
Dosimetrie (DO)

Klaus Steiniger, Alexander Wagner, Gruppe 850

klaus.steiniger@physik.tu-dresden.de, alexander.wagner@physik.tu-dresden.de

Betreuer: Frank Seifert

Protokoll vom 12. Mai 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Exponentielles Schwächungsgesetz	2
1.2	Das Abstandsquadratgesetz	3
2	Durchführung	3
2.1	Aufgabenstellung	3
2.2	Messungen zum Abstandsquadratgesetz	3
2.3	Exponentielles Schwächungsgesetz an einer ^{55}Fe und einer ^{244}Cm Quelle	4
2.4	Kalibrierung des BeOmax Systems	4
2.5	Überprüfung auf Linearität	4
2.6	Messungen mit dem Schulröntgengerät	4
3	Auswertung	4
3.1	Messungen zum Abstandsquadratgesetz an einer ^{241}Am und ^{244}Cm Quelle	4
3.1.1	Fazit	7
3.2	Exponentielles Schwächungsgesetz an einer ^{55}Fe und einer ^{244}Cm Quelle	8
3.2.1	^{244}Cm Quelle	8
3.2.2	^{55}Fe Quelle	9
3.2.3	Fazit	11
3.3	Überprüfung auf Linearität des Verfahrens	11
3.4	Messungen mit dem Schulröntgengerät	12
3.4.1	Abstandsquadratgesetz	12
3.4.2	Exponentielles Schwächungsgesetz	13

1 Einleitung

Strahlungsfelder sind charakterisiert durch ihren Fluss ϕ .

$$\phi = \frac{d^2N}{dA_{\perp} \cdot dt} \quad (1.1)$$

Auf ähnliche Weise definiert man eine Energiedichte ψ und dazu eine Energiefluenz Ψ .

$$\psi = \frac{d^2W}{dA_{\perp} \cdot dt} \quad (1.2)$$

$$\Psi = \int dt \cdot \psi = \frac{dW}{dA_{\perp}} \quad (1.3)$$

Um ein Maß für die Schädigung von Materialien durch Strahlung zu erhalten, definiert man eine Dosis D für die deponierte Energiemenge.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (1.4)$$

In diesem Versuch war es nun die Aufgabe, verschiedene Abhängigkeiten der Dosis zu ermitteln bzw. zu überprüfen.

1.1 Exponentielles Schwächungsgesetz

Um herauszufinden, wie sich die Menge der deponierten Energie beim Durchgang von Strahlung durch ein Material ändert (also die Änderung der Dosis), macht man einen linearen Ansatz für die Abschwächung der Energiefluenz.

$$\frac{d\Psi}{dx} = -\mu_E \Psi \quad (1.5)$$

Wobei $\mu_E > 0$. Mit der Überlegung, dass die im Material deponierte Energie gerade dem Verlust der Energiefluenz entspricht $\Delta E = -\Delta\Psi$, folgt für die Dosis aus der allgemeinen Definition (1.4)

$$\begin{aligned} D &= \frac{dE}{dm} = \frac{dE}{\rho dV} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\Psi}{dx} \\ D &= \frac{\mu_E}{\rho} \Psi \end{aligned} \quad (1.6)$$

Dabei ist μ_E/ρ der Massenabsorptionskoeffizient. Damit können wir die Änderung der Dosis in einem Material bestimmen. Es ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dx} &= \frac{d}{dx} \left(\frac{\mu_E}{\rho} \Psi \right) \\ &= \frac{\mu_E}{\rho} \frac{d\Psi}{dx} \\ \frac{dD}{dx} &= -\mu_E D \end{aligned}$$

Lösen dieser DGL offenbart die exponentielle Abschwächung der Dosis beim Durchgang durch ein Material.

$$D = D_0 e^{-\mu_E \cdot x} = D_0 e^{\frac{\mu_E}{\rho} m_F} \quad (1.7)$$

1.2 Das Abstandsquadratgesetz

Betrachtet man zunächst den Energiefluss der von einer punktförmigen Quelle ausgeht, so sollte dieser in verschiedenen Abständen d durch eine Kugeloberfläche konstant sein.

$$\int d\Omega \cdot d^2\psi = \text{const.}$$

Es folgt also, dass der Energiefluss ψ und somit auch die Energiefluenz Ψ direkt proportional zu $1/d^2$ ist.

Auf der anderen Seite ist die Dosis über die Energiefluenz definiert durch (1.6)

$$D = \frac{\mu_E}{\rho} \Psi$$

Damit ergibt, sich bei konstanten μ_E/ρ , eine Abhängigkeit der Dosis vom Abstand d zu einer Punktquelle der Form

$$D \propto \frac{1}{d^2} \quad (1.8)$$

2 Durchführung

2.1 Aufgabenstellung

1. Durchführung von Strahlenschutzkontrollmessungen
2. Messungen zum Abstandsquadratgesetz an einer ^{241}Am und einer ^{244}Cm Quelle
3. Messungen zum Exponentiellen Schwächungsgesetz an einer ^{55}Fe und einer ^{244}Cm Quelle
4. Kalibrierung des *BeOmax* Systems
5. Überprüfung auf Linearität des Intensitäts/Dosis-Verhältnisses
6. Messungen zum Abstandsquadrat- und Exponentiellen Schwächungsgesetz in einem Schulröntgengerät

2.2 Messungen zum Abstandsquadratgesetz

Mithilfe einer bemaßten Metallschiene (Stahlmaß, 2m Gesamtlänge), einem fest installierten GMZ und einer beweglichen Probenhalterung wurden Messungen hinsichtlich der Abhängigkeit der Dosisleistung vom Abstand durchgeführt. Die Untergrundmessung lief über 20 Minuten und ergab eine mittlere Rate von 25 min^{-1} . Hierbei wurde die Distanz immer um 10 cm variiert und dann eine Zählmessung von 10 mal einer Minute durchgeführt. Die exakte Messung des Abstandes ist schwierig, da der Detektor eine gewisse Ausdehnung besitzt und die Probe innerhalb der Abschirmung nicht genau lokalisierbar ist. Folglich muss der Abstand unter der Annahme, dass die $1/r^2$ -Abhängigkeit vorliegt, aus dem Fit bestimmt werden. Die gemessenen Abstände sind dennoch bis auf ein unbekanntes Offset repräsentativ für den tatsächlichen.

Da die Messwerte nicht allein die erwartete Abhängigkeit, sondern darüber hinaus eine Sättigung des GMZ durch die Totzeit anzeigten, wurde weiterhin eine vergleichbare Messung mit einem tragbaren elektronischen Dosimeter mit direkter Messung durchgeführt. Dazu wurde das Messgerät zusammen mit einem Unterbau auf die Metallschiene gelegt, dies erschwerte eine Bestimmung der genauen Detektorposition zusätzlich. Auch hier muss der exakte Abstand aus der Fitkurve bestimmt werden. Im Gegensatz zur Messung mit dem GMZ wurden hier allerdings nur die direkten Ablesewerte vom Stahlmaß aufgenommen, wobei größere Messwerte eine Annäherung an die Quelle beschreiben. Für die Untergrundmessung wurden mit fertig positioniertem Dosimeter 18 zufällig abgelesene Dosisleistungen notiert und der Durchschnitt gebildet.

2.3 Exponentiellen Schwächungsgesetz an einer ^{55}Fe und einer ^{244}Cm Quelle

Die Intensitäten wurden mit einem Halbleiterdetektor gemessen. Zwischen Quelle und Detektor wurden Aluminiumplättchen verschiedener Dicke eingeschoben. Zuvor musste jedoch die Untergrundstrahlung gemessen und von den eigentlichen Messwerten abgezogen werden. Den Versuch wiederholten wir anschließend für Papier statt Aluminium.

2.4 Kalibrierung des BeOmax Systems

Für die Kalibration wird ein BeO Plättchen mit bekannter Dosis benötigt. Das Auswertesystem ordnet dann bei bekanntem Ansprechvermögen ε der Intensität des Lumineszenzlichtes eine Dosis zu.

Die Dosis wurde mit einer ^{90}Sr Quelle mit einer Dosisleistung von $(50 \pm 3) \mu\text{Gr}/\text{min}$ aufgebracht. Als Bestrahlungsdauer wählten wir 5 Minuten.

2.5 Überprüfung auf Linearität

Im nächsten Schritt haben wir ein Plättchen verschieden lange in der ^{90}Sr Quelle bestrahlt. Die errechneten Dosis haben wir dann über der Intensität des Lumineszenzlichtes aufgetragen und auf Linearität geprüft.

2.6 Messungen mit dem Schulröntgengerät

In einem Schulröntgengerät wurde die Intensität von Bremsstrahlung mit BeO-Detektoren ermittelt. Zuerst wurde die Dosis in Abhängigkeit des Abstandes von der Quelle und danach bei gleichbleibendem Abstand hinter verschieden Dicken Aluminiumplatten aufgezeichnet. Die Messung für verschiedene Dicken wurde für zwei verschiedene Beschleunigungsspannungen durchgeführt (20; 30 kV).

3 Auswertung

3.1 Messungen zum Abstandsquadratgesetz an einer ^{241}Am und ^{244}Cm Quelle

Zwecks einfacherer Schreibweise definieren wir vorerst für alle nachfolgenden Angaben von Messwerten und Fitparametern

$$n(x) = \dot{N}(x) = \frac{dN}{dt}(x)$$
$$h(x) = \dot{H}(x) = \frac{dH}{dt}(x)$$

wobei N die Ereigniszahl der Zählmessung und H die Äquivalent-Dosis meint. $n(x)$ steht demnach für die Zählrate und $h(x)$ für die Äquivalent-Dosisleistung.

Wie in Tabelle 1 und Abbildung 2 ersichtlich ($n := \frac{dN}{dt}$), überwiegt bei dem Geiger-Müller-Zähler ab etwa 3000...3500 Counts/min die Sättigung, d.h. die mittlere Zeit zwischen zwei Pulsen ist kleiner als die Totzeit des Zählrohrs. Für die Auswertung muss der Sättigungsbereich vernachlässigt werden, was im Detail kaum exakt machbar erscheint, da die Zählung von zwei oder mehr Pulsen in kurzer Folge als ein Ereignis praktisch bei jeder Zählrate auftritt, nur eben bei höheren Frequenzen sehr viel wahrscheinlicher wird. Da die konkrete Totzeit ebenfalls unbekannt ist, kann auch hier keine Korrekturformel angesetzt werden.

Für die Festlegung des Sättigungsbereiches wurden die Messreihen numerisch differenziert (siehe Abbildung 1) und der Wendepunkte nach dem Maximum als Grenze definiert - alle

Messstrecke [cm]	$n(^{241}\text{Am})$ [min^{-1}]	$n(^{244}\text{Cm})$ [min^{-1}]
177,5	578	577
167,5	587	660
157,5	718	823
147,5	822	985
137,5	941	1140
127,5	1141	1245
117,5	1435	1612
107,5	1638	1921
97,5	2100	2312
87,5	2494	2866
77,5	2882	3375
67,5	3249	3975
57,5	3722	4575
47,5	3901	4567
37,5	3816	3885
27,5	2901	2197
17,5	1101	2112

Tabelle 1: Distanzabhängigkeit der Zählraten für ^{241}Am und ^{244}Cm (GMZ)

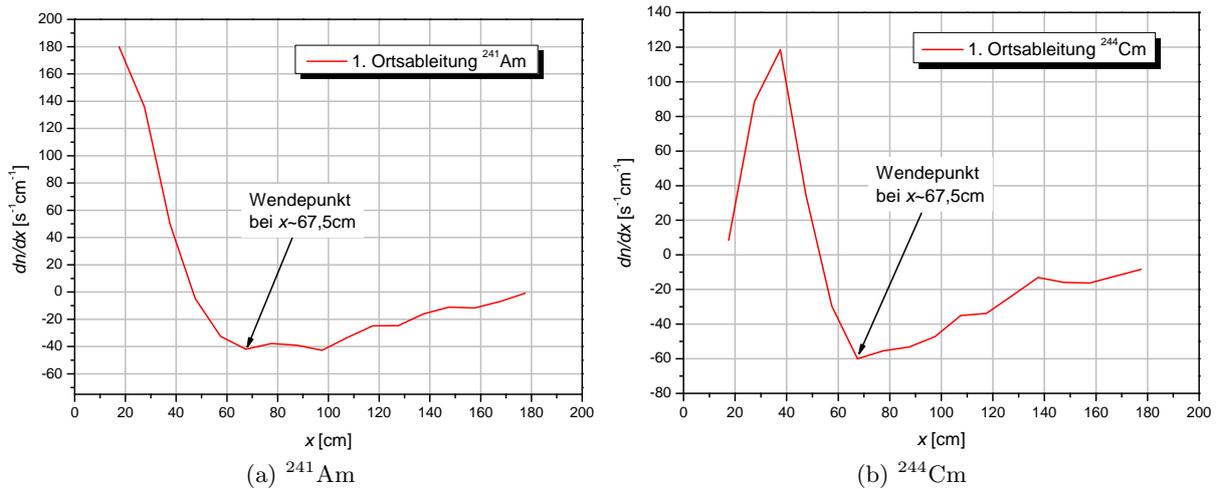


Abbildung 1: Erste Ortsableitung der Zählraten

nachfolgenden Werte wurden anschließend über folgenden Ansatz mit gefittet:

$$n(x) = n_0 + \frac{n^*}{(x - x_0)^2}$$

Es ergaben sich hierbei die Parameterwerte aus Tabelle 2.

n_0 entspricht als fest eingestellter Offset der ermittelten Untergrundzählrate von 25 min^{-1} . n^* skaliert nur auf die Zählraten, der Wert x_0 korrigiert den gemessenen Abstand Quelle-Detektor, so dass jetzt unter Voraussetzung der $1/r^2$ -Abhängigkeit nachträglich der tatsächliche Abstand berechnet werden könnte. Wir verzichten darauf, weil die Werte für x_0 innerhalb ihres Standardfehlers Null sind.

Mithilfe der Fitkurven kann nun im Bereich der beginnenden Sättigung die Totzeitkorrektur-

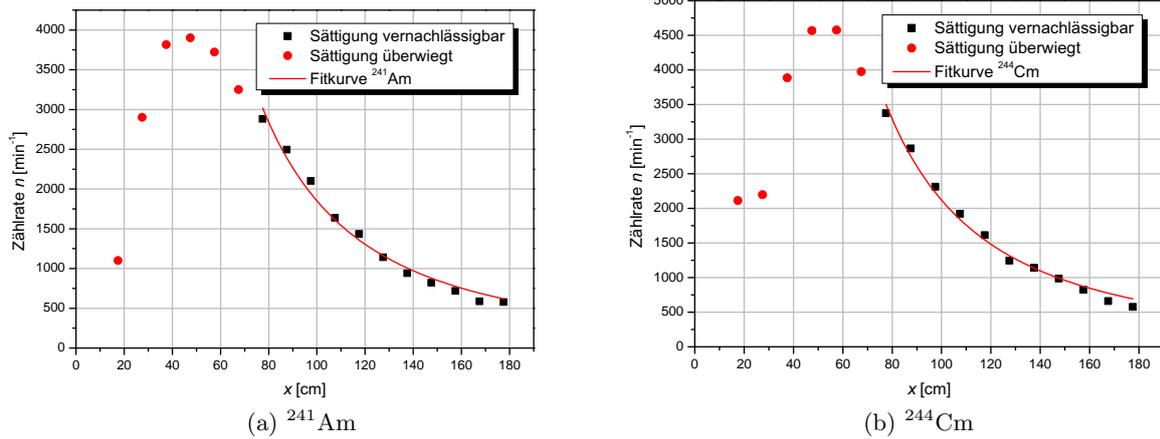


Abbildung 2: Ereigniszahlen bei geschätztem Abstand

Fitparameter	^{241}Am	^{244}Cm
n_0	$(25 \pm 1, 1)\text{min}^{-1}$	$(25 \pm 1, 1)\text{min}^{-1}$
n^*	$(19, 3 \pm 1, 86) \cdot 10^6\text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^2$	$(21, 2 \pm 1, 73) \cdot 10^6\text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^2$
x_0	$(-2, 8 \pm 4, 6)\text{cm}$	$(-0, 6 \pm 3, 8)\text{cm}$

Tabelle 2: Fitparameter für ^{241}Am und ^{244}Cm (GMZ)

formel angesetzt werden:

$$n_{real} = \frac{n_{mess}}{1 - \tau \cdot n_{mess}} \quad \Rightarrow \quad \tau = \frac{1}{n_{mess}} - \frac{1}{n_{real}}$$

was wiederum die Abschätzung der Totzeit ermöglicht. Dies liefert im relevanten Bereich Werte von etwa $10^{-5} \dots 10^{-4}\text{min}$ bzw. 10^{-3}s , was durchaus relativistisch erscheint.

Messtrecke [cm]	$dH/dt [\mu\text{Sv/h}]$
20	16,34517
30	18,64517
40	21,74517
50	25,44517
60	30,54517
70	37,04517
80	46,34517
90	58,94517
100	78,64517
110	107,64517
120	157,64517
130	253,64517
140	477,64517
145	719,64517
150	1219,64517
155	2419,64517

Tabelle 3: Messung der Äquivalent-Dosisleistung für ^{241}Am

Die Messung mit dem mobilen Dosimeter liefert Werte ohne jeden Anschein einer Sättigung

(siehe Tabelle 3) bei gleichzeitig um mehrere Größenordnungen höheren Zählraten (lt. Anzeige). In Abbildung 3 erkennt man anhand der Übereinstimmung mit der Fitkurve die hohe Genauigkeit der Messung. Die x -Werte sind hier allerdings die direkten Ablesewerte von der Stahlschiene, es gilt für den Abstand $r = x_0 - x$.

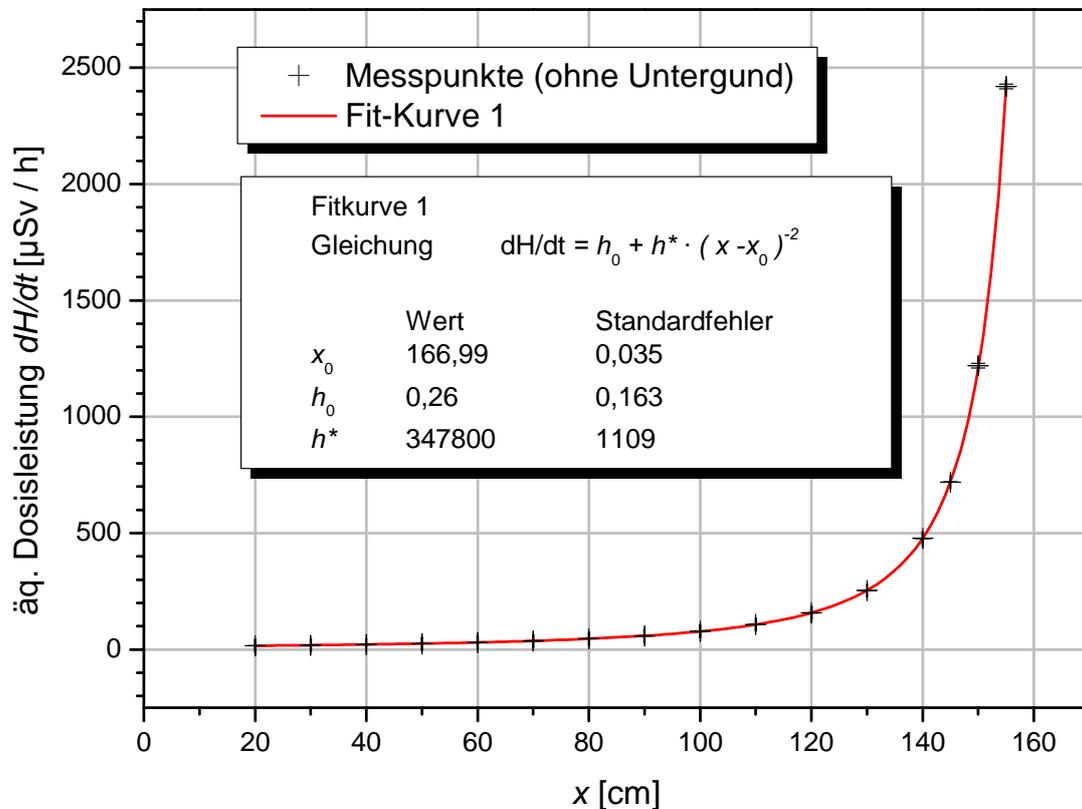


Abbildung 3: Messung der Äquivalent-Dosisleistung für ^{241}Am

Die Fitparameter sind hierbei:

$$h_0 = (0,26 \pm 0,163)\mu\text{Sv/h}$$

$$h^* = (347800 \pm 1109)\mu\text{Sv/h} \cdot \text{cm}^2$$

$$x_0 = (166,99 \pm 0,035)\text{cm}$$

Um eine höhere Präzision der Ausgleichskurve zu erzielen, wurde trotz des bereits global abgezogenen Untergrundes von $(355 \pm 21)\text{nSv/h}$ noch ein Offset h_0 zugelassen, der kleinste Abweichungen vom asymptotischen Verhalten erfasst. Der Wert bewegt sich im Bereich des gemessenen Untergrundwertes, ist um etwa zwei Größenordnungen kleiner als die geringste Äquivalentdosis in der Messreihe und ist damit als additive Konstante belanglos. Die Position des aktiven Detektorvolumens wurde zu $x = 167\text{cm}$ bestimmt, was wiederum rückwirkend die Berechnung der tatsächlichen Abstände Quelle-Detektor ermöglichen würde.

3.1.1 Fazit

Das Experiment bestätigt die quadratische Abhängigkeit zwischen Abstand und Intensität von elektromagnetischer Strahlung. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass ein Geiger-Müller-Zählrohr aufgrund der signifikanten Totzeit nur für verhältnismäßig geringe Zählraten geeignet

ist. Sie bestimmt die höchstmögliche Zählrate die gemessen werden kann. Der Rückgang der gemessenen Zählrate bei hohen Intensitäten könnte an einem Verarbeitungsfehler der Elektronik liegen.

3.2 Exponentiellen Schwächungsgesetz an einer ^{55}Fe und einer ^{244}Cm Quelle

3.2.1 ^{244}Cm Quelle

Die gemessene Spannung ist proportional zur Dosis, deshalb ist im Folgenden nur die Spannung über der Flächenmasse abgetragen. Aus Diagramm 4 ist ersichtlich, dass die Cm Quelle nicht mit

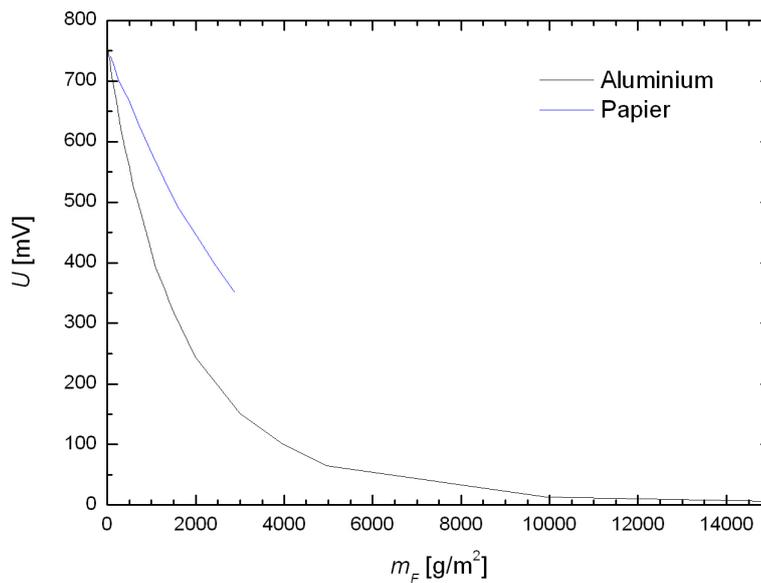


Abbildung 4: Spannung als Maß für die aufgenommene Dosis bei Bestrahlung mit ^{241}Cm

der verfügbaren Menge an Papierschichten komplett abgeschirmt werden konnte, deshalb endet die Kurve abrupt. Für Aluminium lässt sich gut die exponentielle Abschwächung erkennen. In Diagramm 5 und 6 ist die Spannung logarithmisch aufgetragen um über den Anstieg den Massenabsorptionskoeffizienten zu bestimmen.

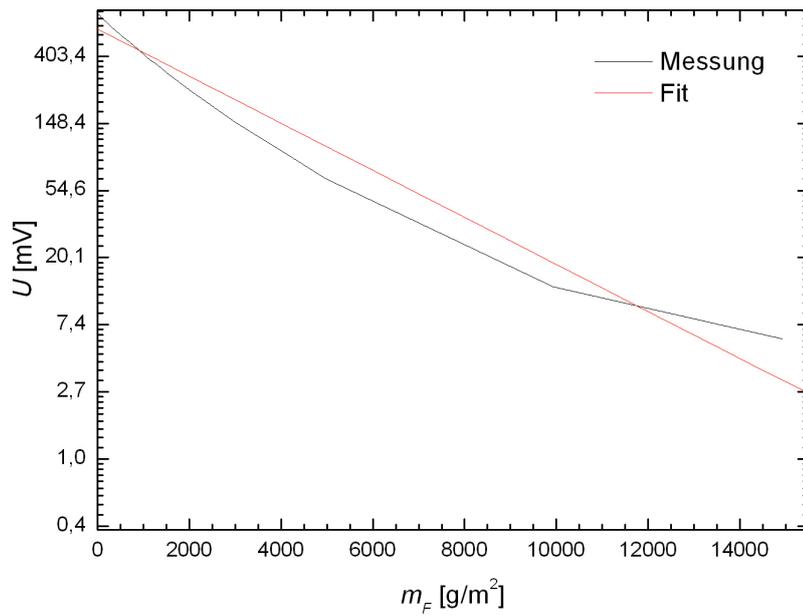


Abbildung 5: Logarithmische Auftragung der Spannung für Aluminium. Es ergab sich

$$-\frac{\mu_{\text{Al}}^{\alpha}}{\rho_{\text{Al}}} = 0.0035 \frac{\text{cm}^2}{\text{mg}}$$

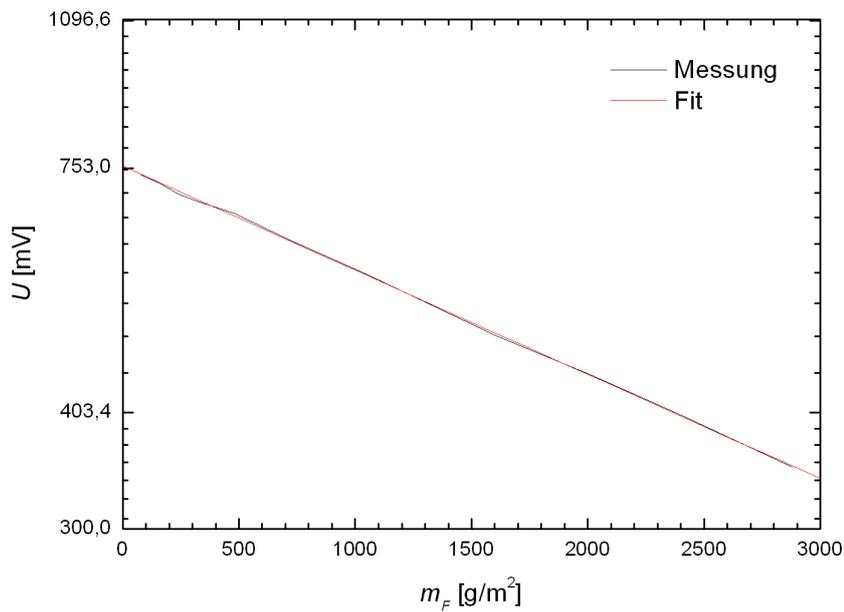


Abbildung 6: Logarithmische Auftragung der Spannung für Papier. Es ergab sich

$$-\frac{\mu_{\text{Pa}}^{\alpha}}{\rho_{\text{Pa}}} = 0.0027 \frac{\text{cm}^2}{\text{mg}}$$

3.2.2 ^{55}Fe Quelle

In Diagramm 7 kann man erkennen, dass im Gegensatz zur ^{241}Cm -Quelle die ^{55}Fe -Quelle mit Papier vollständig abgeschirmt werden konnte. Auch hier ist der exponentielle Abfall sehr deut-

lich.

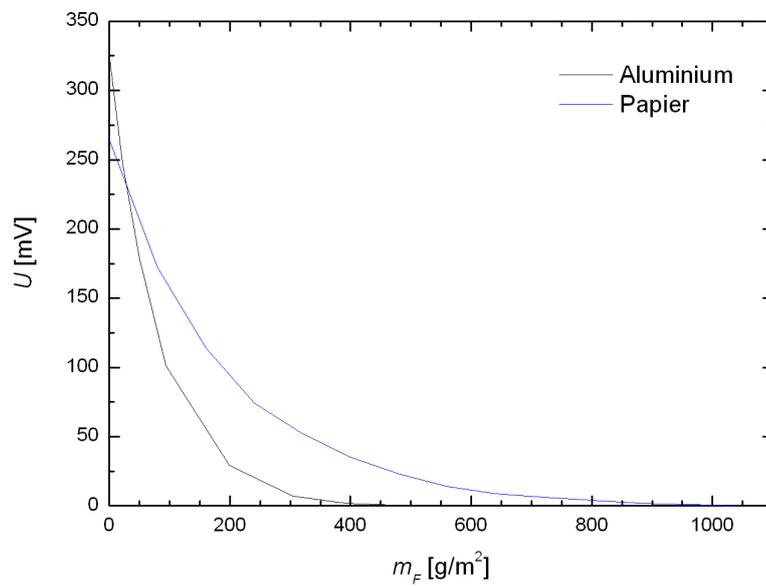


Abbildung 7: Spannung als Maß für die aufgenommene Dosis bei Bestrahlung mit ^{55}Fe

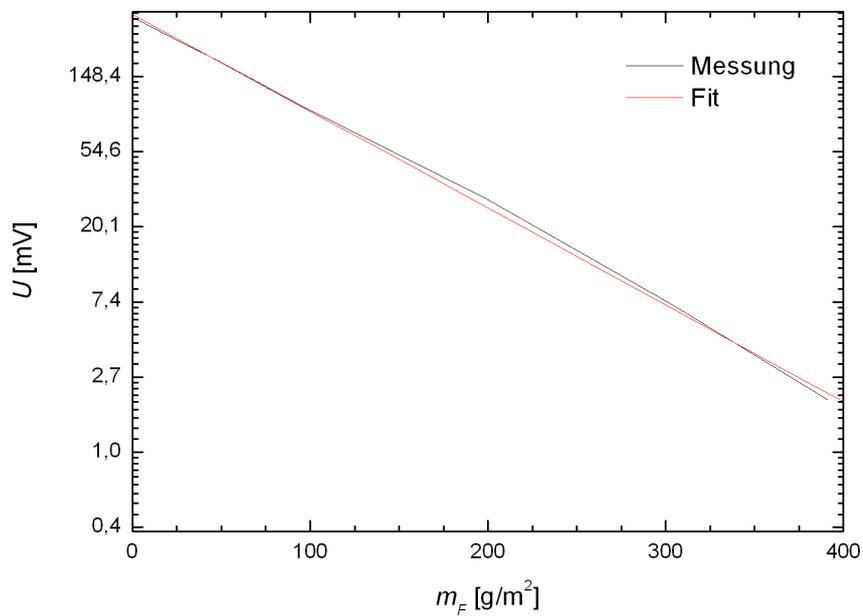


Abbildung 8: Logarithmische Auftragung der Spannung für Aluminium. Es ergab sich

$$-\frac{\mu_{\text{Al}}^{\beta}}{\rho_{\text{Al}}} = 0.1289 \frac{\text{cm}^2}{\text{mg}}$$

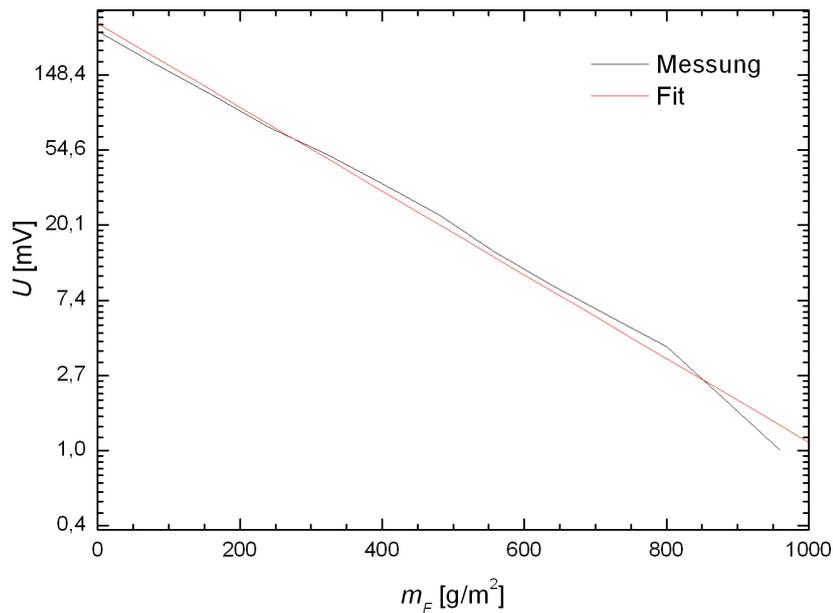


Abbildung 9: Logarithmische Auftragung der Spannung für Papier. Es ergab sich

$$-\frac{\mu_{\text{Pa}}^{\beta}}{\rho_{\text{Pa}}} = 0.0557 \frac{\text{cm}^2}{\text{mg}}$$

3.2.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Aluminium aufgrund der höheren Dichte besser abschirmt als Papier und dass energiereichere α -Strahlung schwerer abzuschirmen ist.

3.3 Überprüfung auf Linearität des Verfahrens

Für die Auswertung der Messwerte haben wir das Lichtsignal von Sonde A und Sonde B in einem Plättchen addiert. Dieser Gesamtintensität haben wir dann die theoretische aufgenommene Dosis zugeordnet. Ein anschließender Linearer-Fit der Messwerte mittels *Origin* sollte zeigen, ob ein linearer Zusammenhang besteht. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 zu sehen. Desweiteren kann man dieser Grafik das Ansprechvermögen ε des Detektors entnehmen. Es ist definiert durch $S = \varepsilon D$ und ergibt sich aus unseren Messwerten zu

$$\varepsilon = 181(15) \frac{\text{Vs}}{\text{Gr}} \quad (3.1)$$

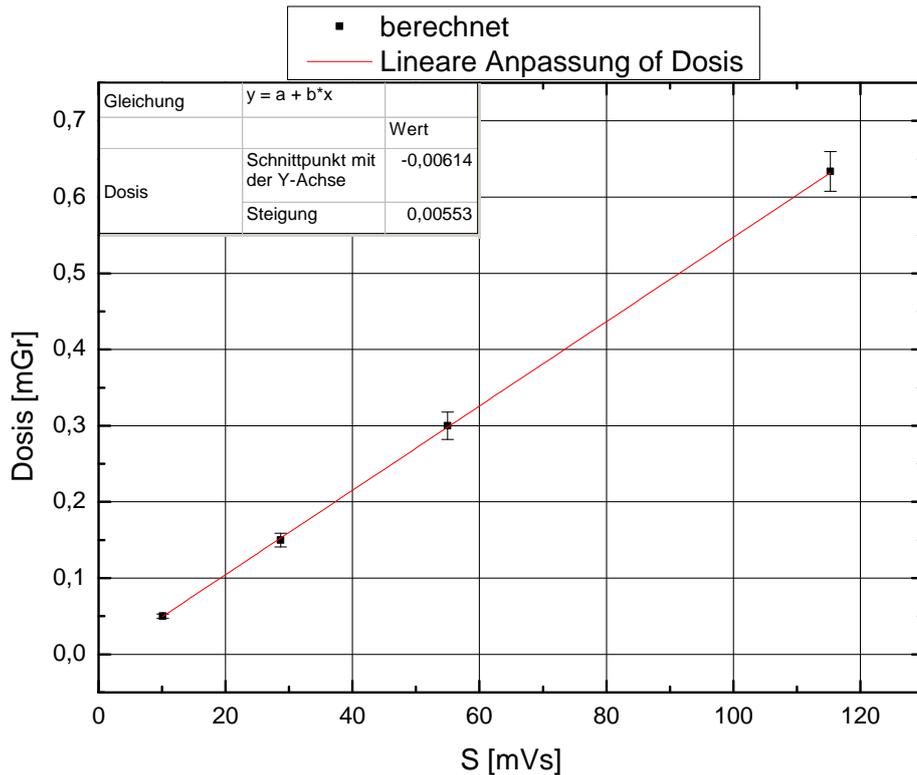


Abbildung 10: Linearer Zusammenhang zwischen der Intensität des Lumineszenzlichtes und der aufgenommenen Dosis. Die Fehler entsprechen dem Dosisleistungsfehler der Quelle ($\Delta \dot{D} = 3 \mu\text{Gr}/\text{min}$).

3.4 Messungen mit dem Schulröntengerät

3.4.1 Abstandsgesetz

Zur Überprüfung des Abstandsgesetzes haben wir mit *Mathematica* einen $1/x^2$ -Fit durch die aufgenommenen Messwerte gelegt. Das Ergebnis ist in Abbildung 11 zu sehen. Es lässt sich erkennen, dass die Fitkurve alle Messwerte in den Fehlergrenzen schneidet. Wir können dies als eine Bestätigung des Abstandsgesetzes auffassen.

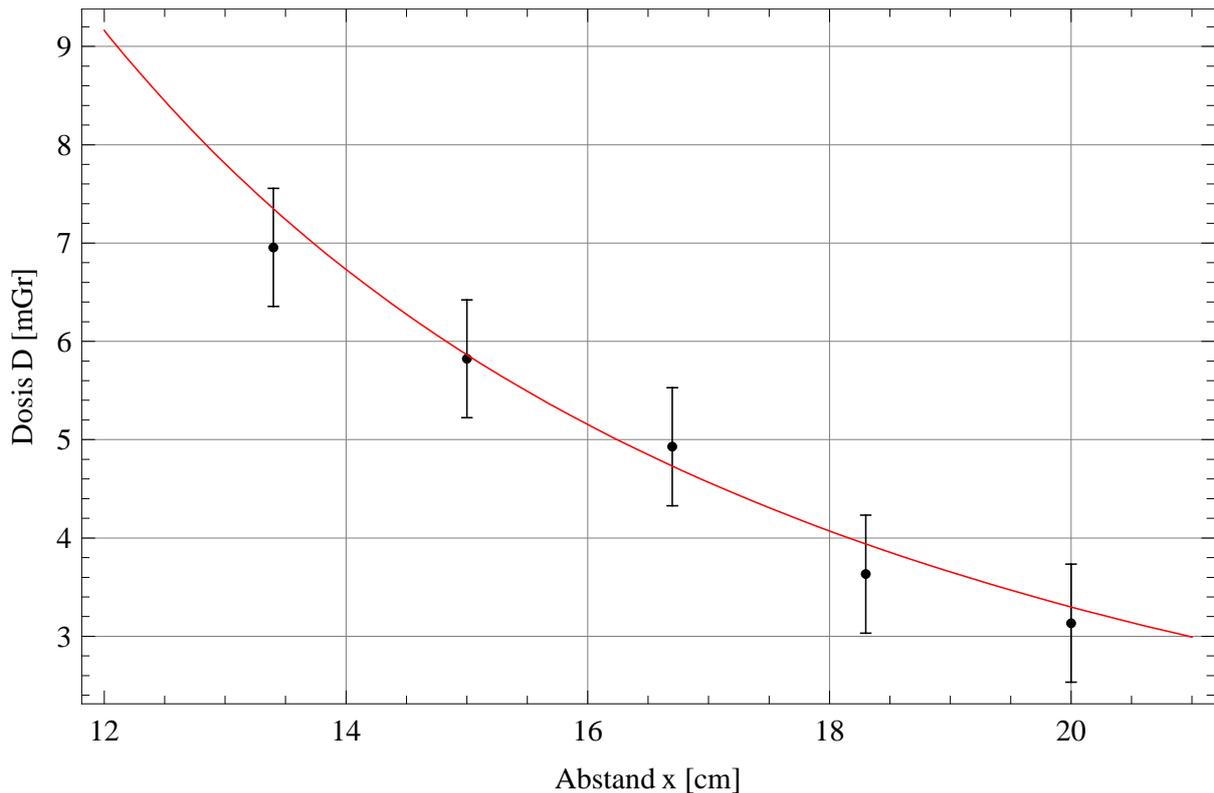


Abbildung 11: Eingezeichnet sind die Messwerte der Abstandsquadratmessung und der berechnete Fit $D = 1319.3/x^2$. Der Fehler entspricht einer zufälligen Schwankung des Dosiswertes die wir durch zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Messungen des Nullwertes ermittelt haben. ($\Delta D = 0.7$ mGr)

3.4.2 Exponentielles Schwächungsgesetz

Um die Messwerte auszuwerten und den Massenabsorptionskoeffizienten nach (1.7) zu ermitteln, haben wir die Daten logarithmisch aufgetragen. In Abbildung 12 ist dies für 20 kV dargestellt. Daraus haben wir den Massenabsorptionskoeffizienten bestimmt zu

$$\frac{\mu_E}{\rho} = 0.0266(24) \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \quad (3.2)$$

Für 30 kV gestaltet sich die Auswertung leider schwierig, weil die Messwerte sehr stark streuen (Abb. 13). Hier zeigt sich zum einen das die angesetzten Fehlerbereiche zu klein sind und mehr Faktoren für die Fehlerauswertung einbezogen werden müssen. Zum anderen ist in dieser Grafik noch viel stärker (als in Abb. 12) zu sehen, das die Messwerte eher einer Kurve folgen als einem linearen Zusammenhang.

Wir wollen trotzdem einen Vergleich der beiden M.-absorp.-Koeffizienten versuchen. Für 30 kV ist μ_E/ρ ungefähr 20% kleiner als bei 20 kV Beschleunigungsspannung. Als mögliche Erklärung vermuten wir den geringeren Wirkungsquerschnitt für Photonstreuung in diesem Energiebereich.

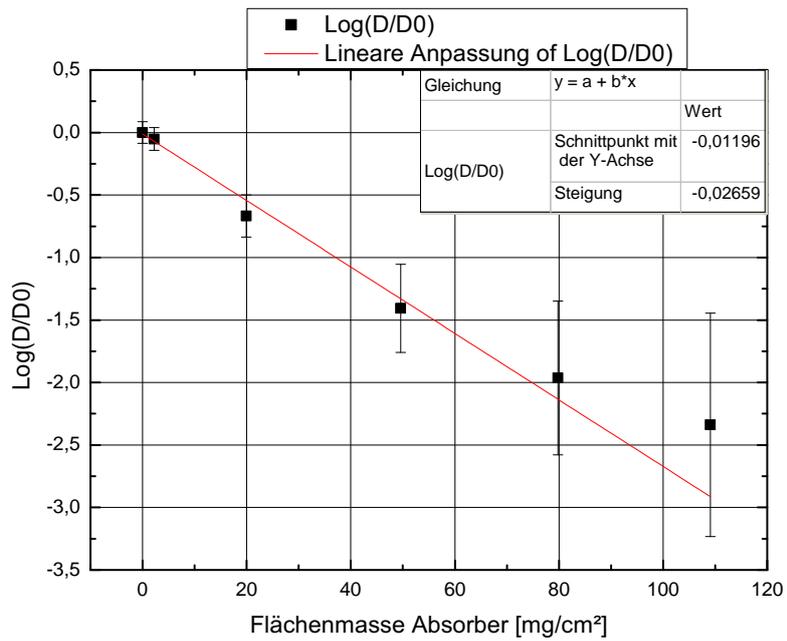


Abbildung 12: Dosis bei 20 kV Beschleunigungsspannung logarithmisch über der Flächenmasse der verwendeten Absorber aufgetragen und normiert auf die Dosis D_0 ohne Absorber. Die Fehler wie vorher. (s. Abb. 11)

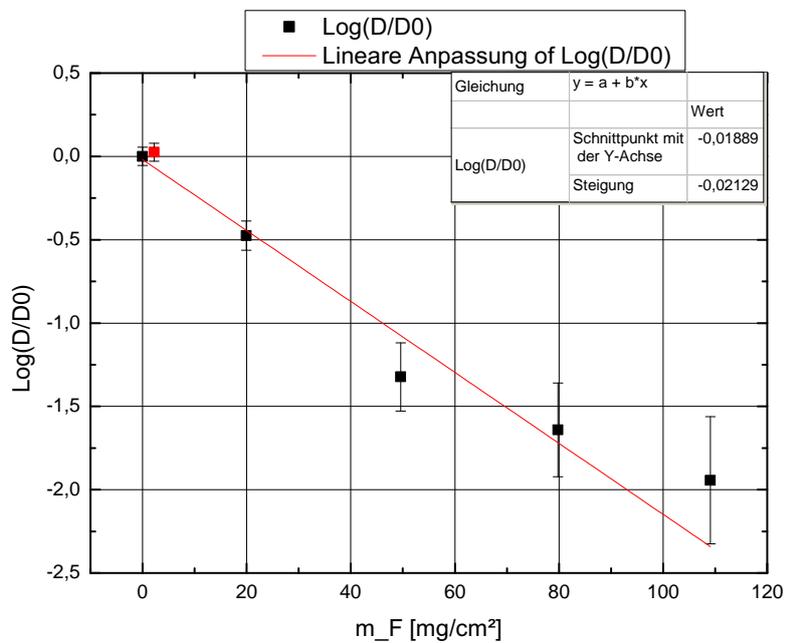


Abbildung 13: Logarithmische Auftragung der Dosis über der Flächenmasse bei 30 kV Beschleunigungsspannung. Alles andere wie vorher. (s. Abb. 12)