

# **V607 - Dosimetrie**

Jan Herdieckerhoff  
jan.herdieckerhoff@tu-dortmund.de

Karina Overhoff  
karina.overhoff@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.04.2019, Abgabe: 07.05.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Ionendosis $J$ und Ionendosisrate $j$ . . . . .	3
2.2	Energiedosis $D$ und die mittlere Energiedosisrate $d$ . . . . .	3
2.3	Äquivalenzdosis $H$ . . . . .	4
2.4	Dosisleistung . . . . .	4
2.5	Bestrahlung eines Luftvolumens mit Röntgenstrahlung . . . . .	4
2.6	Ausgleichsrechnung . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1	Messen der Ionendosisrate $j$ und der Energiedosisrate $d$ . . . . .	6
3.2	Messen des Ionenstroms in Abhängigkeit vom Anodenstrom . . . . .	6
3.3	Messen des Ionenstroms in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung	6
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Bestimmung der Ionendosisrate und der Energiedosisrate . . . . .	7
4.2	Ionenstrom als Funktion des Anodenstroms . . . . .	10
4.2.1	Erste Kondensatorspannung . . . . .	10
4.2.2	Zweite Kondensatorspannung . . . . .	11
4.3	Ionenstrom als Funktion der Beschleunigungsspannung . . . . .	12
4.3.1	Erste Kondensatorspannung . . . . .	12
4.3.2	Zweite Kondensatorspannung . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
5.1	Bestimmung der Ionendosisrate und der Energiedosisrate . . . . .	14
5.2	Ionenstrom als Funktion des Anodenstroms . . . . .	15
5.3	Ionenstrom als Funktion der Beschleunigungsspannung . . . . .	15
	<b>Literatur</b>	<b>16</b>

# 1 Ziel

Das Ziel dieses Versuchs ist es die Strahlendosis und die Strahlungsleistung in einem mit Röntgenstrahlung bestrahlten Luftvolumen zu bestimmen.

# 2 Theorie

Die Dosimetrie ist die Lehre von den Verfahren zur Messung der von einem System aufgenommenen Dosis bzw. Dosisleistung. Es wird die mit der ionisierenden Strahlung verbundene Strahlenwirkung gemessen.

## 2.1 Ionendosis $J$ und Ionendosisrate $j$

Mit der Ionisation des bestrahlten Materials geht zumeist eine Absorption von Röntgenstrahlung einher. Die Ionendosis ist durch die in Luft erzeugte Ladung  $dQ$  relativ zur Masse  $dm_L$  der bestrahlten Luft definiert:

$$J = \frac{dQ}{dm_L}.$$

Die Ionendosisrate  $\dot{J}$  entspricht dem zeitlichen Differential der Ionendosis  $J$ , also gilt

$$j = \dot{J} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{dm_L} = \frac{I}{dm_L}. \quad (1)$$

## 2.2 Energiedosis $D$ und die mittlere Energiedosisrate $d$

Die Energiedosis ist das Verhältnis von absorbierter Energie  $dE$  zu der Masse  $dm$  des Absorbers. Sie wird beschrieben durch

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dV}.$$

Dabei ist  $\rho$  die Dichte des Absorbers.

Die Energiedosisrate  $\dot{D}$  ergibt sich im Mittel zu

$$d = \dot{D}_m = \frac{D}{t} = \frac{E}{m \cdot t} = n \cdot \Phi = \frac{j \cdot \Phi}{e}. \quad (2)$$

Dabei ist  $\Phi$  die Ionisationsenergie,  $n$  die Anzahl der Ionen pro Kilogramm und pro Sekunde. Diese ergibt sich zu

$$n = \frac{j}{e},$$

wobei  $e$  der Elementarladung entspricht.

## 2.3 Äquivalenzdosis $H$

Die Wirkung ionisierender Strahlung auf biologische Materie hängt bei gleicher Energiedosis von der Art der ionisierenden Strahlung ab. Dieser Einfluss der Strahlungsenergie und -art auf die biologische Wirkung wird durch den Qualitätsfaktor, den Faktor der relativen biologischen Wirkung, beschrieben. Die Äquivalenzdosis  $H$  kann durch diesen Qualitätsfaktor berechnet werden:

$$H = Q \cdot \frac{dE}{dm} = Q \cdot D.$$

## 2.4 Dosisleistung

Die Dosisleistung ist jeweils die Dosis pro Zeiteinheit. Kurven gleicher Dosisleistung sind sogenannte Isodosen.

## 2.5 Bestrahlung eines Luftvolumens mit Röntgenstrahlung

Wird ein Luftvolumen in einem Plattenkondensator (siehe Abb. 1) mit Röntgenstrahlung bestrahlt und ionisiert, erzeugen die durch den Röntgenstrahl erzeugten Ionen und Elektronen einen Strom. Dieser Strom wächst mit steigender Kondensatorspannung  $U_K$  an bis er den Sättigungsstrom  $I_S$  erreicht. Mithilfe dieses Stroms können die dosimetrischen Größen bestimmt werden.

Das ionisierte Luftvolumen kann folgendermaßen bestimmt werden:

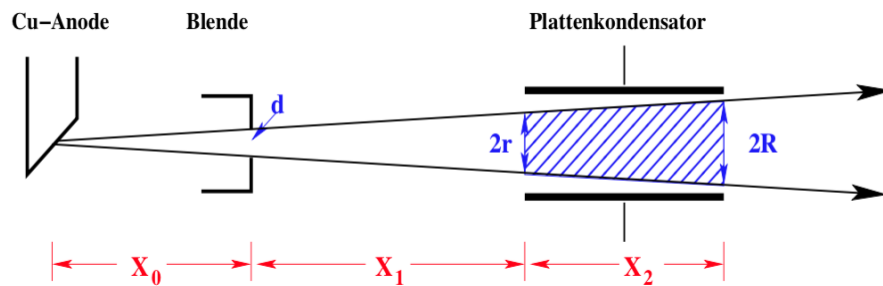
$$V = \frac{1}{3}\pi(R^2(x_0 + x_1 + x_2) - r^2(x_0 + x_1)).$$

Dabei sind die Radien

$$R = \frac{d x_2}{2 x_0}$$
$$r = \frac{d x_1}{2 x_0}.$$

Das Volumen ist also

$$V = \frac{1}{3}\pi \left( \frac{d^2 x_2^2}{4x_0^2}(x_0 + x_1 + x_2) - \frac{d^2 x_1^2}{4x_0^2}(x_0 + x_1) \right). \quad (3)$$



**Abbildung 1:** Es wird die Skizze der Apparatur und ein Strahlengang dargestellt. Links ist eine *Cu*-Anode, in der Mitte eine Blende und rechts ein Plattenkondensator zu sehen. Außerdem ist das bestrahlte Luftvolumen zwischen den Platten des Kondensators blau gekennzeichnet. Die Abstände zwischen den drei Objekten sind unter der Skizze eingezeichnet.[1]

## 2.6 Ausgleichsrechnung

Die Formel für die lineare Regression ergibt sich zu

$$y = a \cdot x + b. \quad (4)$$

Dabei ist  $a$  die Steigung und  $b$  der  $y$ -Achsenabschnitt.

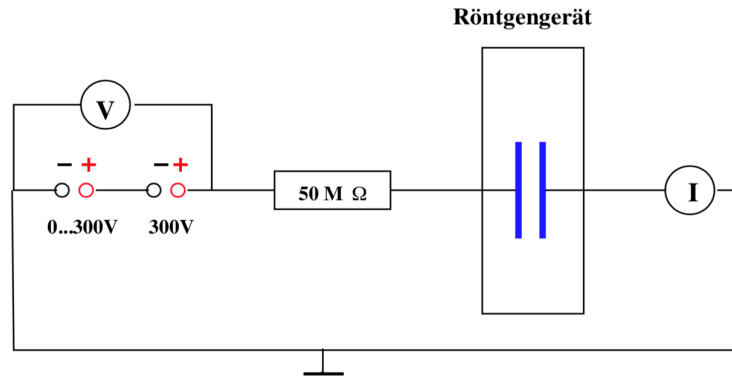
Für die Ausgleichsrechnung einer quadratischen Funktion wird die Formel

$$y = a \cdot x^2 + b \quad (5)$$

benutzt. Dabei ist  $a$  die Amplitude bzw. Stauchung/Streckung und  $b$  der  $y$ -Achsenabschnitt.

## 3 Durchführung

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2 zu sehen.



**Abbildung 2:** Der Versuchsaufbau des Dosimetrie-Versuchs ist hier als Schaltskizze dargestellt. Links gibt es eine Spannungsquelle, in der Mitte befindet sich ein Widerstand, rechts daneben ist ein Röntgengerät eingezeichnet und ganz rechts befindet sich ein Strommessgerät. [1]

### 3.1 Messen der Ionendosisrate $j$ und der Energiedosisrate $d$

Die Röntgenröhre wird auf die Beschleunigungsspannung  $U_B = 25 \text{ kV}$  und einen Emissionsstrom von  $I_A = 1 \text{ mA}$  gestellt. Es werden die Blenden mit einem Durchmesser von  $d_1 = 2 \text{ mm}$  und  $d_2 = 5 \text{ mm}$  verwendet.

Der Kondensatorstrom  $I_K$  wird jeweils in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung  $U_K$  in  $50 \text{ V}$  Schritten gemessen.

### 3.2 Messen des Ionenstroms in Abhängigkeit vom Anodenstrom

Die Röntgenröhre wird wieder auf eine Beschleunigungsspannung von  $U_B = 25 \text{ kV}$  gestellt. Es wird eine Blende mit dem Durchmesser  $d = 5 \text{ mm}$  verwendet. Die Kondensatorspannung wird auf  $U_{K,1} = 500 \text{ V}$  und anschließend auf  $U_{K,2} = 300 \text{ V}$  eingestellt.

Es wird jeweils der Kondensatorstrom  $I_K$  in Abhängigkeit vom Anodenstrom  $I_A$  gemessen. Der Anodenstrom wird zunächst auf  $I_A = 1 \text{ mA}$  gestellt und in  $0,05 \text{ mA}$  Schritten verringert.

### 3.3 Messen des Ionenstroms in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung

Die Röntgenröhre wird auf  $I_A = 1 \text{ mA}$  eingestellt. Es wird eine Blende mit  $d = 5 \text{ mm}$  verwendet. Die Kondensatorspannung  $U_{K,1} = 500 \text{ V}$  bzw.  $U_{K,2} = 300 \text{ V}$  wird eingestellt. Es wird der Kondensatorstrom  $I_K$  in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_B$  gemessen. Dabei wird die Beschleunigungsspannung zunächst auf  $U_B = 35 \text{ kV}$  gestellt und anschließend jeweils um  $5 \text{ kV}$  verringert.

## 4 Auswertung

Für die Auswertung wird Python und im Speziellen Matplotlib [2], SciPy [3], Uncertainties [4] und NumPy [5] verwendet.

Die Werte für die Abstände in Abb. 1 sind

$$\begin{aligned}x_0 &= 83 \text{ mm} \\x_1 &= 67 \text{ mm} \\x_2 &= 100 \text{ mm}.\end{aligned}$$

Die mit Gleichung (3) ermittelten Luftvolumina für die Blendendurchmesser  $d_1 = 2 \text{ mm}$  und  $d_2 = 5 \text{ mm}$  sind

$$\begin{aligned}V_1 &= 27,77 \text{ cm}^3 \\V_2 &= 173,5 \text{ cm}^3.\end{aligned}$$

### 4.1 Bestimmung der Ionendosisrate und der Energiedosisrate

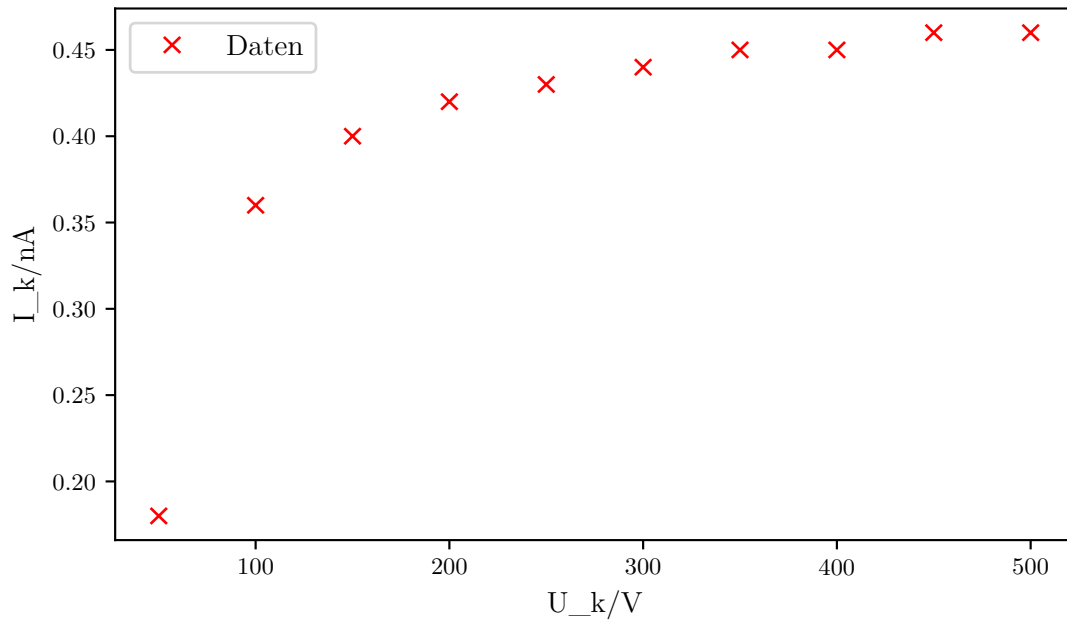
Der Kondensatorstrom  $I_K$  in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung  $U_K$  bei der Blende mit  $d_1 = 2 \text{ mm}$  ist in Tab. 1 und in Fig. 3 dargestellt. Die Werte für die Blende mit  $d_2 = 5 \text{ mm}$  befinden sich in Tab. 2 und sind in Fig. ?? dargestellt worden.

**Tabelle 1:** Die Kathodenspannung und der Kathodenstrom bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 25 \text{ kV}$  und einem Anodenstrom von  $I_A = 1 \text{ mA}$  bei einem Blendenradius von  $r_B = 2 \text{ mm}$ .

$U_K/\text{V}$	$I_K/\text{nA}$
50,00	0,18
100,00	0,36
150,00	0,40
200,00	0,42
250,00	0,43
300,00	0,44
350,00	0,45
400,00	0,45
450,00	0,46
500,00	0,46

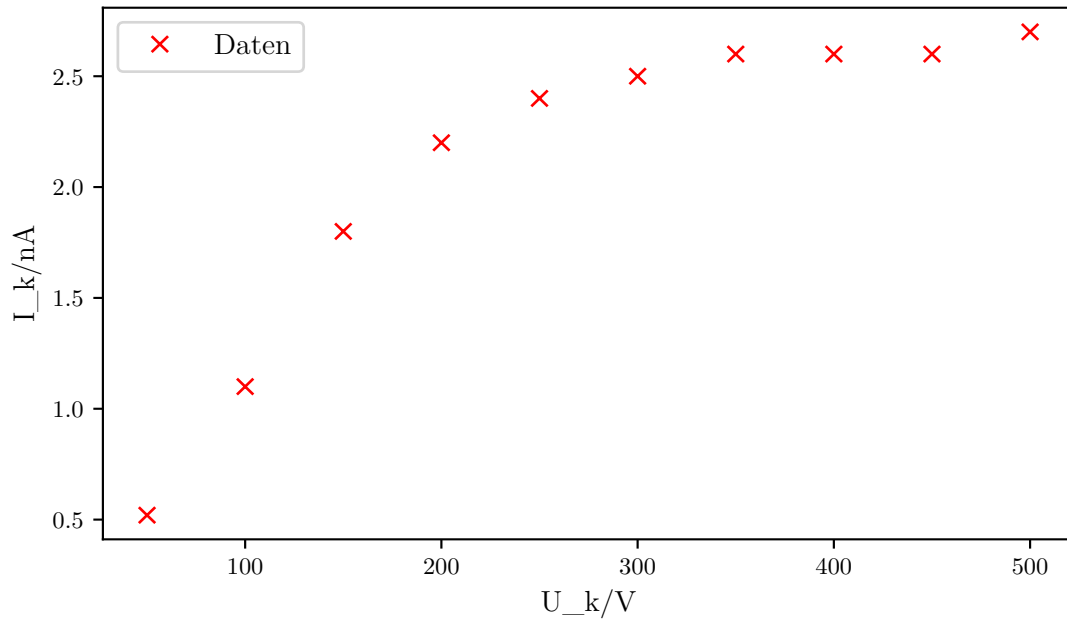
**Tabelle 2:** Die Kathodenspannung und der Kathodenstrom bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_B = 25 \text{ kV}$  und einem Anodenstrom von  $I_A = 1 \text{ mA}$  bei einem Blendenradius von  $r_B = 5 \text{ mm}$ .

$U_K/\text{V}$	$I_K/\text{nA}$
50,00	0,52
100,00	1,10
150,00	1,80
200,00	2,20
250,00	2,40
300,00	2,50
350,00	2,60
400,00	2,60
450,00	2,60
500,00	2,70



**Abbildung 3:** Die Kathodenspannung  $U_K$  und der Kathodenstrom  $I_K$  sind in diesem Plot gegeneinander aufgetragen. Die Beschleunigungsspannung  $U_B$  beträgt  $25 \text{ kV}$ , der Anodenstrom  $I_A$  beträgt  $1 \text{ mA}$ . Der Blendendurchmesser beträgt  $2 \text{ mm}$ .





**Abbildung 4:** Die Kathodenspannung  $U_K$  und der Kathodenstrom  $I_K$  sind in diesem Plot gegeneinander aufgetragen. Die Beschleunigungsspannung  $U_B$  beträgt 25 kV, der Anodenstrom  $I_A$  beträgt 1 mA. Der Blendendurchmesser beträgt 5 mm.

Aus den Sättigungswerten des Kondensatorstroms ergibt sich die Ionendosisrate  $\dot{J}$  und die Energiedosisrate  $\dot{D}$ . Der Sättigungswert für die kleine Blende ergibt sich zu

$$I_{\text{Sättigung, 1}} = 0,45 \text{ nA}.$$

Für die große Blende ergibt sich ein Wert von

$$I_{\text{Sättigung, 2}} = 2,6 \text{ nA}.$$

Somit lässt sich die Ionendosisrate mit Gleichung (1) als die Werte

$$\dot{J}_1 = 1,344 \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}}{\text{kg}}$$

$$\dot{J}_2 = 1,245 \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}}{\text{kg}}$$

bestimmen.

Der Mittelwert ergibt sich damit zu

$$\dot{J}_{\text{mittel}} = (1,29 \pm 0,05) \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}}{\text{kg}}.$$

Die Anzahl der erzeugten Ionen ergibt sich mit Gleichung (2.2) zu

$$n = (8,09 \pm 0,31) \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{kg s}}.$$

Mit dem Wert [6] von

$$\Phi_{\text{Luft}} = 33 \text{ eV} = 52,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

ergibt sich die mittlere Energiedosisrate von

$$\dot{D}_{\text{m}} = (4,27 \pm 0,16) \cdot 10^{-4} \frac{\text{J}}{\text{kg s}}.$$

## 4.2 Ionenstrom als Funktion des Anodenstroms

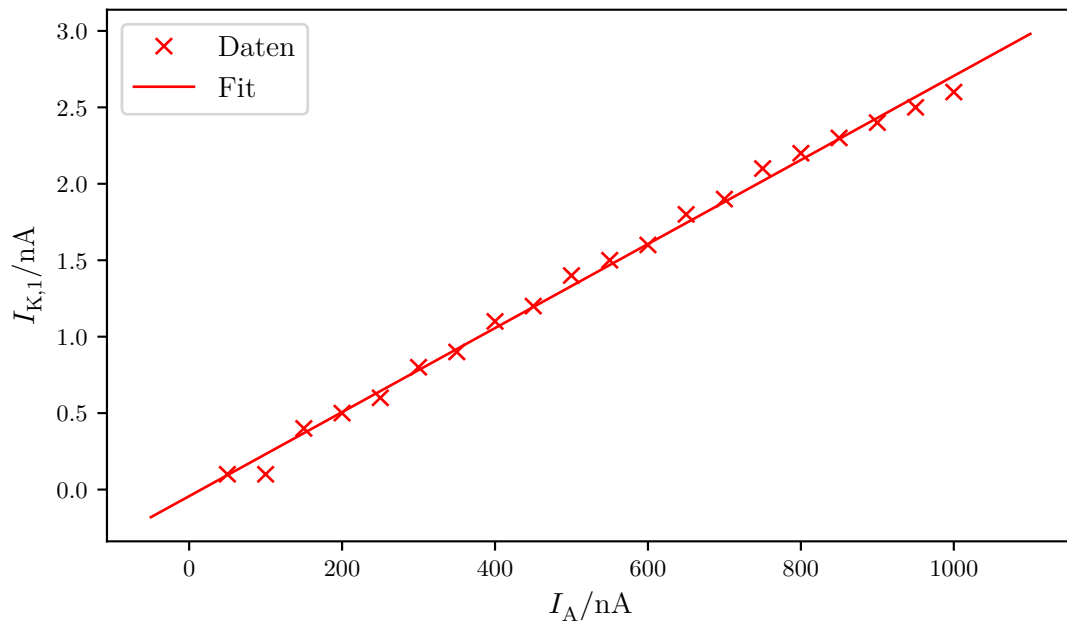
Die Kondensatorströme  $I_{\text{K}}$  in Abhängigkeit vom Anodenstrom  $I_{\text{A}}$  für die beiden Kondensatorspannungen  $U_{\text{K},1} = 500 \text{ V}$  und  $U_{\text{K},2} = 300 \text{ V}$  sind in Tab. 3 eingetragen.

### 4.2.1 Erste Kondensatorspannung

Die  $I_{\text{K}}$ - und  $I_{\text{A}}$ -Werte stehen in Tab. 3 und sind in Abb. 5 aufgetragen.

**Tabelle 3:** Der Anodenstrom und der Kathodenstrom bei einer Beschleunigungsspannung von  $U_{\text{B}} = 25 \text{ kV}$  und einer Kathodenspannung  $U_{\text{K},1} = 500 \text{ V}$  und einer Kathodenspannung  $U_{\text{K},2} = 300 \text{ V}$  bei einem Blendenradius von  $r_{\text{B}} = 5 \text{ mm}$ .

$I_{\text{K}}/\text{mA}$	$I_{\text{K},1}/\text{nA}$	$I_{\text{K},2}/\text{nA}$
1,00	2,60	2,40
0,95	2,50	2,40
0,90	2,40	2,20
0,85	2,30	2,10
0,80	2,20	2,00
0,75	2,10	1,90
0,70	1,90	1,80
0,65	1,80	1,60
0,60	1,60	1,50
0,55	1,50	1,40
0,50	1,40	1,30
0,45	1,20	1,20
0,40	1,10	1,00
0,35	0,90	0,90
0,30	0,80	0,80
0,25	0,60	0,60
0,20	0,50	0,50
0,15	0,40	0,40
0,10	0,10	0,20
0,05	0,10	0,10



**Abbildung 5:** Der Kathodenstrom  $I_K$  und der Anodenstrom  $I_A$  sind gegeneinander aufgetragen. Die Beschleunigungsspannung  $U_B$  beträgt 25 kV. Die Kathodenspannung  $U_K$  beträgt ,500 V. Der Blendendurchmesser ist 5 mm.

Die Parameter, die sich aus der linearen Regression nach Gleichung (4) ergeben, betragen

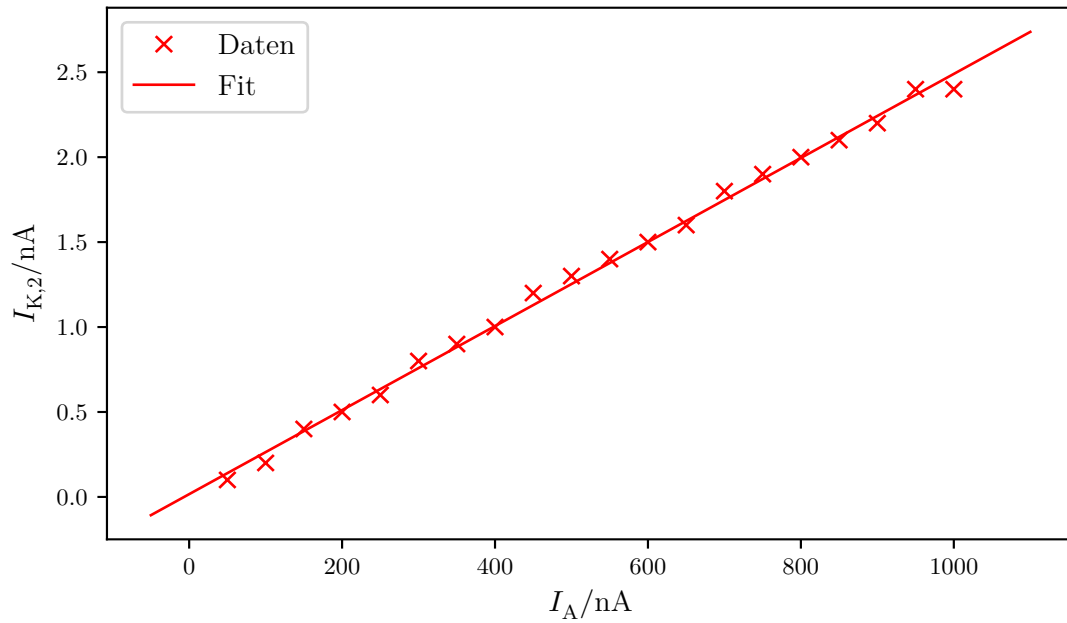
$$a = (27,48 \pm 0,04) \cdot 10^{-4}$$

$$b = -4,32 \cdot 10^{-11} \text{ A},$$

wobei  $a$  die Steigung und  $b$  der  $y$ -Achsenabschnitt ist.

#### 4.2.2 Zweite Kondensatorspannung

Die  $I_K$ - und  $I_A$ -Werte stehen in Tab. 3 und sind in Abb. 6 aufgetragen.



**Abbildung 6:** Der Kathodenstrom  $I_K$  und der Anodenstrom  $I_A$  sind gegeneinander aufgetragen. Die Beschleunigungsspannung  $U_B$  beträgt 25 kV. Die Kathodenspannung  $U_K$  beträgt ,300 V. Der Blendendurchmesser ist 5 mm.

Die Parameter, die sich aus der linearen Regression nach Gleichung (4) ergeben, betragen

$$a = (24,74 \pm 0,03) \cdot 10^{-4}$$

$$b = -1,63 \cdot 10^{-11} \text{ A,}$$

wobei  $a$  die Steigung und  $b$  der  $y$ -Achsenabschnitt ist.

### 4.3 Ionenstrom als Funktion der Beschleunigungsspannung

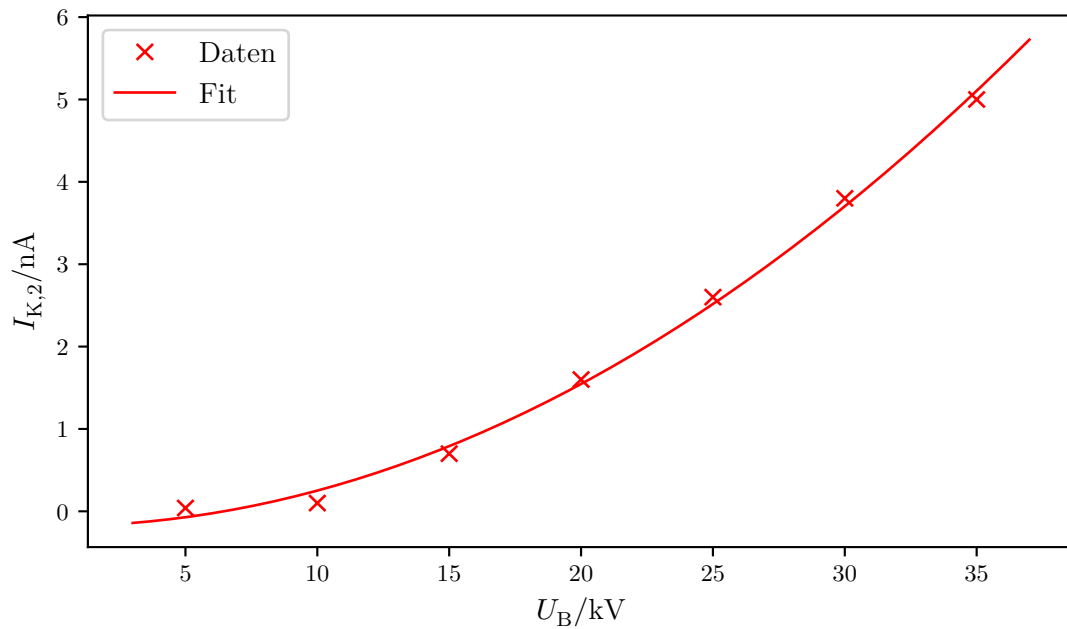
Die Kondensatorströme  $I_K$  in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_B$  für die beiden Kondensatorspannungen  $U_{K,1} = 500 \text{ V}$  und  $U_{K,2} = 300 \text{ V}$  sind in Tab. 4 eingetragen.

#### 4.3.1 Erste Kondensatorspannung

Die  $I_K$ - und  $U_B$ -Werte stehen in Tab. 4 und sind in Abb. 7 aufgetragen.

**Tabelle 4:** Die Beschleunigungsspannung und der Kathodenstrom bei einem Anodenstrom von  $I_A = 1 \text{ mA}$  und einer Kathodenspannung  $U_{K,1} = 500 \text{ V}$  und einer Kathodenspannung  $U_{K,2} = 300 \text{ V}$  bei einem Blendenradius von  $r_B = 5 \text{ mm}$ .

$U_B/\text{mA}$	$I_{K,1}/\text{nA}$	$I_{K,2}/\text{nA}$
35,00	5,00	4,40
30,00	3,80	3,40
25,00	2,60	2,40
20,00	1,60	1,50
15,00	0,70	0,65
10,00	0,10	0,08
5,00	0,04	0,01



**Abbildung 7:** Der Kathodenstrom  $I_K$  und die Beschleunigungsspannung  $U_B$  sind gegeneinander aufgetragen. Der Anodenstrom  $I_A$  beträgt 1 mA. Die Kathodenspannung  $U_K$  beträgt ,500 V. Der Blendendurchmesser ist 5 mm.

Die Parameter, die sich aus der Ausgleichsrechnung nach Gleichung (5) ergeben, betragen

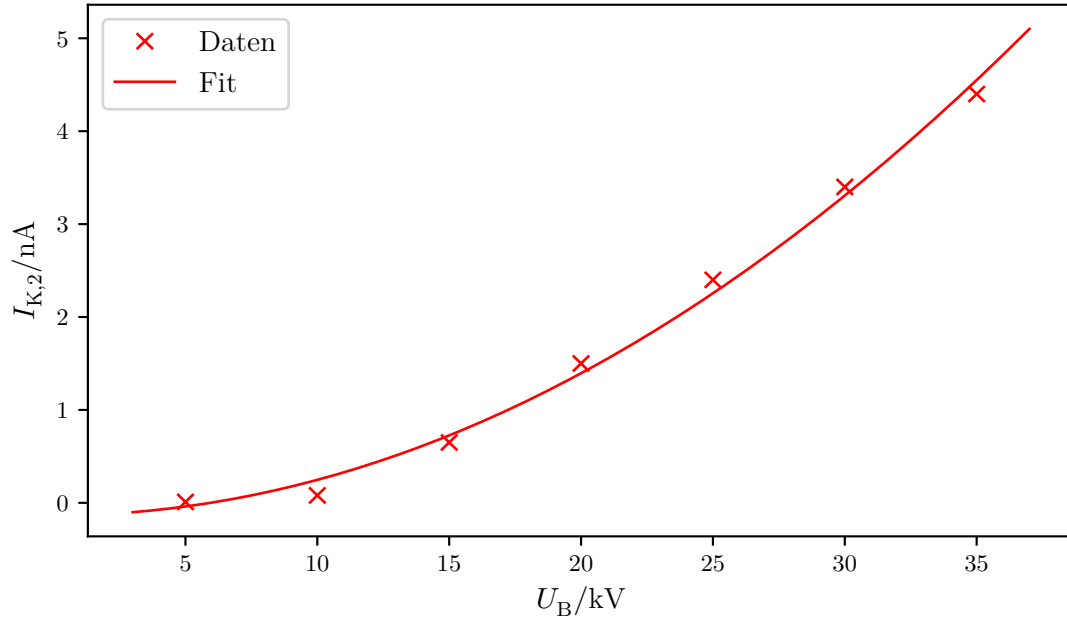
$$a = (4,314 \pm 0,112) \cdot 10^{-18} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

$$b = (-1,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-10} \text{ A},$$

wobei  $a$  die Amplitude und  $b$  der  $y$ -Achsenabschnitt ist.

### 4.3.2 Zweite Kondensatorspannung

Die  $I_K$ - und  $U_B$ -Werte stehen in Tab. 4 und sind in Abb. 8 aufgetragen.



**Abbildung 8:** Der Kathodenstrom  $I_K$  und die Beschleunigungsspannung  $U_B$  sind gegeneinander aufgetragen. Der Anodenstrom  $I_A$  beträgt 1 mA. Die Kathodenspannung  $U_K$  beträgt ,300 V. Der Blendendurchmesser ist 5 mm.

Die Parameter, die sich aus der Ausgleichsrechnung nach Gleichung (5) ergeben, betragen

$$a = (3,825 \pm 0,130) \cdot 10^{-18} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$
$$b = (-1,35 \pm 0,08) \cdot 10^{-10} \text{ A},$$

wobei  $a$  die Amplitude und  $b$  der  $y$ -Achsenabschnitt ist.

## 5 Diskussion

### 5.1 Bestimmung des Ionendosisrate und der Energiedosisrate

Die erste Ionendosisrate weicht von der zweiten um 7,95 % ab. Der relative Fehler der gemittelten Ionendosisrate beträgt 3,88 %. Der relative Fehler der erzeugten Ionen pro Kilogramm pro Sekunde ergibt sich zu 3,83 %. Die Energiedosisrate hat somit einen relativen Fehler von 3,74 %.

## 5.2 Ionenstrom als Funktion des Anodenstroms

Der Fitparameter  $a$  bei der Kondensatorspannung  $U_K = 500 \text{ V}$  hat einen relativen Fehler von 0,15 %. Der Fitparameter  $a$  bei der Kondensatorspannung  $U_K = 300 \text{ V}$  hat einen relativen Fehler von 0,12 %.

Es ist zu erkennen, dass sich der Ionenstrom proportional zum Anodenstrom erhöht.

## 5.3 Ionenstrom als Funktion der Beschleunigungsspannung

Der Fitparameter  $a$  bei der Kondensatorspannung  $U_K = 500 \text{ V}$  hat einen relativen Fehler von 2,60 %. Der Fitparameter  $a$  bei der Kondensatorspannung  $U_K = 300 \text{ V}$  hat einen relativen Fehler von 3,40 %.

Es ist zu erkennen, dass sich der Ionenstrom proportional zum Quadrat der Beschleunigungsspannung erhöht.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch 607 - Dosimetrie*. 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/Dosimetrie.pdf>.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. „SciPy: Open source scientific tools for Python“. Version 0.16.0. In: (). URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. „Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties“. Version 2.4.6.1. In: (). URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [6] „X-ray dosimetry“. In: (2019). URL: [http://www.phywe-es.com/index.php/fuseaction/download/lrn\\_file/versuchsanleitungen/P2541801/e/P2541801E.pdf](http://www.phywe-es.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/versuchsanleitungen/P2541801/e/P2541801E.pdf).