Praktikumsprotokoll

Versuch Nr. 601
Der Franck-Hertz-Versuch

Frank Hommes
und
Kilian Klug

Durchgeführt am:
20 Februar 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

2 Theoretische Hintergründe **3**
2.1 Aufbau des Franck-Hertz-Experimentes 3
2.2 Einflüsse auf die Gestalt der Franck-Hertz-Kurve 5

3 Durchführung und Auswertung **7**
3.1 Kurven I_A gegen U_A 7
3.2 Franck-Hertz-Kurve 9
3.3 Ionisierungsprozesse 9

4 Anhang **10**

1 Einleitung

Mit dem Franck-Hertz-Versuch konnte im Jahre 1914 zum ersten mal die Quantennatur der Elektronenhülle eines Atoms, die über die Bohrschen Postulate schon im Jahr zuvor vorhergesagt wurde, bestätigt werden. Zur Strukturaufklärung der Elektronenhülle gibt es zwei Methoden, einerseits die Atomspektroskopie und andererseits Elektronenstoßexperimente. Der Franck-Hertz-Versuch gehört in die zweite Kategorie und mit ihm beschäftigen wir uns.

2 Theoretische Hintergründe

Im Franck-Hertz-Versuch werden monoenergetische Elektronen beschleunigt, um sie zur Wechselwirkung mit Hg-Atomen zu bewirken. Diese besteht aus elastischen und unelastischen Stößen. Bei den elastischen Stößen erfährt das Elektron nur eine, teilweise starke, Richtungsänderung die Energie bleibt jedoch, aufgrund der kleinen Masse des Elektrons im Gegensatz zum Hg-Atom, gleich. Bei dem unelastischen Stoß gibt das Elektron seine Energie an das Hg-Atom gequantelt an, so dass dieses einen angeregten Zustand erfährt. Aus der Energiedifferenz vor und nach den unelastischen Stößen kann man die vom Hg-Atom aufgenommene Energie folgendermaßen berechnen:

$$\frac{m_0 \cdot v_{vor}^2}{2} - \frac{m_0 \cdot v_{nach}^2}{2} = E_1 - E_0,$$

wobei E_1 der erste angeregte Zustand, und E_0 der Grundzustand ist.

2.1 Aufbau des Franck-Hertz-Experimentes

In Abb. 1 ist der Aufbau des Franck-Hertz-Versuches dargestellt. In ein evakuiertes Gefäß wird ein kleiner Tropfen Quecksilber eingebracht. Nachdem sich gemäß der Dampfdruckkurve ein Gleichgewicht eingestellt hat, erhitzt man den Glühdraht, so dass sich aufgrund des sogenannten Glühelektrischen Effekts eine Elektronenwolke um den Draht bildet. Legt man nun eine Beschleunigerspannung U_B an, werden die Elektronen in Richtung der Beschleunigerelektrode beschleunigt. Die Elektronen erhalten dabei folgende kinetische Energie:

$$\frac{m_0 \cdot v_{vor^2}}{2} = e_0 \cdot U_B$$

Zwischen der Beschleunigerelektrode und der Auffängerelektrode befindet sich jedoch wieder eine geringe Gegenspannung, welche nur Elektronen mit folgender

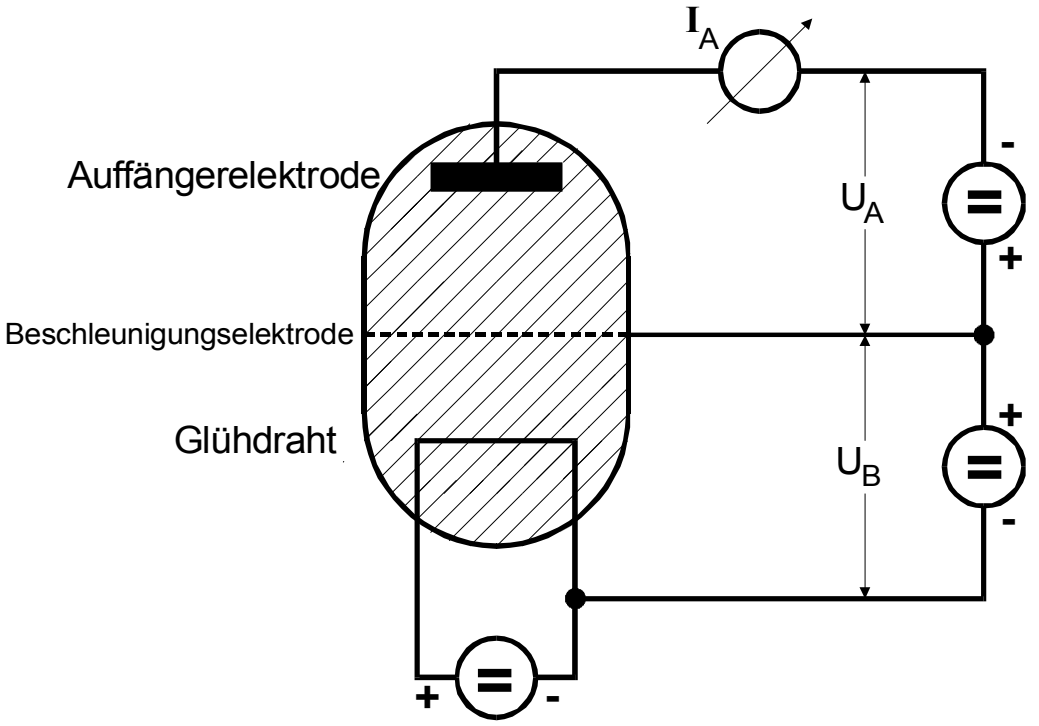


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Franck-Hertz-Versuches

Z-Geschwindigkeitskomponente durchlässt:

$$\frac{m_0 \cdot v_z^2}{2} \geq e_0 U_A$$

Da sich innerhalb des Beschleunigerraums Hg-Atome befinden, stoßen die Elektronen mit ihnen zusammen. Anfänglich gibt es nur elastische Stöße, da die Elektronen noch keinen Energiebetrag von $E_1 - E_0$ besitzt, welchen sie an das Hg-Atom abgeben könnten. Steigert man jedoch U_B, erhalten die Elektronen immer mehr kinetische Energie, bis sie letztlich das Hg-Atom auf seinen 1. angeregten Zustand heben. Danach haben sie die Energie $E - (E_1 - E_0)$ und erreichen nicht mehr die Auffangkathode, wodurch der Auffängerstrom wieder gegen null läuft. Steigert man U_B weiter, wiederholt sich der Prozess wie in Abb. 2 dargestellt. Der Abstand zweier benachbarter Maxima ist gleich dem ersten Anregungspotential:

$$U_1 := \frac{1}{e_0}(E_1 - E_0)$$

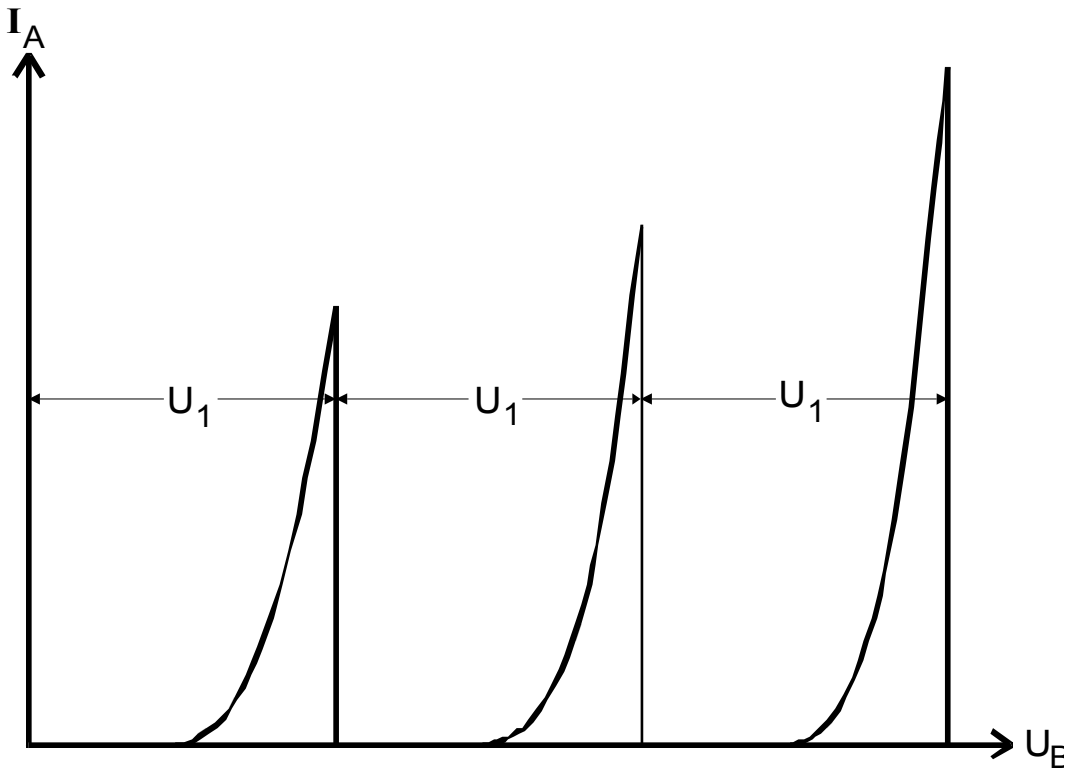


Abbildung 2: Idealer Zusammenhang zwischen I_A und U_B

2.2 Einflüsse auf die Gestalt der Franck-Hertz-Kurve

Da es noch einige weitere Einflüsse auf die Franck-Hertz-Kurve gibt, ist ihre Gestalt nicht ganz so, wie in Abb. 2 dargestellt:

1. Einfluss des Kontaktpotentials
   Das tatsächliche Beschleunigungspotential ist ungleich U_B, da die Austrittsarbeit der Elektronen an beiden Elektroden verschieden ist. Um bei niedrigen Temperaturen schon eine hohe Emission zu erhalten, nimmt man ein Material für den Glühdraht, welches eine niedrigere Austrittarbeit als das Material der Beschleunigungselektrode hat. Die Potentialverhältnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Für das wirkliche Beschleunigungspotential gilt:

$$U_{b,eff} = U_B - \frac{1}{e_0}(\Phi_B - \Phi_G)$$

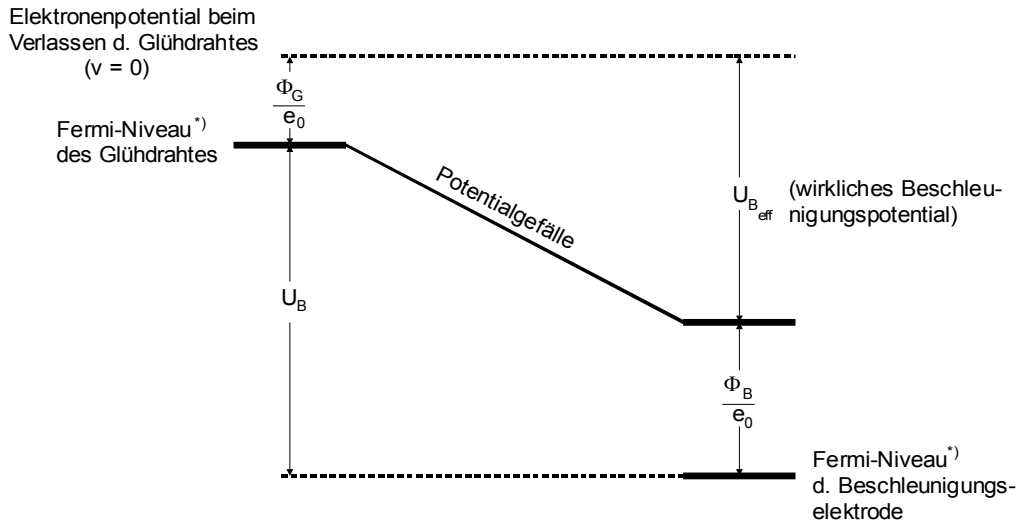


Abbildung 3: Potentialverhältnisse zwischen Glühkathode und Beschleunigerkathode

Das Kontaktpotential ist definiert als:

$$K := \frac{1}{e_0}(\Phi_B - \Phi_G)$$

Dieser Einfluß verschiebt die Franck-Hertz-Kurve um K.

2. Energie-Spektrum der Elektronen
   Das Energie-Spektrum der Elektronen verteilt sich beim Austreten aus dem Draht gemäß der Fermi-Dirac-Verteilung. Dadurch geben nicht alle Elektronen bei gleichem U_B ihre Energie ab, so dass die Kurve ihren Anstieg in der Nähe des Maximums verringert. Weiterhin führen die elastischen Stöße, welche es jederzeit gibt, zu enormen Richtungsänderungen der Elektronen, was sich nicht in der Gestalt der Franck-Hertz-Kurve bemerkbar macht, solange sie im Raum zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode stattfinden. Anders jedoch zwischen Beschleunigungselektrode und Auffängerelektrode. Dort führt dies zu einer merklichen Verteilung der Z-Komponente der Geschwindigkeit, von welcher es abhängt, ob ein Elektron auf die Auffängerelektrode trift. Dies führt zu einer Abflachung und Verbreiterung der Franck-Hertz-Kurve.

3. Dampfdruck
   Ohne Zusammenstöße der Elektronen mit den Hg-Atomen gäbe es keine

Franck-Hertz-Kurve. Diese treten jedoch nur merklich auf, wenn die mittlere freier Weglänge $\overline{w}$ der Atome klein gegen den Abstand a zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode ist. Um eine ausreichende Stoßwahrscheinlichkeit zu erhalten, muss $\overline{w}$ etwa um den Faktor 1000 - 4000 kleiner als a sein.

3 Durchführung und Auswertung

Von vornherein kann man sagen, dass aufgrund des sehr großen Massenunterschiedes zwischen den Elektronen und den Quecksilberatomen der Energieverlust der Elektronen beim zentralen, elastischen Stoß vernachlässigt werden kann da er in der Größenordnung von $1/10^5$ der Energie der Elektronen liegt.

Zunächst sollten der gegebenen Dampfdruckkurve (siehe Abb. 4) die Bedingungen entnommen werden, bei der die mittlere freie Weglänge $\overline{w}$ circa 0,001 cm ist. Hier haben wir T zu 143°C und P_{st} zu 2,9 mbar bestimmt.

3.1 Kurven I_A gegen U_A

Mit dem oben beschriebenen Aufbau sollte dann die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen bestimmt werden. Hier ist zu beachten, dass die Apparatur nur die Elektronen registriert, deren Geschwindigkeitskomponente v_z in Feldrichtung die Ungleichung

$$E_z := \frac{1}{2}mv^2 \geq e_0 U_A$$

erfüllt.

Mit dem XY-Schreiber wurde der Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit von der Bremsspannung U_A bei zwei verschiedenen Temperaturen ($T_1 = 20°C$, $T_2 = 150°C$) aufgenommen (siehe Anhang). Die Beschleunigerspannung U_B wurde auf 11,5 V eingestellt, der maximale so erreichbare Auffängerstrom betrug bei Zimmertemperatur 0,19μA, bei 150°C waren es 1,75 nA.

Aus den Eichungen der Achsen ergeben sich folgende Faktoren:

	T = 20°C	T = 150°C
x-Achse	0,047 $\frac{V}{mm}$	0,026 $\frac{V}{mm}$
y-Achse	1,297 $\frac{nA}{mm}$	0,017 $\frac{nA}{mm}$

Tabelle 1: Skalierungen der ersten beiden Kurven

Um aus den Kurven die gesuchte Anzahl derjenigen Elektronen zu erhalten, deren Energie im Intervall $[E_z, E_z + \Delta E_z]$ liegt, werden einige Wertepaare $I_A(U_A), U_A$ und $I_A(U_A + \Delta U_A), U_A$ abgelesen (siehe Tabelle im Anhang). Als ΔU_A wurde immer 0,5 cm (auf der x-Achse) gewählt.

In zwei Diagrammen (je eins für die beiden Temperaturen) wurde $I_A(U_A) - I_A(U_A + \Delta U_A)$ gegen U_A aufgetragen (siehe Anhang).

Die Anzahl der Elektronen ist per Definition direkt aus der Stromstärke abzulesen, da 1 A gleich 1 Coulomb pro Sekunde ist.

Da hier statt der tatsächlichen Ströme nur Differenzen aufgetragen wurden, spiegelt das entstandene Diagramm die Änderung (|Steigung|) der mit dem xy-Schreiber aufgenommenen Kurve wieder.

Als erstes betrachten wir die Kurve bei 20°C. In dieser ist der Betrag der (negativen) Steigung von Beginn an sehr klein und nimmt dann im letzten Drittel deutlich zu, bis die Kurve recht abrupt fast senkrecht fällt. Das allerletzte Stück ist dann wieder gerade.

Entsprechend verläuft die Kurve des daraus erstellten Diagramms zunächst recht flach um dann stark anzusteigen und am Ende wieder auf null zu fallen. Die hier zu beobachtenden Schwankungen zu Beginn sind durch die unzureichende Ablesegenauigkeit bedingt.

Physikalisch stellt sich eine Erklärung für den Kurvenverlauf (der vom xy-Schreiber aufgenommenen Kurve) wie folgt dar:
Der Auffängerstrom ist zu Beginn (d.h. bei minimaler Bremsspannung) maximal, da die Elektronen kein Hindernis zu überwinden haben. Bei steigender Bremsspannung können immer weniger Elektronen diese überwinden (aufgrund ihrer zu geringen Geschwindigkeit in Feldrichtung). Ab einem bestimmten Punkt (bei 20°C ca 10,5 V, bei 150°C ca. 5,5 V) ist das hindernde Potential groß genug um sämtliche Elektronen aufzuhalten. Der besonders starke Abfall gegen Ende der Kurve ist damit zu erklären, dass die Wahrscheinlichkeit für hohe Geschwindigkeiten schnell stark abnimmt (siehe Fermi-Dirac-Verteilung).

Der Verlauf der Kurve für 150°C sieht etwas anders aus. Hier ist ein kurzes, steiles Stück am Anfang zu sehen, während der Großteil fast gerade verläuft. Am Ende geht auch hier der Strom auf null, jedoch sind alle Änderungen weniger abrupt.

Als erstes ist festzustellen, dass bei höherer Temperatur der Maximalstrom deutlich kleiner ist (1,75 nA im Vergleich zu 190 nA bei 20°C). Dies ist einerseits auf die unelastischen Stöße der Elektronen mit den Atomen des Quecksilberdampfes zurückzuführen, durch die die Energie der Elektronen stark verringert wird. Andererseits spielen auch die elastischen Stöße eine Rolle, da die Elektronen in deren Folge in alle Richtungen (nahezu) gleichwahrscheinlich gestreut werden. Aufgrund dieser Gleichverteilung sind auch alle Geschwindigkeiten in Z-Richtung gleichwahrscheinlich, was die Form des Graphen erklärt.

3.2 Franck-Hertz-Kurve

Im Gegensatz zu den beiden ersten Kurven wurde für die Frank-Hertz-Kurve der Strom I_A gegen die Beschleunigungsspannung U_B aufgetragen (Kurve siehe Anhang).

Aus dem mittleren Abstand $\Delta U = 5,05(\pm 0,07)V$ der 11 aufgezeichneten Maxima ist nach

$$\Delta E = e_0 \cdot \Delta U$$

die erste Anregungsenergie des Quecksilberatoms zu bestimmen (Es wurde der Fehler des Mittelwertes angegeben). Wir haben hier demzufolge 5,05 eV ($\hat{=} 8,09 * 10^{-19}$J) erhalten. Hieraus kann nach

$$h \cdot f = \Delta E$$

die Wellenlänge der beim Übergang in den Grundzustand emittierten Strahlung berechnet werden. Es ergibt sich $\lambda \approx 245,6nm$.

Zudem kann hier das Kontaktpotential bestimmt werden, um das die Frank-Hertz-Kurve nach rechts verschoben ist. Dazu wird die Differenz aus dem mittleren Abstand der Maxima und der Spannung beim ersten Maximum gebildet. So erhält man für das Kontaktpotential K = 1,89 $(\pm 0,10)$[1] V.

Alternativ kann das Kontaktpotential aus dem 20°C-Diagramm bestimmt werden. In diesem ist die Energieverteilung der Elektronen dargestellt. Man erkennt, dass die meisten Elektronen etwa eine Energie von ca. 9,2 eV besitzen. Die Differenz aus der zugehörigen Bremsspannung von 9,2 $(\pm 0,05)$ V und der Beschleunigungsspannung von 11,5 $(\pm 0,1)$ V entspricht dem Kontaktpotential. Nach dieser Methode erhält man einen Wert von 2,3 $(\pm 0,1)$V.

3.3 Ionisierungsprozesse

Um die Ionisierungsspannung von Quecksilber zu erhalten, wurde die vierte Kurve (siehe Anhang) aufgezeichnet. Hier ist bei einer Temperatur von ca. 115°C ebenfalls der Strom I_A gegen die Beschleunigungsspannung U_B aufgetragen. Die Bremsspannung betrug konstant -30 V.

Es wurden mehrere Kurven aufgenommen, um den Bereich, in dem der signifikante Anstieg des Stromes beginnt, etwas genauer darzustellen.

Der Bereich des annähernd geraden Anstiegs der Stromstärke wurde nach unten verlängert, um den Schnittpunkt dieser hypothtischen Geraden mit der x-Achse zu bestimmen. Etwa an dieser Stelle - es wurden von uns 12,84 ($\pm 0,04$) V abgelesen - ist $U_{ion} + K$ angesiedelt (die Ioniesierungsspannung erhöht um das Kontaktpotential K). Wobei wir einen Ablesefehler von 1 mm ($\hat{=}$ 0,04 V)

[1] nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung

angenommen haben. Wird nun noch das bereits oben bestimmte Kontaktpotential subtrahiert ergibt sich für die Ioniesierungsspannung

$$U_{ion} \approx 12,84(\pm 0,04)V - 1,89(\pm 0,10)V \approx 10,9V(\pm 0,11)^{1}.$$

Mit dem k, welches wir aus dem 20°C-Diagramm ermittelt haben, ergibt sich folgendes:

$$12,84(\pm 0,04) - 2,3(\pm 0,1) = 10,5(\pm 0,1)$$

4 Anhang

Maximum (Nr.)	x-achse [cm]	x-achse [V]
1	2.9	6.9
2	4.9	11.7
3	6.9	16.5
4	9	21.5
5	11.1	26.6
6	13.2	31.6
7	15.3	36.6
8	17.5	41.9
9	19.6	46.9
10	21.8	52.2
11	24	57.4

Tabelle 2: Maxima der Franck-Hertz-Kurve

T = 20°C X-Achse (cm)	U_{besch} = 11.5 Y-Achse (cm)	U_{delta} (0.5 cm) X-Achse (cm)	Y-Achse (cm)	T = 20°C X-Achse (U [V])	U_{besch} = 11.5 Y-Achse (I [nA])	X-Achse (U [V])	Y-Achse (I [nA])
1	14.75	1.5	14.70	0.47	189.39	0.71	188.75
2	14.70	2.5	14.60	0.94	188.75	1.18	187.46
3	14.60	3.5	14.50	1.42	187.46	1.65	186.18
4	14.50	4.5	14.45	1.89	186.18	2.12	185.54
5	14.40	5.5	14.40	2.36	184.9	2.59	184.90
6	14.30	6.5	14.30	2.83	183.61	3.07	183.61
7	14.20	7.5	14.20	3.3	182.33	3.54	182.33
8	14.10	8.5	14.05	3.77	181.04	4.01	180.40
9	14.00	9.5	13.90	4.25	179.76	4.48	178.48
10	13.80	10.5	13.70	4.72	177.19	4.95	175.91
11	13.65	11.5	13.55	5.19	175.27	5.42	173.98
12	13.45	12.5	13.30	5.66	172.7	5.90	170.77
13	13.25	13.5	13.10	6.13	170.13	6.37	168.20
14	12.90	14.5	12.75	6.6	165.64	6.84	163.71
15	12.60	15.5	12.40	7.08	161.78	7.31	159.22
16	12.15	16.5	11.90	7.55	156.01	7.78	152.80
17	11.60	17.5	11.25	8.02	148.94	8.25	144.45
18	10.90	18.5	10.40	8.49	139.96	8.73	133.54
19	9.80	19.5	9	8.96	125.83	9.20	115.56
20	7.90	20.5	6.3	9.43	101.44	9.67	80.89
21	2.10	21.5	0.5	9.91	26.96	10.14	6.42
22	0.30	22.5	0.25	10.38	3.85	10.61	3.21

Tabelle 3: Abgelesene Werte aus der 20°C Kurve

Für die erneute Auswertung der Kurven wurden bei der Erstellung der Diagramme folgende Wertepaare benutzt, wobei für ΔU 1 cm gewählt wurde.

X-Achse U	Y-Achse I(U) - I (U+ΔU)V>V [nA]
0,47	0,64
0,94	1,28
1,42	1,28
1,89	1,28
2,36	1,28
2,83	1,28
3,30	1,28
3,77	1,28
4,25	2,57
4,72	1,93
5,19	2,57
5,66	2,57
6,13	,4,50
6,60	3,85
7,075	5,78
7,55	7,06
8,02	8,99
8,49	14,12
8,96	24,40
9,20	74,47
10	6,0

Tabelle 4: neue Wertetabelle für das 20°C Diagramm

y-achse I I (U) - I (U+Delta U) [nA]	x-achse U U [V]
0.64	0.47
1.28	0.94
1.28	1.42
0.64	1.89
0.00	2.36
0.00	2.83
0.00	3.33
0.64	3.77
1.28	4.25
1.28	4.72
1.28	5.19
1.93	5.66
1.93	6.13
1.93	6.60
2.57	7.08
3.21	7.55
4.49	8.02
6.42	8.49
10.27	8.96
20.54	9.20
20.54	9.43
0.64	9.67

Tabelle 5: Wertetabelle für das 20°C Diagramm

X-Achse (cm)	Y-Achse (cm) (cm)	X-Achse(+ΔU) (0.5 cm)	Y-Achse(+ΔU)	X-Achse (U [V])	Y-Achse (I [nA])	X-Achse(+ΔU) (U [V])	Y-Achse(+ΔU) (I [nA])
1	10.3	1.5	9.5	0.26	60.62	0.39	55.91
2	9	2.5	8.6	0.52	52.97	0.65	50.62
3	8.3	3.5	8.1	0.78	48.85	0.91	47.67
4	7.8	4.5	7.6	1.03	45.91	1.16	44.73
5	7.3	5.5	7.1	1.29	42.97	1.42	41.79
6	6.8	6.5	6.5	1.55	40.02	1.68	38.26
7	6.2	7.5	5.9	1.81	36.49	1.94	34.73
8	5.6	8.5	5.4	2.07	32.96	2.2	31.78
9	5.1	9.5	4.7	2.33	30.02	2.46	27.66
10	4.5	10.5	4.3	2.59	26.49	2.72	25.31
11	4.0	11.5	3.7	2.84	23.54	2.97	21.78
12	3.5	12.5	3.2	3.10	20.60	3.23	18.83
13	2.9	13.5	2.6	3.36	17.07	3.49	15.30
14	2.4	14.5	2.2	3.62	14.13	3.75	12.95
15	1.9	15.5	1.7	3.88	11.18	4.01	10.01
16	1.5	16.5	1.3	4.14	8.83	4.27	7.65
17	1.1	17.5	0.9	4.40	6.47	4.53	5.30
18	0.8	18.5	0.6	4.66	4.71	4.78	3.53
19	0.5	19.5	0.5	4.91	2.94	5.04	2.94
20	0.3	20.5	0.3	5.17	1.77	5.30	1.77
21	0.2	21.5	0.2	5.43	1.18	5.56	1.18
22	0.2	22.5	0.2	5.69	1.18	5.82	1.18

Tabelle 6: Abgelesene Werte aus der 150°C Kurve

X-Achse U	Y-Achse I(U) - I (U+ΔU)V>V [nA]
0,26	7,65
0,52	4,12
0,78	2,94
1,03	2,94
1,29	2,94
1,55	3,53
1,81	3,53
2,07	2,94
2,33	3,53
2,59	2,94
2,84	2,94
3,10	3,53
3,36	2,94
3,621	2,94
3,880	2,35
4,14	2,35
4,40	1,77
4,66	1,77
4,91	1,18
5,17	0,59
5,43	0,00
5,69	0,00

Tabelle 7: neue Wertetabelle für das 150°C Diagramm

y-achse I I (U) - I (U+Delta U) [nA]	x-achse U U [V]
4.71	0.26
2.35	0.52
1.18	0.78
1.18	1.03
1.18	1.29
1.77	1.55
1.77	1.81
1.18	2.07
2.35	2.33
1.18	2.59
1.77	2.84
1.77	3.10
1.77	3.36
1.18	3.62
1.18	3.88
1.18	4.14
1.18	4.40
1.18	4.66
0.00	4.91
0.00	5.17
0.00	5.43
0.00	5.69

Tabelle 8: Wertetabelle für das 150°C Diagramm

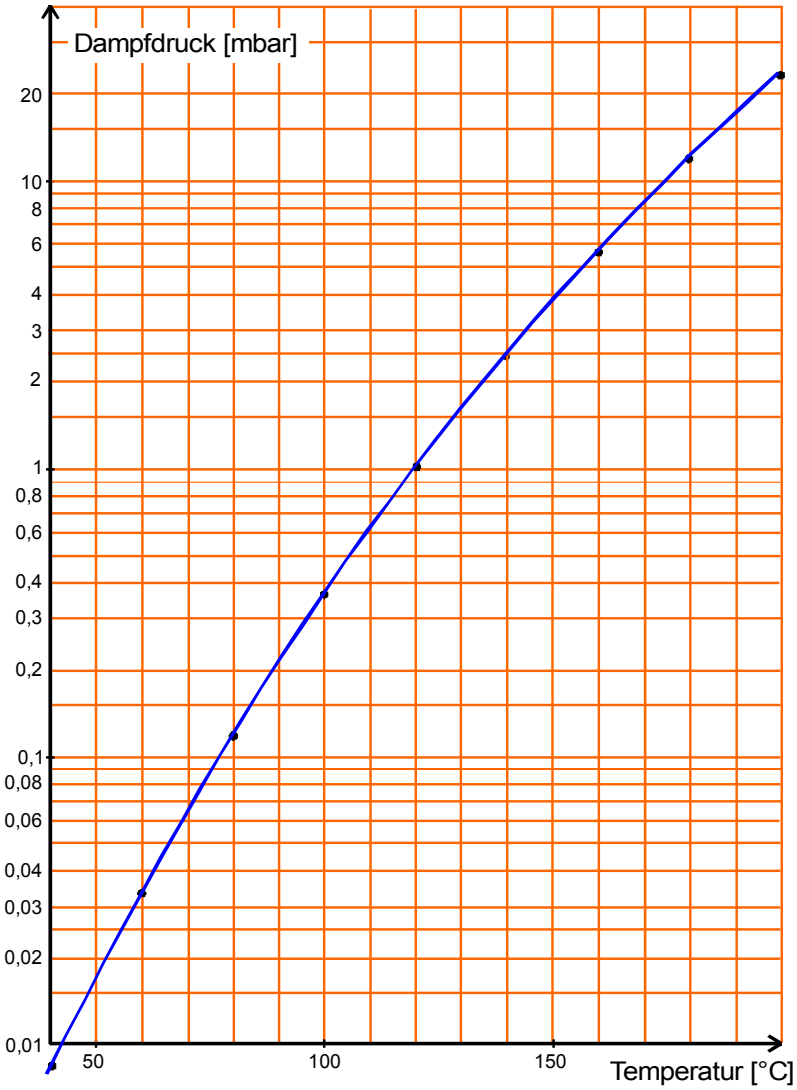


Abbildung 4: Dampfdruckkurve für Quecksilber

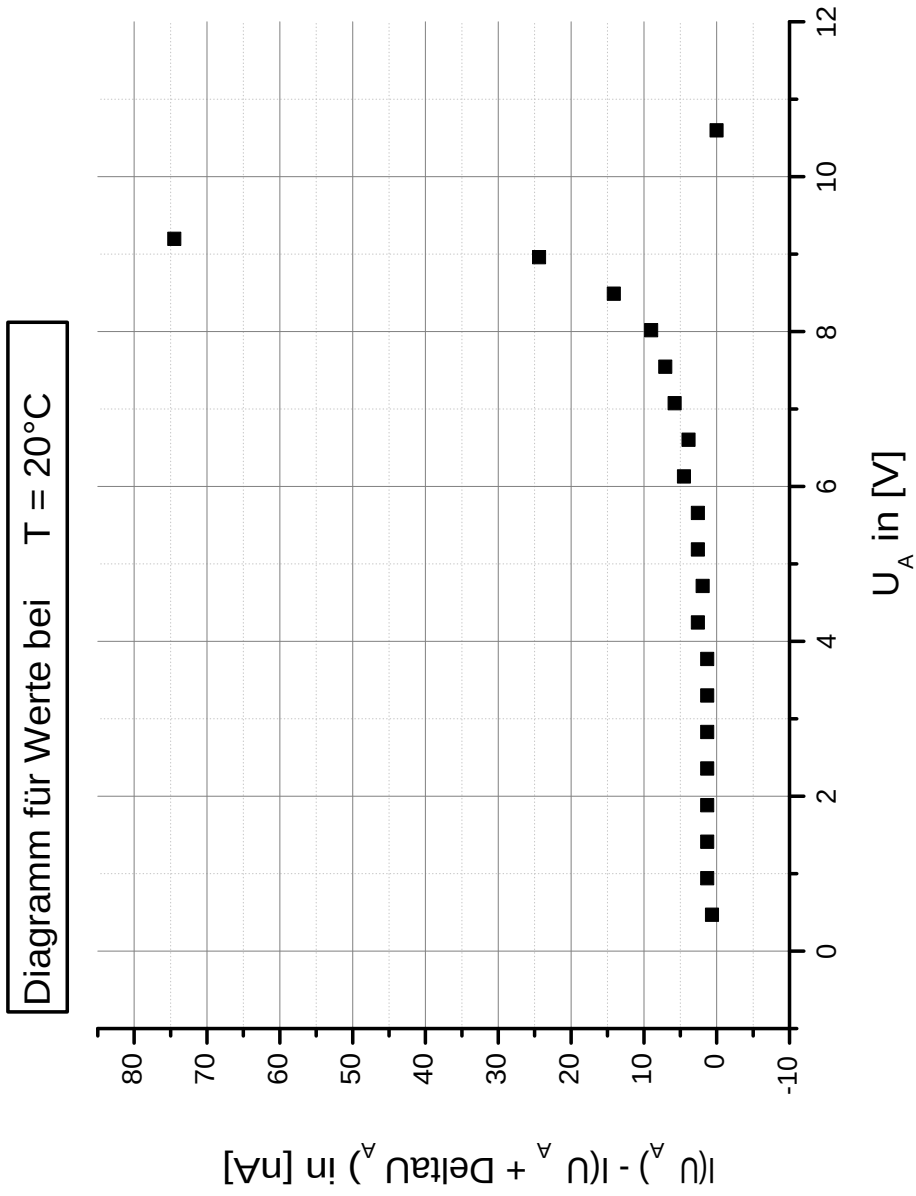


Abbildung 5: Energieverteilung bei 20°C

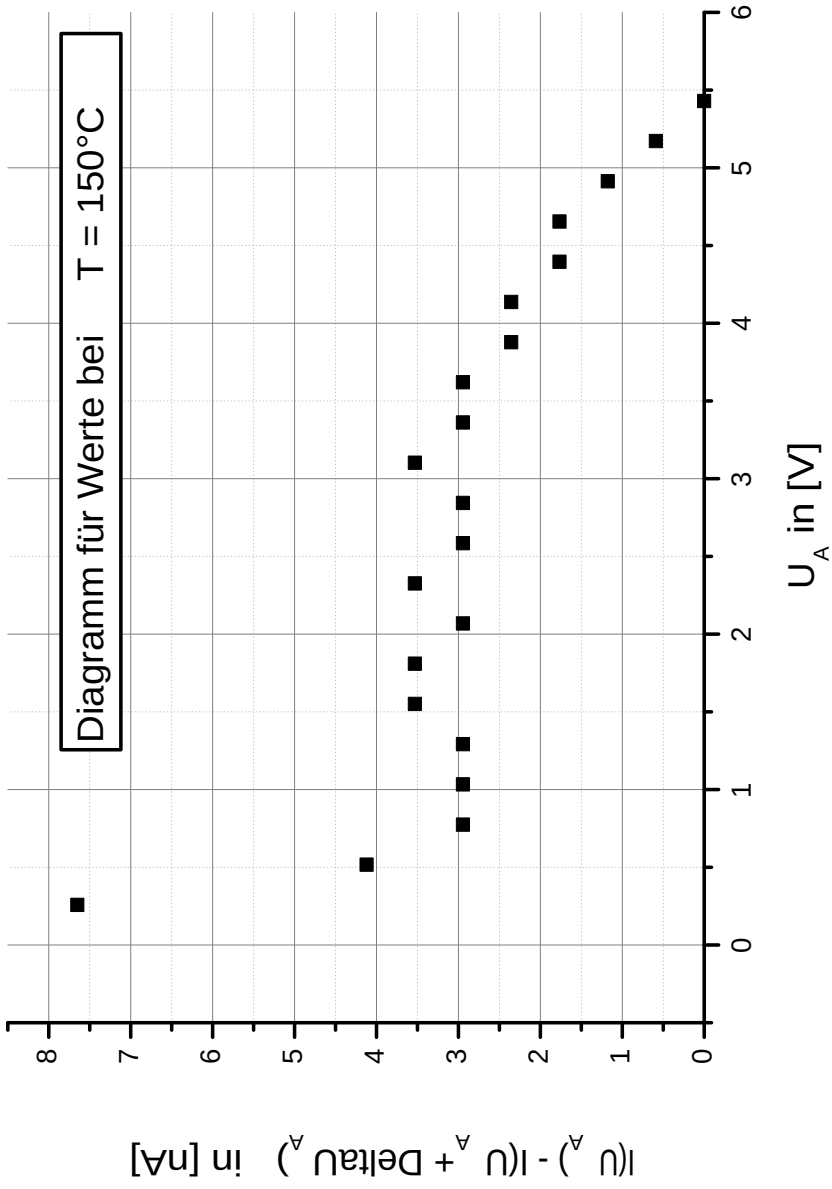


Abbildung 6: Energieverteilung bei 150°C