einer Gegenspannung von etwa 2 V gegenüber der Kathode soll ein Niederschlagen von kondensierenden Hg auf der Kathode verhindern.

### 3. Versuchsbeschreibung

1. Vorbereitungen:
  - a) elektrische Schaltung gemäß Abb. 2 aufbauen und vom Versuchsbetreuer abnehmen lassen;
  - b) Einzuschalten sind:
    - der Ofen,
    - Netzgerät zur Versorgung der Röhrenheizung und des Beschleunigungsgitters G2 (Einstellung einer Beschleunigungsspannung am Gitter G2 von ca. 2 V gegen Kathode)
    - Meßverstärker, Spannung am Steuergitter G1, Gegenspannung zwischen Anode und Beschleunigungsgitter G2
  - c) um den Meßbereich des Amperemeters möglichst vollständig auszuschöpfen, muß hierfür die Spannung am Steuergitter G1 derart variiert werden, daß beim letzten relativen Maximum der erwarteten Kurve fast Vollausschlag vorliegt – das Maximum muß zunächst bestimmt werden.
2. Durchführung:
  - a) Die Beschleunigungsspannung wird in 0,5 V-Schritten im Bereich 0 – 30 V variiert und der zugehörige Anodenstrom gemessen.
  - b) Die Messung sollte zügig durchgeführt werden (2 s pro Meßpunkt), da das Thermostat die Temperatur nur unzureichend konstant hält.
  - c) Es sind zwei Meßreihen aufzunehmen, wobei bei der zweiten Meßreihe nochmals der Vollausschlag des Amperemeters beim „5. Maximum“ zu kontrollieren ist
3. Nach der Versuchsdurchführung:
  - a) Abzuschalten sind Meßverstärker, Spannung an G1 und Gegenspannung sowie der Ofen
  - b) Das Netzgerät darf nicht abgeschaltet werden, am Gitter G2 sollte etwa eine Spannung von 2,0 V anliegen.
4. Auswertung:
  - a) Diagramm  $I_A(U_{G2})$  erstellen;
  - b) Nr. des Maximums gegen die zugehörige Beschleunigungsspannung auftragen (zweckmäßig im  $I_A(U_{G2})$ -Diagramm) und Ausgleichsgerade bestimmen, die Anregungsenergie erhält man aus der Steigung der Ausgleichsgeraden.

## 4. Meßwerte

$i$	$U_2/V$	$I_1/wE$	$I_2/wE$	$i$	$U_2/V$	$I_1/wE$	$I_2/wE$	$i$	$U_2/V$	$I_1/wE$	$I_2/wE$
1	0,0	0,0	0,0	23	11,0	20,0	20,5	45	22,0	25,0	23,5
2	0,5	0,5	0,5	24	11,5	14,5	15,0	46	22,5	23,5	23,0
3	1,0	1,0	0,5	25	12,0	11,5	11,0	47	23,0	27,0	25,5
4	1,5	1,0	0,5	26	12,5	11,0	10,5	48	23,5	31,0	31,0
5	2,0	1,0	0,5	27	13,0	12,5	12,0	49	24,0	40,0	39,0
6	2,5	1,0	1,0	28	13,5	16,0	15,0	50	24,5	49,0	47,0
7	3,0	1,0	1,0	29	14,0	20,5	19,5	51	25,0	57,0	55,5
8	3,5	2,0	1,5	30	14,5	27,0	26,0	52	25,5	57,5	55,0
9	4,0	3,0	2,5	31	15,0	35,5	33,5	53	26,0	50,0	47,0
10	4,5	4,0	4,0	32	15,5	38,0	35,5	54	26,5	39,0	39,0
11	5,0	7,0	6,5	33	16,0	39,0	30,0	55	27,0	34,0	33,0
12	5,5	9,5	9,0	34	16,5	23,0	22,0	56	27,5	31,0	31,0
13	6,0	10,0	9,0	35	17,0	18,0	17,0	57	28,0	33,5	33,5
14	6,5	7,0	7,0	36	17,5	17,0	16,0	58	28,5	39,0	39,0
15	7,0	5,0	5,0	37	18,0	19,0	18,5	59	29,0	46,0	47,5
16	7,5	5,0	5,0	38	18,5	24,0	23,0	60	29,5	57,0	57,0
17	8,0	6,0	6,0	39	19,0	30,0	29,0	61	30,0	66,0	64,5
18	8,5	8,0	8,0	40	19,5	38,0	38,0	62	30,5	65,0	65,5
19	9,0	10,0	11,0	41	20,0	47,0	46,0	63	31,0	59,0	58,0
20	9,5	14,0	14,0	42	20,5	48,0	47,0	64	31,5	47,0	49,0
21	10,0	19,0	19,0	43	21,0	39,0	40,0				
22	10,5	23,5	23,0	44	21,5	29,5	29,0				

$i$  : laufende Nummer     $U_2$  : Beschleunigungsspannung     $I_{1,2}$  : Anodenstrom 1./2. Meßreihe

**Tabelle 1: Meßwerte**

$U_1 = 5,17\text{ V}$
$U_3 = 0,04\text{ V}$
$\vartheta_s = 180\text{ °C}$
$\vartheta_i = 181\text{ °C}$

$U_1$  : Saugspannung

$U_3$  : Gegenspannung

$\vartheta_s$  : Eingestellte Soll-Temperatur Ofen

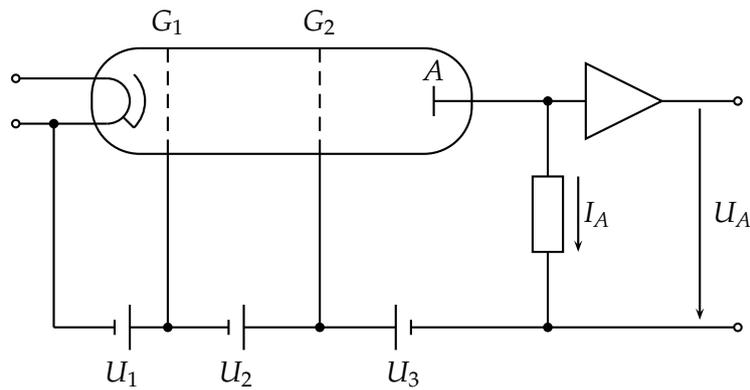
$\vartheta_i$  : Ist-Temperatur Ofen; diese ist vor der 1. Messung, zwischen beiden Messungen sowie nach der 2. Messung kontrolliert worden und betrug jeweils den o. a. Wert.

**Tabelle 2: Eingestellte Werte**

## 5. Neue Versuchsbeschreibung

Da eine andere wie in den Versuchsanleitungen [Mey06] beschriebene Experimentierapparatur verwendet wurde, wird im folgenden zunächst diese näher beschrieben und die Versuchsbeschreibung entsprechend ergänzt.

Die neue Experimentierapparatur besteht aus einem Franck-Hertz-Kontrollgerät, ein Ofen, einer Glasröhre mit Kathode, Beschleunigungsgittern und Anode, Thermostat und einem analogen Multimeter. Die elektronische Schaltung ist in Abb. 3 wiedergegeben, die, bis auf die Glasröhre im Franck-Hertz-Kontrollgerät integriert ist. Ebenfalls wird die Temperatur des Ofens über das Kontrollgerät gesteuert, eine Rückkopplung der Ist- zur Soll-Temperatur erfolgt über das Thermostat. Das Kontrollgerät ermöglicht, im Gegensatz zum alten Aufbau, einen weiteren Einstellungsparameter. Unabhängig eingestellt werden können hier alle drei



**Abbildung 3:** Neuer schematischer Versuchsaufbau

Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  und werden am Kontrollgerät über eine Digitalanzeige angezeigt (jedoch nicht gleichzeitig, da das Gerät nur über eine Digitalanzeige verfügt und über einen Wahlschalter die jeweils anzuzeigende Größe ausgewählt werden kann – ebenfalls können hier Soll- und Ist-Themperatur sowie der Anodenstrom angezeigt werden). Zu den einstellbaren Spannungen im einzelnen:

**Spannung  $U_1$ :** Dies ist die Saugspannung, um die durch Glühemission freigesetzten Elektronen von der Kathode abzuziehen. Durch die Freisetzung der Elektronen entsteht eine negative Raumladungszone an der Kathode – das elektrische Feld der freigesetzten Elektronen an der Kathode würde eine weitere Emission von Elektronen durch die abstoßende elektrische Kraft verhindern und zurück in die Kathode drängen. Daher müssen die emittierten Elektronen von der Kathode abgezogen werden, was durch die Potentialdifferenz  $U_1$  zwischen Gitter  $G_1$  und Kathode erfolgt.

**Spannung  $U_2$ :** Die Potentialdifferenz  $U_2$  zwischen den beiden Gittern  $G_1$  und  $G_2$  ist die Beschleunigungsspannung und führt zu einer Beschleunigung der Elektronen im elektrischen Feld.

**Spannung  $U_3$ :** Dies ist die Gegenspannung zwischen Gitter  $G_2$  und Anode, die eine Selektion der Elektronen vornimmt, so daß nur Elektronen die Anode erreichen können, deren kinetische Energie ausreicht, um die Potentialdifferenz zu überwinden.

Der Anodenstrom kann über einen Widerstand abfließen, die über diesen Widerstand abfallende Spannung  $U_A$  ist proportional zum Anodenstrom. Da für diesen Versuch die absolute Stromgröße nicht benötigt wird, sondern die Stromänderungen in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung, wird die Strommessung hier durch eine Spannungsmessung erfolgen (in willkürlichen Einheiten  $wE$ ). Aus praktischen Gründen wird für die Strommessung ein analoges Multimeter verwendet – welches an den  $U_A$ -Ausgang des Kontrollgerätes angeschlossen wird –, da 1.) bei der Maximumsuche für die Voreinstellung diese vom Beobachter durch den Zeigerausschlag besser erkennbar sind sowie 2.) ein ständiges Umschalten zwischen der Anzeige von  $U_2$  und  $I_A$  (das Kontrollgerät berechnet anhand des bekannten Widerstandes, über den der Strom abfließt, die abfallende Spannung in einen Strom um) unterbunden wird. Dies beschleunigt die Messung, um den Einfluß von möglichen Temperaturschwankungen innerhalb der Glasröhre zu vermeiden – zusätzlich werden auch Ablesefehler vermieden, da am Kontrollgerät nicht umgeschaltet werden muß.

## 5.1 Durchführung

Die elektrische Schaltung war bereits aufgebaut und der Ofen durch den Versuchsbetreuer ca. eine Stunde vor Versuchsbeginn angeschaltet worden, um eine konstante Temperatur in

der Glasröhre zu erhalten. Zur Voreinstellung sollten Saug- und Gegenspannung so eingestellt werden, daß das letzte relative Maximum den Meßbereich des Amperemeters möglichst vollständig ausschöpft – jedoch auch die einzelnen Maxima und Minima gut zu erkennen sind, d. h. die Schwankungen beim Durchlaufen von  $U_2 = 0 \dots 30 \text{ V}$  gut zu erkennen sind. Anschließend wurde die Beschleunigungsspannung in  $0,5 \text{ V}$ -Schritten im Bereich von  $0 - 30 \text{ V}$  variiert und der zugehörige Anodenstrom gemessen – dies wurde zweimal durchgeführt, wobei die Saug- und Gegenspannung für die zweite Meßreihe nicht verändert wurden, da diese Einstellung einen guten Kompromiß zwischen maximalen Amperemeterausschlag sowie Schwankungsstärke zeigte. Im Anschluß des Versuchsdurchführung konnte das Franck-Hertz-Kontrollgerät einfach ausgeschaltet werden.

## 6. Auswertung

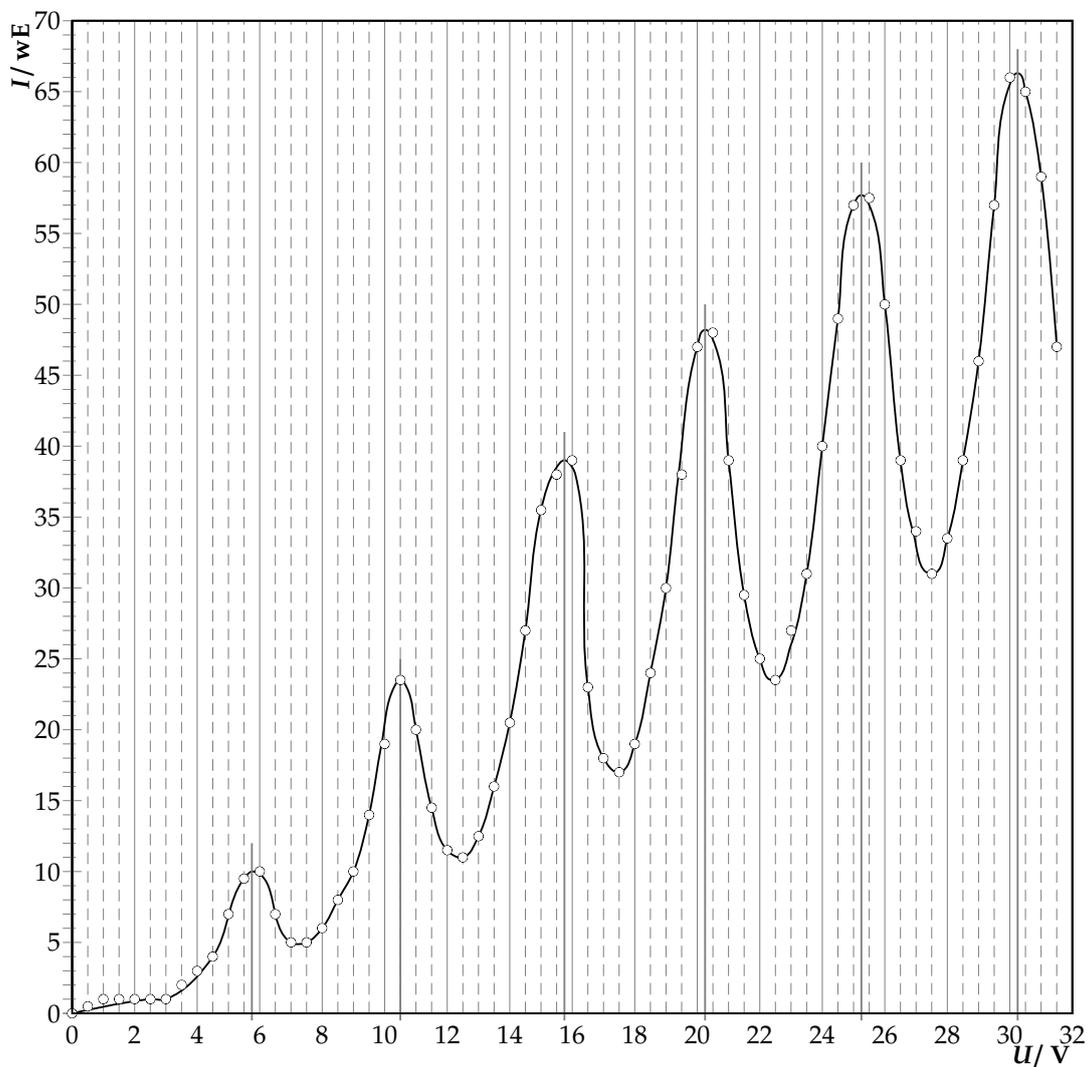
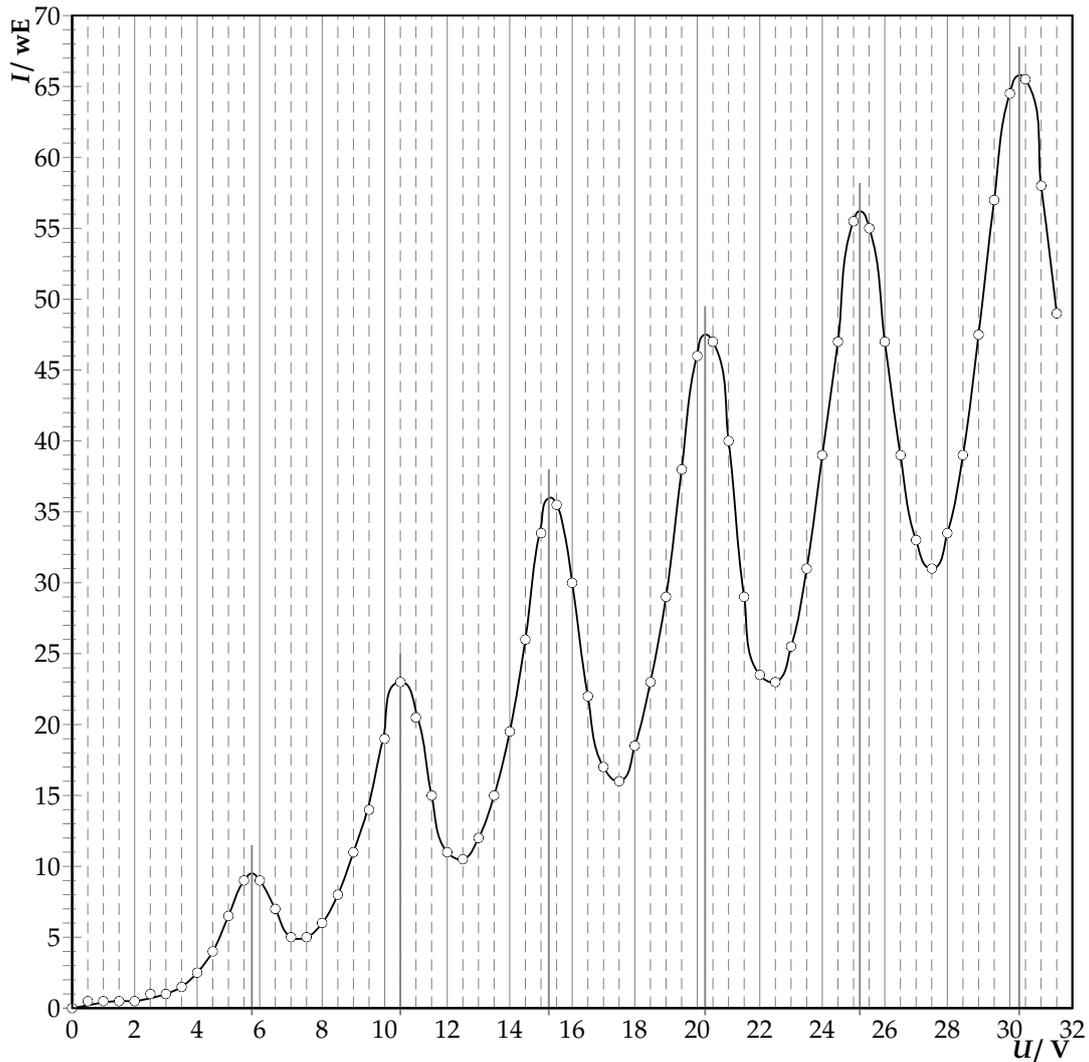


Abbildung 4:  $I(U_2)$ -Diagramm (1. Meßreihe)

Die Auftragung der gemessenen Stromstärke über die angelegte Beschleunigungsspannung  $U_2$  ist für beide Meßreihen mittels  $\text{\LaTeX}$  und  $\text{PSTricks}$  durchgeführt worden (Abb. 4 und 5), die zu ermittelten Spannungen zu den Strommaxima wurden anhand der Koordinaten der meßwertverbindenen Kurve bestimmt und sind für beide Meßreihen in der Tabelle 3 wiedergegeben.

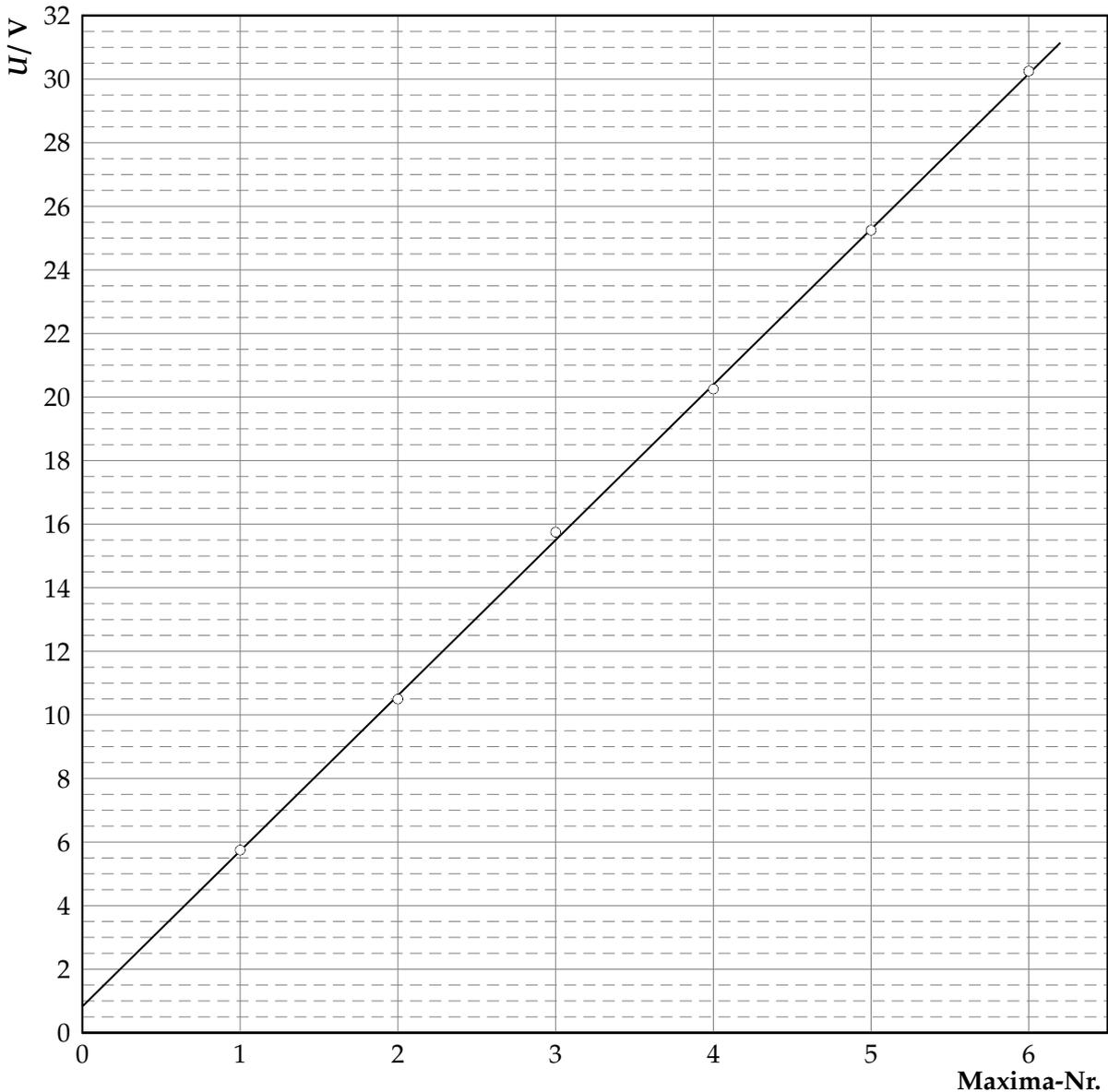
Abbildung 5:  $I(U_2)$ -Diagramm (2. Meßreihe)

Nr. Maxima	1. Meßreihe $U_2/ V$	2. Meßreihe $U_2/ V$
1	5,75	5,75
2	10,5	10,5
3	15,75	15,25
4	20,25	20,25
5	25,25	25,2
6	30,25	30,3

Tabelle 3: Ermittelte Spannungen zur Nummer der Strommaxima

Für beide Meßreihen wurde dann mit dem Statistikprogramm R die Koeffizienten für eine lineare Regressionsanalyse der Form  $y = a + bx$  bestimmt, die in Tabelle 4 notiert sind, und für jede Meßreihe die Spannung in Abhängigkeit der lf. Nummer des Strommaxima inklusive der bestimmten Ausgleichsgerade aufgetragen (Abb. 6 u. 7). Diese beiden Abbildungen zeigen auch, daß die Ausgleichsgerade nicht durch den Nullpunkt verläuft, sondern einen positiven Achsenabschnitt besitzt. Dies ist durch das Anlegen von Saug- und Gegenspannung begründet, die die Maxima in horizontaler Richtung verschieben – da für die Bestimmung der Anregungsenergie die absolute Lage der Maxima nicht von Interesse ist, sondern nur die Stei-

gung weiterverwendet wird, muß dieser Einfluß der beiden Spannungen nicht berücksichtigt werden.



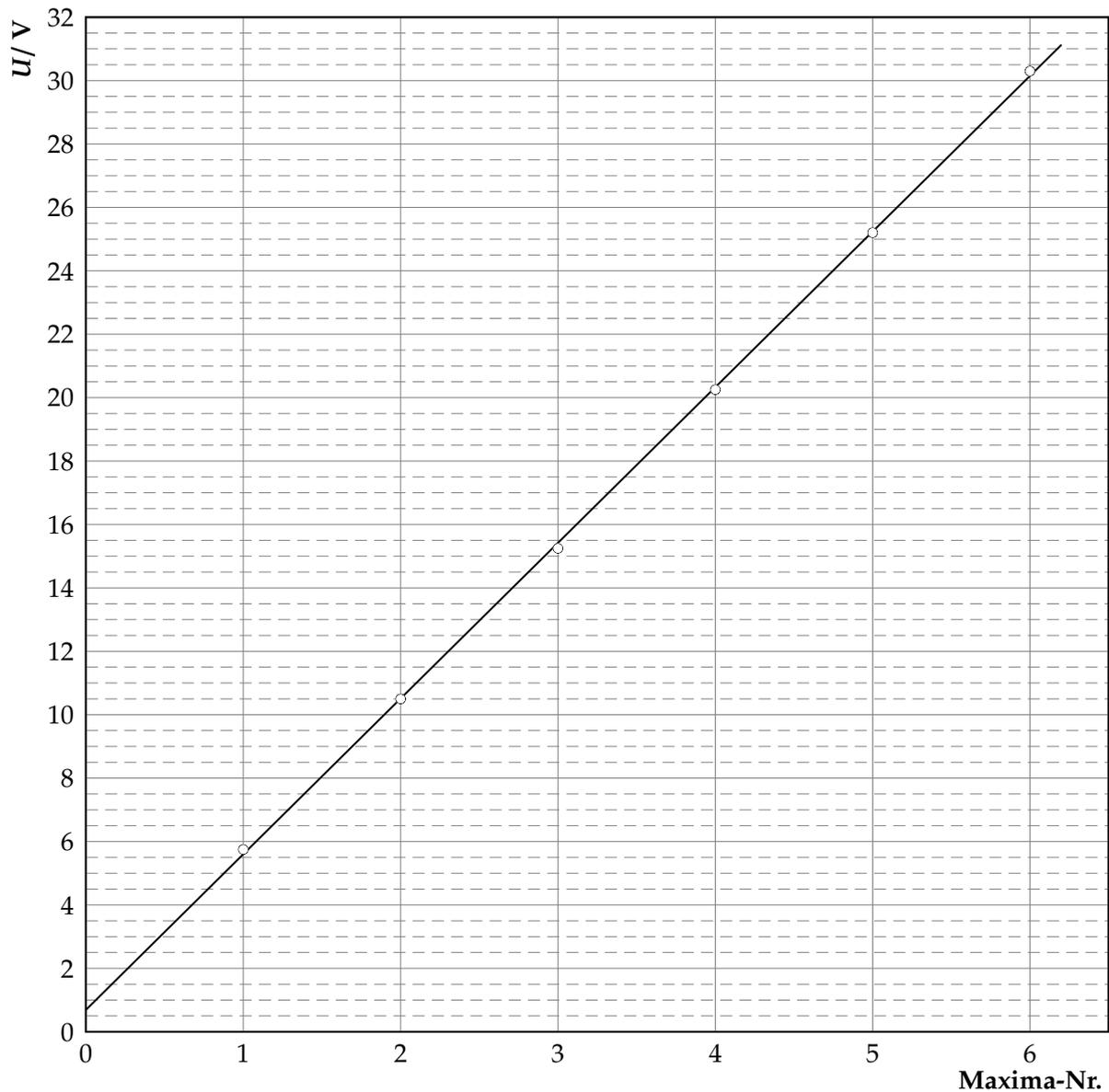
**Abbildung 6:** Auftragung Spannung über Maxima-Nr., 1. Meßreihe

	$a/V$	$\Delta a/V$	$b/V$	$\Delta a/V$	$R/\%$
1. Meßreihe	0,83	0,15	4,89	0,04	99,98
2. Meßreihe	0,69	0,13	4,91	0,03	99,98

**Tabelle 4:** Ermittelte Werte der linearen Regression  $y = a + bx$

Die Steigung der Ausgleichsgeraden  $b$  entspricht der Anregungsenergie  $E$  des 1. über dem Grundzustand von Hg liegenden Niveaus ( $6^3P_1$ ) in eV,  $\Delta b$  entsprechend die Standardabweichung der Anregungsenergie. Der Mittelwert der Anregungsenergie aus beiden Meßreihen läßt sich über eine Gewichtung der Anregungsenergien mit dem reziproken Wert der jeweiligen Varianz  $\Delta E_i^2$  bestimmen:

$$\bar{E} = \frac{w_1 E_1 + w_2 E_2}{w_1 + w_2} = 4,903 \text{ eV} \quad \text{mit} \quad w_i = \Delta E_i^{-2}$$



**Abbildung 7:** Auftragung Spannung über Maxima-Nr., 2. Meßreihe

Die Standardabweichung dieses Mittelwertes wird aus dem Maximalwert von innerer  $s_{\bar{E},int}$  und äußerer  $s_{\bar{E},ext}$  Standardabweichung ermittelt, die wie folgt berechenbar sind:

$$s_{\bar{E},int} = \left( \sum_{i=1}^2 w_i \right)^{-1/2}$$

$$s_{\bar{E},ext} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 (E_i - \bar{E})^2}{\sum_{i=1}^2 w_i}}$$

$$s_{\bar{E}} = \max \{ s_{\bar{E},int}, s_{\bar{E},ext} \}$$

und man erhält  $s_{\bar{E},int} = 0,024 \text{ eV}$ ,  $s_{\bar{E},ext} = 0,010 \text{ eV}$  sowie für  $s_{\bar{E}} = 0,024 \text{ eV}$ .

## 7. Ergebnis und Bewertung

Für die Anregungsenergie des 1. über dem Grundzustand von Hg liegenden Niveaus ( $6^3P_1$ ), konnte eine Energie von  $E = (4,903 \pm 0,024) \text{ eV} = 4,903 \text{ eV}(1 \pm 0,5\%)$  bestimmt werden. Der Literaturwert beträgt  $E = 4,8865021 \text{ eV}$  [RJK<sup>+</sup>07], womit die Abweichung zwischen gemessenen Wert und Literaturwert mit 0,34% sehr gering ausfällt. Innerhalb des Unsicherheitsbereiches stimmen Literaturwert und gemessener Wert überein.

*Anmerkung:* Die hier bestimmte Anregungsenergie ist diejenige vom Niveau  $6^3P_1$ . Zwar liegt das Energieniveau von  $6^3P_0$  mit  $\sim 4,67 \text{ eV}$  unterhalb desjenigen von  $6^3P_1$ , jedoch gibt es zwischen dem Grundzustand  $6^1S_0$  von Quecksilber und  $6^3P_0$  keinen Übergang (siehe auch Abb. 1), so das derjenige Übergang mit dem geringsten Energieniveau eben derjenige von  $6^1S_0$  nach  $6^3P_1$  ist.

## 8. Verwendete Geräte

1. Franck-Hertz-Kontrollgerät
2. Ofen mit Thermostat
3. Franck-Hertz-Rohr (Glasröhre)
4. analoges Vielfachmeßgerät

## Literatur

- [Dem06] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik*. Bd. 2: *Elektrizität und Optik*. 4. Auflage. Berlin – Heidelberg – New York : Springer, 2006. – ISBN 3–540–33794–6
- [GKV86] GERTHSEN, Christian ; KNESER, H.O. ; VOGEL, Helmut ; VOGEL, Prof. Dr. H. (Hrsg.): *Physik*. 15. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg – New York – Tokyo : Springer-Verlag Berlin, 1986. – ISBN 3–540–16155–4
- [KSF<sup>+</sup>04] KEMNITZ, Prof. Dr. E. ; SIMON, Dr. R. ; FISCHEDICK, Arno ; GRUBERT, Dr. L. ; HARTMANN, Dr. A. ; HENNING, Dr. H. ; KAISER, Dr. B. ; KAUSCHKA, Dr. G. ; KLAWITTER, Dr. E. ; LILIENTHAL, Ute ; LINK, Prof. Dr. A. ; MEDEROW, Dr. G. ; MÜLLER, Prof. Dr. S. ; RIEDERER, Dr. C. ; RIEDERER, Dr. U. ; SCHEURELL, Dr. S. ; SCHÖNHERR, Dr. M. ; VOGT, Dr. H. ; KEMNITZ, Prof. Dr. E. (Hrsg.) ; SIMON, Dr. R. (Hrsg.): *Chemie*. 1. Auflage. PAETEC Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, Berlin und Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, 2004 (Duden – Abiturwissen). – 463 S. – ISBN 3–411–00221–2
- [Kuc94] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik*. 14. Auflage. Leipzig-Köln : Fachbuchverlag, 1994. – ISBN 3–343–00858–3
- [Lin93] LINDNER, Helmut: *Physik für Ingenieure*. 14. Auflage. Leipzig-Köln : Fachbuchverlag, 1993. – ISBN 3–343–00772–2
- [Mey06] MEYER, Dirk: *Physikalisches Praktikum für Studierende der Physik / Ruhr-Universität Bochum*. 4. Auflage. 2006. – Versuchsanleitungen
- [RJK<sup>+</sup>07] RALCHENKO, Yu. ; JOU, F.-C. ; KELLEHER, E. ; KRAMIDA, E. ; MUSGROVE, A. ; READER, J. ; WIESE, L. ; OLSEN, K.: *NIST Atomic Spectra Database (Version 3.1.3)*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. "<http://physics.nist.gov/asd3>". Version: 2007. – [Online, Stand 12.11.2007]
- [Tip98] TIPLER, Paul A. ; GERLICH, Dieter (Hrsg.) ; JERKE, Götz (Hrsg.): *Physik*. 2. korrigierter Nachdruck der 1. deutschen Auflage von 1994. Heidelberg - Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 1998. – ISBN 3–86025–122–8

**Liste der Versionen**

<b>Version</b>	<b>Datum</b>	<b>Bearbeiter</b>	<b>Bemerkung</b>
0.9	11.11.2007	Krä	Versuchsvorbereitung
1.0	13.11.2007	Krä	Versuchsdurchführung
1.1	18.11.2007	Krä	Versuchsauswertung

---