

## Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene

Heinrich-Buff-Ring 16, Raum 307

### Energieverlust von Alpha-Strahlung in Materie

Letzte Änderung: 13. September 2023

Beim Durchgang durch Materie erleiden  $\alpha$ -Teilchen einen materialspezifischen Energieverlust, der bei genügend großer Materialdicke zur vollständigen Abbremsung führt. Dieses Abbremsverhalten soll im Experiment quantitativ untersucht werden. Dazu wird die Energieverteilung von  $\alpha$ -Teilchen bekannter Anfangsenergieverteilung nach Transmission durch Mylar-Folien unterschiedlicher Dicke mit einem Oberflächen-Sperrschicht-Detektor gemessen. Um die Abbremsung der  $\alpha$ -Teilchen in Luft weitestgehend auszuschalten, findet das Experiment im Vakuum statt. Als  $\alpha$ -Teilchenquelle dient ein radioaktives Präparat.

## 1 Experimentaufbau

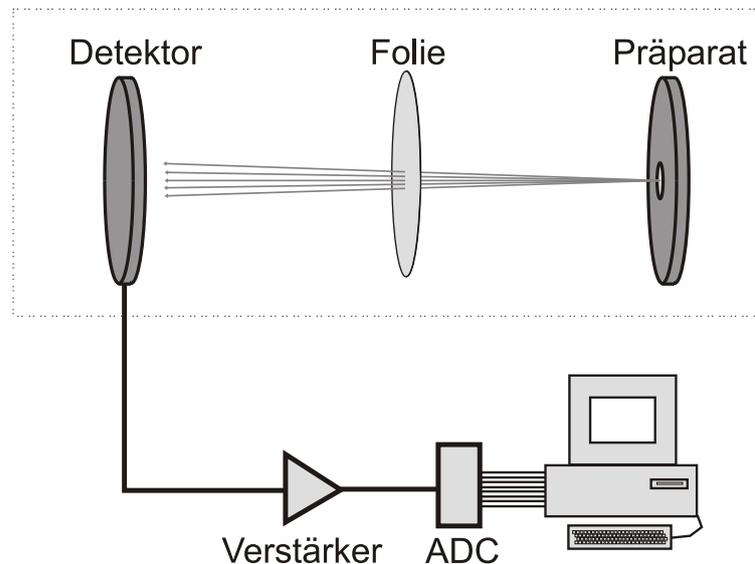


Abbildung 1: Schematischer Versuchsaufbau

Liste der verwendeten Komponenten:

- Ein Mischpräparat von Buchler zur Energieeichung bestehend aus  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ,  $^{241}_{95}\text{Am}$  und  $^{244}_{96}\text{Cm}$ .
- Ein  $^{241}_{95}\text{Am}$  Präparat zur Absorptionsmessung.
- Ein Folienhalter mit folgender Belegung: leer,  $1\times\text{F}$ ,  $2\times\text{F}$ ,  $3\times\text{F}$ , Eichpräparat,  $4\times\text{F}$ ,  $1\times\text{D}$ ,  $2\times\text{D}$ ,  $2\times\text{D}+1\times\text{F}$ , Aluminiumfolie  
 $\text{F} = 0.3 \text{ mg/cm}^2$  Mylar,  $\text{D} = 1.644 \text{ mg/cm}^2$  Mylar, Mylar ist eine Kunststoffolie ( $\text{C}_{10n}\text{H}_{8n}\text{O}_{4n}$ ) der Dichte  $1.395 \text{ g/cm}^3$ .
- Eine Vakuumkammer mit Druckmessgerät.
- Ein Oberflächen-Sperrschicht-Detektor von ORTEC, Typ „ruggedized“ ( $-50 \text{ V}$ ,  $0.4 \mu\text{A}$ ), Eintrittsfenster aus Aluminium der Dicke  $50 \mu\text{g/cm}^2$ .
- Eine Spannungsversorgung für den Detektor.
- NIM Elektronik zur Signalverarbeitung bestehend aus Verstärker und Analog-Digital-Wandler (ADC) mit 2048 Kanälen.
- Ein PC zur Datenaufnahme und -auswertung.

## 2 Grundlagen

Die Abbremsung von Strahlung bzw. Teilchen in Materie ist ein Phänomen, das für viele technische und medizinische Anwendungen relevant ist, wie z. B. für die Ionenimplantation in Halbleitern, den Strahlenschutz oder die Tumorthherapie. Hinsichtlich der Wechselwirkung mit Materie lässt sich (Teilchen-)Strahlung in drei Klassen einteilen:

1. elektromagnetische Strahlung (Röntgen-,  $\gamma$ -Strahlung),
2. leichte geladene Teilchen (Elektronen, Positronen),
3. schwere geladene Teilchen (Müonen, Protonen,  $\alpha$ -Teilchen, schwere Ionen ...),

die sich im Durchdringungsvermögen qualitativ und quantitativ voneinander unterscheiden. Auch die theoretische Beschreibung der auftretenden Wechselwirkungen ist bei den drei Klassen sehr unterschiedlich. Während für die elektromagnetische Strahlung ein exponentieller Zusammenhang zwischen transmittierter Intensität und durchstrahlter Materiedicke besteht, ist die entsprechende Relation bei geladenen Teilchen komplizierter. Statt eines Absorptionskoeffizienten wie bei elektromagnetischer Strahlung wird bei geladenen Teilchen das Bremsvermögen,  $-dE/dx$ , (engl. stopping power) betrachtet, das als energieabhängiger Energieverlust,  $-dE$ , pro Längeneinheit,  $dx$ , definiert ist.

Im Rahmen einer mikroskopischen Betrachtung der Materie lässt sich der Energieverlust als Energieübertrag auf die die Materie konstituierenden Elektronen und Atomkerne beschreiben. Man unterscheidet daher den elektronischen und den nuklearen Energieverlust. Letzterer trägt allerdings bei Teilchenenergien oberhalb von 100 keV weniger als 1% zum Gesamtenergieverlust bei. In diesem Energiebereich spielen also Stöße mit Elektronen die entscheidende Rolle. Daraus erklärt sich auch das unterschiedliche Abbremsverhalten von leichten und schweren geladenen Teilchen. Während die schweren Teilchen bei Stößen mit den viel leichteren Elektronen nur unwesentlich ihre Bewegungsrichtung ändern, gilt dies für Elektronen oder Positronen nicht. Analog zum Stoß gleichschwerer Billiardkugeln sind alle Streuwinkel möglich. Daher durchfliegen die leichten geladenen Teilchen die Materie nicht auf einer geraden Bahn sondern im Zickzackkurs, was die theoretische Beschreibung erheblich verkompliziert.

### 2.1 Die Bethe-Bloch-Gleichung

Die theoretische Beschreibung des Energieverlustes schwerer geladener Teilchen in Materie geht auf Bohr zurück, der im Rahmen der klassischen Physik eine Formel abgeleitet hat, die später von Bethe und Bloch für Quantensysteme geeignet modifiziert wurde. Die Bethe-Bloch-Gleichung lautet [1, 2] (Herleitungen finden sich beispielsweise in [3, 4])

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2}{I} \right) - \beta^2 \right]. \quad (1)$$

mit

$$4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0.307 \text{ MeVcm}^2/\text{g}. \quad (2)$$

Dabei ist

- $c$  : Lichtgeschwindigkeit =  $2.9979 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ,
- $m_e c^2$  : Elektronenruheenergie = 511 keV,
- $r_e$  : klassischer Elektronenradius =  $e^2/(4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.817 \times 10^{-13} \text{ cm}$ ,
- $e$  : Elementarladung =  $1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$
- $N_a$  : Avogadro'sche Zahl =  $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ,
- $I$  : mittlere Anregungsenergie des Absorbermaterials,
- $Z$  : Kernladungszahl des Absorbermaterials,
- $A$  : Atomare Massenzahl des Absorbermaterials,
- $\rho$  : Dichte des Absorbermaterials,
- $z$  : Ladungszahl des einfallenden Teilchens,
- $v$  : Geschwindigkeit des einfallenden Teilchens,
- $\beta$  :  $v/c$ ,
- $\gamma$  :  $1/\sqrt{1 - \beta^2}$ .

Bis auf die mittlere Anregungsenergie,  $I$ , sind alle Parameter in der Bethe-Bloch-Gleichung gut bestimmt. Die mittlere Anregungsenergie ist eine atomphysikalische Größe und kann nur quantenmechanisch berechnet werden. Wegen der Vielzahl der möglichen atomaren Anregungen ist dies im Allgemeinen sehr schwierig. In der Praxis greift man daher auf empirische Formeln zurück wie z. B. [1]

$$I = 12Z + 7 \text{ eV} \quad \text{für } Z < 13, \quad (3)$$

$$I = 9.76Z + 58.8Z^{-0.19} \text{ eV} \quad \text{für } Z \geq 13. \quad (4)$$

Genauere Werte finden sich in Tabellenwerken [5].

Generell kann die Bethe-Bloch-Gleichung nur für die näherungsweise Berechnung des Abbremsvermögens herangezogen werden. Für die exaktere Berechnung werden insbesondere

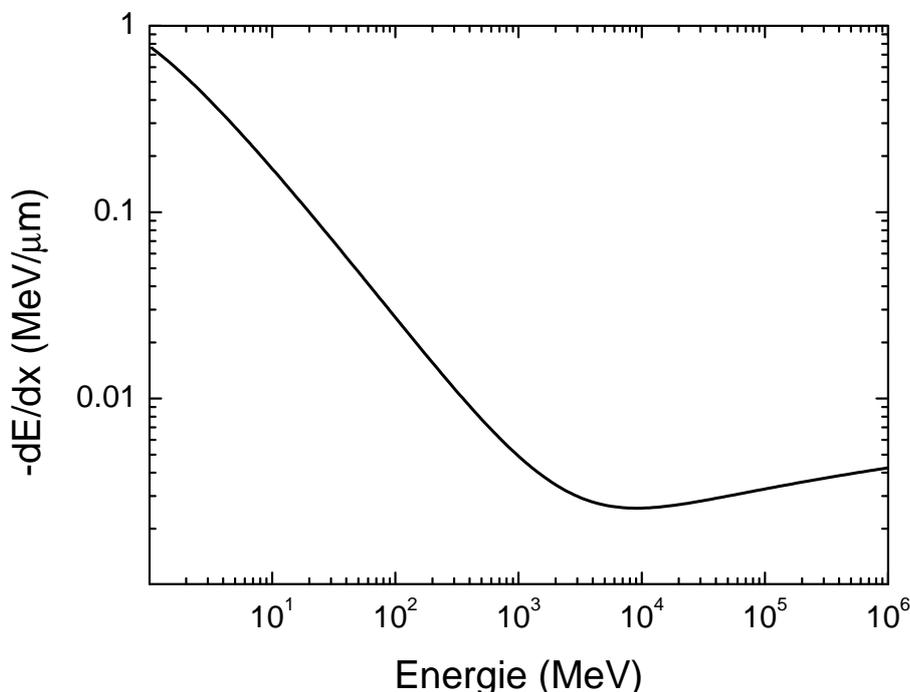


Abbildung 2: Bremsvermögen für  $\alpha$ -Teilchen in Kohlenstoff berechnet nach Gleichung 1 mit  $Z=6$ ,  $A=12$ ,  $\rho=3.516 \text{ g/cm}^3$  und  $I=79 \text{ eV}$ .

bei hohen und niedrigen Projektilgeschwindigkeiten materialabhängige Korrekturterme eingeführt [1, 2, 4, 5], die hier aber nicht diskutiert werden sollen. Für praktische Zwecke ist es oft ratsam, tabellierte Werte (z. B. Referenz [6]) für das Abbremsvermögen zu verwenden. Abbildung 2 zeigt das Bremsvermögen für  $\alpha$ -Teilchen in Graphit berechnet mit der Bethe-Bloch-Gleichung. Für Energien bis 1000 MeV nimmt das Bremsvermögen umgekehrt proportional zur Teilchenenergie ( $\sim 1/v^2$ ) ab. Bei höheren Energien nimmt das Abbremsvermögen mit steigendem Einfluss des logarithmischen Terms wieder zu. Bei Energien unterhalb von 100 keV beschreibt die Bethe-Bloch-Gleichung den Energieverlust nicht mehr korrekt. Zum einen ist in diesem Energiebereich auch der nukleare Energieverlust (s. o.) zu berücksichtigen und zum anderen spielt die sonst zu vernachlässigende Abschirmung der Teilchenladung durch die Elektronen im Absorber eine Rolle. Eine Berechnung im Rahmen einer dielektrischen Theorie zeigt in Übereinstimmung mit experimentellen Befunden, dass das Abbremsvermögen bei kleinen Energien proportional zur Teilchengeschwindigkeit ist[7].

## 2.2 Die Braggsche Regel für inhomogene Materialien

Die Bethe-Bloch-Gleichung kann nur für homogene Materialien angewandt werden, d. h. für Materialien, die nur aus einer Atomsorte bestehen. Exakte Resultate für z. B. molekulare Absorber sind in der Regel nur aus Messungen zu gewinnen. Eine brauchbare Näherung für derartige inhomogene Materialien stellt die Braggsche Regel dar

$$\frac{1}{\rho_{ges}} \left( \frac{dE}{dx} \right)_{ges} = \frac{w_1}{\rho_1} \left( \frac{dE}{dx} \right)_1 + \frac{w_2}{\rho_2} \left( \frac{dE}{dx} \right)_2 + \dots \quad (5)$$

wobei die Gewichtungsfaktoren gegeben sind durch

$$w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_i a_i A_i}. \quad (6)$$

Hier bezeichnet  $a_i$  die Anzahl Atome der Sorte  $i$  pro Molekül und  $A_i$  die entsprechende atomare Massenzahl. Genauere theoretische Beschreibungen berücksichtigen u. a. den molekularen Bindungstyp (d. h. Einfach- oder Mehrfachbindung) [8]

## 2.3 Die Reichweite geladener Teilchen in Materie

Da schwere geladene Teilchen beim Durchgang durch Materie kinetische Energie verlieren, stellt sich die Frage nach der Eindringtiefe, bei der die Teilchen vollständig abgebremst werden, d. h. die Frage nach der Reichweite schwerer geladener Teilchen in Materie.

Eine grobe Abschätzung für die Reichweite liefert folgende Formel (continuos-slowning-down-approximation, CSDA)

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \quad (7)$$

bei der von einer geraden Bahn des Teilchens mit Anfangsenergie  $E_0$  durch den Absorber ausgegangen wird. Bei Anwendung der Bethe-Bloch-Gleichung für das Bremsvermögen  $dE/dx$  ist zu beachten, dass diese nur bis zu einer Minimalenergie  $E_{min}$  gültig ist. Daher muss obige Formel geeignet modifiziert werden. In der Praxis wird folgende Gleichung verwendet[1]

$$R(E_0) = R_0(E_{min}) + \int_{E_{min}}^{E_0} \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE, \quad (8)$$

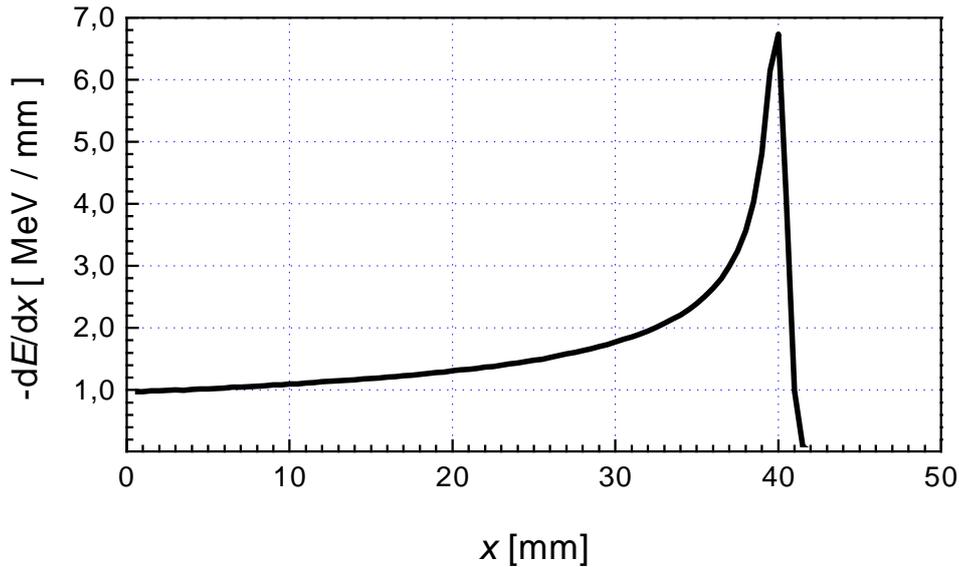


Abbildung 3: Braggsche Kurve für 70-MeV-Protonen in Wasser.

wobei die empirische Konstante  $R_0(E_{min})$  das Verhalten des Energieverlustes bei kleinen kinetischen Energien beschreibt.

Die Tatsache, dass geladene Teilchen im Unterschied zu elektromagnetischer Strahlung in Materie eine endliche Reichweite besitzen, ist für technische Anwendungen von Bedeutung. Man denke z. B. an die aus Strahlenschutzgründen notwendige Abschirmung radioaktiver Strahlung. Für viele Anwendungen ist die Frage nach der Energiedeposition, d. h. die an den Absorber abgeführte Energie, von Interesse. Im Fall eines aus Molekülen aufgebauten Absorbers kann diese Energie beispielsweise zur Veränderung der Molekülstruktur verwendet werden (Tumorthherapie). Da das Abbremsvermögen mit der Teilchenenergie variiert, ist die Energieabgabe an den Absorber von der Eindringtiefe abhängig. Abbildung 3 zeigt das Abbremsvermögen als Funktion der Eindringtiefe, die sogenannte Braggsche Kurve, für 70-MeV-Protonen in Wasser. Da für die sich kontinuierlich verlangsamenden geladenen Teilchen das Abbremsvermögen zunächst zunimmt (vgl. Abbildung 2), steigt die Energiedeposition mit zunehmender Tiefe an, bis ein Maximalwert erreicht wird. Bei geringeren Teilchenenergien nimmt das Abbremsvermögen wieder ab. Die Tiefe bei der das Maximum der Energiedeposition, der sogenannte Bragg-Peak, erreicht wird, lässt sich dabei über die Anfangsenergie der geladenen Teilchen steuern.

## 2.4 Die Energieverlust-Verteilung

In der bisherigen Diskussion wurden nur gemittelte Größen wie der mittlere Energieverlust und die mittlere Reichweite betrachtet. Der Energieverlust eines einzelnen Teilchens wird im Allgemeinen nicht dem mittleren Wert entsprechen, da die Anzahl der Stöße im Absorber und die dabei übertragene Energie statistisch variiert. Nach dem Durchgang vieler Teilchen durch ein Material der Dicke  $x$ , erhält man eine Gaußförmige Energieverlustverteilung[1]

$$f(x, \Delta) \sim \exp\left(-\frac{\ln(2)(\Delta - \bar{\Delta})^2}{(b/2)^2}\right) \quad (9)$$

mit dem mittleren Energieverlust  $\bar{\Delta}$  und der Halbwertsbreite

$$b = \left( 32\pi \ln(2) N_a r_e^2 m_e^2 c^4 \frac{1 - \frac{1}{2}\beta^2}{1 - \beta^2} \rho \frac{Z}{A} x \right)^{1/2} = \left( 0.87 \frac{1 - \frac{1}{2}\beta^2}{1 - \beta^2} \frac{\rho}{\text{gcm}^{-3}} \frac{Z}{A} \frac{x}{\text{cm}} \right)^{1/2} \quad [\text{MeV}]. \quad (10)$$

Gleichung 9 gilt allerdings nur für Dicken  $x$ , die einerseits so groß sind, dass die Anzahl der Einzelstöße mit den Elektronen und Kernen des Absorbermaterials eine statistische Betrachtung rechtfertigt, und die andererseits so dünn ist, dass sich die Energie der geladenen Teilchen beim Durchgang durch den Absorber nur wenig ändert. Eine genauere Betrachtung findet sich in Referenz [9].

## 2.5 Computer Simulationen

Für viele Anwendungen ist die den bisherigen Betrachtungen zugrunde liegende Annahme, dass sich die geladenen Teilchen auf geraden Bahnen durch den Absorber bewegen, zu grob. Besonders bei kleinen Energien im keV-Bereich erleiden die Teilchen durch Stöße mit den Kernen des Absorbermaterials große Richtungsänderungen. Eine mathematische Beschreibung dieser Verhältnisse erweist sich als sehr schwierig. Eine Methode, dennoch brauchbare Ergebnisse zu erhalten, ist die Simulation der Wechselwirkung geladener Teilchen mit Materie mittels Computer. Ein weit verbreitetes Simulationsprogramm, das die Wechselwirkung mit dem Absorber als Aufeinanderfolge von Zweierstößen behandelt, ist TRIM (TRansport of Ions in Matter) [10]. Haupteinsatzgebiete derartiger Programme sind die Vorhersage von Tiefenverteilungen und Zerstäubungsausbeuten bei der Ionenimplantation in Festkörpern [11].

## 2.6 Alpha-Zerfall

Beim Alpha-Zerfall wandelt sich ein schwerer Atomkern  $X$  mit Massenzahl  $A$  und Kernladungszahl  $Z$  unter Aussendung eines Alpha-Teilchens (Massenzahl 4, Kernladungszahl 2) in einen leichteren Kern um. Die Reaktionsgleichung lautet:



Dabei ist der  $Q$ -Wert die freiwerdende Energie

$$Q = E_\alpha + E_{X'} + E_{\text{exci}}, \quad (12)$$

die sich auf die kinetische Energie  $E_{X'}$  und die Anregungsenergie  $E_{\text{exci}}$  des Tochterkerns  $X'$  sowie die kinetische Energie  $E_\alpha$  des Alpha-Teilchens verteilt. Da der Mutterkern vor dem Zerfall als ruhend angenommen werden kann, folgt aus der Impulserhaltung, dass  $p_\alpha + p_{X'} = 0$ . Mit  $E_\alpha = p_\alpha^2/2m_\alpha$  und  $E_{X'} = p_{X'}^2/2m_{X'}$  ist somit  $E_{X'} = E_\alpha m_\alpha/m_{X'}$ . Einsetzen in Gl.12 und Auflösen nach  $E_\alpha$  ergibt

$$E_\alpha = \frac{Q - E_{\text{exci}}}{1 + m_\alpha/m_{X'}}. \quad (13)$$

$Q$ -Werte und Anregungsenergien können Tabellenwerken entnommen werden (s. Abb. 4–6).

## 3 Aufgaben

### 3.1 Vorbereitung

1. Berechnen Sie aus den Angaben der Alpha-Zerfallsschemata (Abb. 4–6) die Alpha-Teilchenenergien für alle  $^{239}\text{Pu}$ -,  $^{241}\text{Am}$ - und  $^{244}\text{Cm}$ -Zerfallskanäle, die eine Wahrscheinlichkeit größer als 1% aufweisen.
2. Schätzen Sie ab, nach wievielen Stößen mit jeweils einem ruhenden Elektron das Alpha-Teilchen zur Ruhe kommt.
3. Schätzen Sie ab, wie stark das Alpha-Teilchen bei einem Stoß mit einem Elektron im Mittel abgelenkt wird.
4. Schätzen Sie ab, wie stark das Alpha-Teilchen insgesamt im Mittel abgelenkt wird.
5. Vollziehen Sie die Herleitung der Bethe-Bloch-Gleichung in Referenz [3] nach. Leiten Sie insbesondere den Ausdruck für den Impulsübertrag vom schweren geladenen Teilchen auf *ein* Elektron explizit her. Welche Näherungen werden bei der Herleitung der Bethe-Bloch-Gleichung vorgenommen? In welchem Teilchenenergiebereich ist die Bethe-Bloch-Gleichung gültig?
6. Berechnen Sie das Abbremsvermögen der von  $^{241}\text{Am}$  emittierten  $\alpha$ -Teilchen in Mylar unter Verwendung der angegebenen Formeln.
7. Schätzen Sie die mittlere Reichweite der von  $^{241}\text{Am}$  emittierten 5.486-MeV- $\alpha$ -Teilchen in Mylar ab. Berechnen Sie dazu schrittweise ausgehend von der Anfangsenergie  $E_0$  die mittlere Energie nach Durchgang durch eine Mylar-Folie der Dicke  $dx$  als  $E_{n+1} = E_n - (-dE/dx) dx$ , solange bis  $E_{n+1}$  negativ wird. Dabei ist die Schrittweite  $dx$  so klein zu wählen, dass der Fehler in der Berechnung vernachlässigbar wird. (Es empfiehlt sich, hierfür ein Computerprogramm in z. B. C oder Pascal zu schreiben).
8. Stellen sie die Braggsche Kurve graphisch dar.
9. Extrahieren Sie aus Ihren Berechnungen die Schwerpunkte und Halbwertsbreiten der Energieverlustverteilungen für 5.486-MeV- $\alpha$ -Teilchen nach Durchqueren von Mylar-Folien der oben angegebenen Dicken an. Nehmen Sie dabei für die Berechnung der Halbwertsbreite an, dass der Absorber nur aus Kohlenstoff besteht.

### 3.2 Durchführung

1. Schließen Sie das Belüftungsventil an der Vakuumpumpe und stellen Sie die Vakuumpumpe an.
2. Öffnen Sie das Vakuumventil zwischen Pumpe und Vakuumkammer. Beobachten Sie die Druckanzeige.
3. Schalten Sie den NIM-Überrahmen ein.
4. Fahren Sie den leeren Folienhalter zwischen Detektor und Präparat.

5. Betrachten Sie die vorverstärkten (negativen) Detektorpulse mit dem Oszilloskop.
6. Stellen Sie die Versorgungsspannung des Detektors auf -50 V ein.
7. Schalten Sie die Versorgungsspannung des Detektors ein und warten Sie so lange, bis die Kontrollleuchte nicht mehr blinkt.
8. Betrachten Sie nun die verstärkten (positive) Pulse mit dem Oszilloskop. Stellen Sie die Verstärkung so ein, dass die Pulse ca. 7 V hoch sind.
9. Rufen sie am PC das Messprogramm auf.
10. Fahren Sie das Mischpräparat zur Eichung vor den Detektor.
11. Starten Sie eine Messung auf dem PC. (Messdauer 30 min).
12. Speichern Sie die Messung ab.
13. Fahren Sie nun sukzessive die verschieden dicken Mylar-Folien (einschließlich Dicke 0) und die Alu-Folie unbekannter Dicke zwischen Präparat und Detektor und messen Sie jeweils so lange bis Sie ca. 100 000 Ereignisse im Spektrum akkumuliert haben.
14. Messen Sie noch einmal ein Spektrum mit leerem Folienhalter und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem zuvor gemessenen „Leer“-Spektrum.
15. Schließen Sie das Vakuumventil zwischen Pumpe und Vakuumkammer. Durch Öffnen des Belüftungsventils an der Vakuumkammer stellen Sie in der Vakuumkammer erst einen Druck von 500 Torr und dann von 650 Torr ein und messen Sie die Energiespektren so lange bis Sie jeweils ca. 100 000 Ereignisse akkumuliert haben.
16. Speichern Sie jede Messung unmittelbar nach ihrer Beendigung ab, indem Sie sie aus dem Messprogramm als ASCII-Datei exportieren.
17. Schalten Sie die Versorgungsspannung des Detektors aus. Warten Sie, bis die Kontrollleuchte nicht mehr blinkt, und schalten Sie dann den NIM-Überrahmen aus.
18. Evakuieren Sie vor Beenden des Experiments die Vakuumkammer und schließen Sie anschließend das Vakuumventil zwischen Pumpe und Vakuumkammer. Schalten Sie die Vakuumpumpe aus und öffnen Sie das Belüftungsventil an der Vakuumpumpe.

### 3.3 Ausarbeitung

1. Abschätzungen aus der Vorbereitung.
2. Herleitung der Bethe-Bloch-Gleichung inkl. Diskussion der Näherungen und des Gültigkeitsbereiches (s. Vorbereitung).
3. Führen Sie eine lineare Energiegleichung  $E = a_0 + a_1 \times \text{Kanalzahl}$  durch. Geben Sie die Unsicherheiten  $\Delta a_0$  und  $\Delta a_1$  der Koeffizienten  $a_0$  und  $a_1$  an.

4. Bestimmen Sie für jedes gemessene Spektrum die Energie des Maximums sowie die Halbwertsbreite der Verteilung (kein Gaußfit!). Geben Sie auch jeweils die experimentellen Unsicherheiten an, die sich u. a. aus der Fehlerfortpflanzung aus  $\Delta a_0$  und  $\Delta a_1$  ergeben.
5. Vergleichen Sie die experimentellen Ergebnisse mit den Resultaten Ihrer Berechnungen. Wie gut ist die Übereinstimmung? Diskutieren Sie, warum evtl. die Übereinstimmung nicht so gut ist.
6. Bestimmen Sie die Dicke (inkl. experimentellem Fehler) der Alu-Folie aus dem gemessenen Energieverlust.
7. Bestimmen Sie analog zur Dickebestimmung der Alu-Folie den Luftdruck (inkl. experimentellem Fehler) aus dem gemessenen Energieverlust. (Der Abstand zwischen Präparat und Detektor beträgt 4cm.) Warum erhält man einen zu großen Wert?

## Literatur

- [1] William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, (Springer, Berlin, 1994) Kapitel 2.
- [2] G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger, *Kern- und Elementarteilchenphysik*, (VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1988) Kapitel 4.
- [3] J. Bleck-Neuhaus, *Elementare Teilchen*, (Springer, Berlin 2010) Kapitel 2; doi:10.1007/978-3-540-85300-8\_2 (es besteht Zugriff über das JLU-Netz).
- [4] J. D. Jackson, *Klassische Elektrodynamik*, (Walter de Gruyter, Berlin, 1993) Kapitel 13.
- [5] R. M. Sternheimer, M. J. Berger, S. M. Selzer, *Density Effect for Ionization Loss*, Atomic and Nuclear Data Tables **30** (1984) 262.
- [6] ICRU Report 49, *Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles* (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, USA, 1993).
- [7] J. Lindhard, M. Scharff, *Energy Dissipation by Ions in the keV Region*, Phys. Rev. **124** (1961) 128.
- [8] J. F. Ziegler, M. Manoyan, *The Stopping of Ions in Compounds*, Nucl. Instrum. Meth. B **35** (1988) 215.
- [9] P. Sigmund, *Statistics of Charged Particle Penetration*, in „Interaction of Charged Particles with Solids and Surfaces“, A. Gras-Marti, H. M. Urbassek, N. R. Arista, F. Flores (Hrsg.), NATO ASI Series B: Physics Vol. 271 (Plenum Press, New York, 1991) S. 73ff.
- [10] J. P. Biersack and L. G. Haggmark, *A Monte-Carlo Computer Program for the Transport of Ions in Amorphous Targets*, Nucl. Instrum. Meth. **174** (1980) 257; J. F. Ziegler and J. P. Biersack, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, (Pergamon Press, New York, 1985).

- [11] W. Eckstein, *Computer Simulations of Ion-Solid Interactions*, Springer Series in Material Science Vol. 10, (Springer, Berlin 1991).
- [12] International Commission on Radiation Units and Measurements, *ICRU Report 49, Stopping Powers and Ranges for Protons and Alpha Particles*, (ICRU Publications, Bethesda, MD 20814-3095, USA, 1993).
- [13] R. B. Firestone, *Table of Isotopes, Eighth Edition (CD-ROM Version)*, (John Wiley, New York, 1996).

## 4 Diagramme und Tabellen

Die nachfolgenden Zerfallschemata und Stopping-Power-Tabellen und sind der Table of Isotopes[13] bzw. dem ICRU Report 49[12] entnommen.

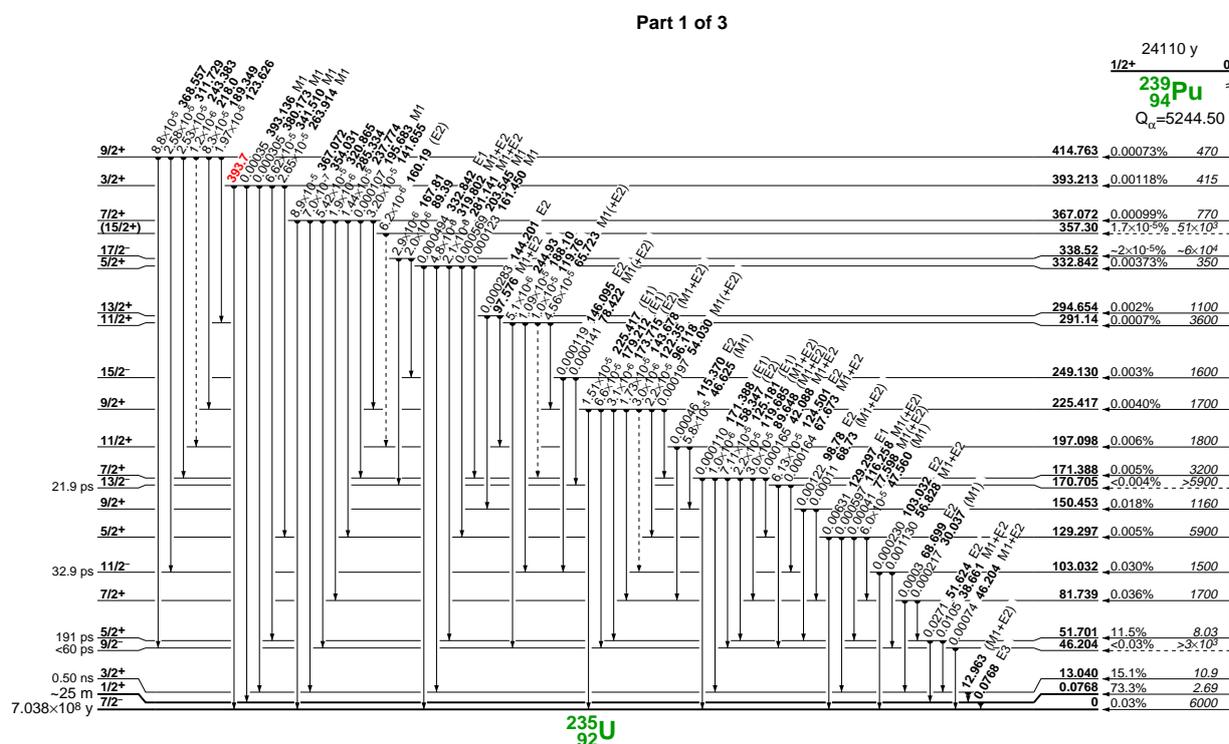


Abbildung 4:  $\alpha$ -Zerfallschema von  $^{239}\text{Pu}$ . Alle Energien sind in keV angegeben.

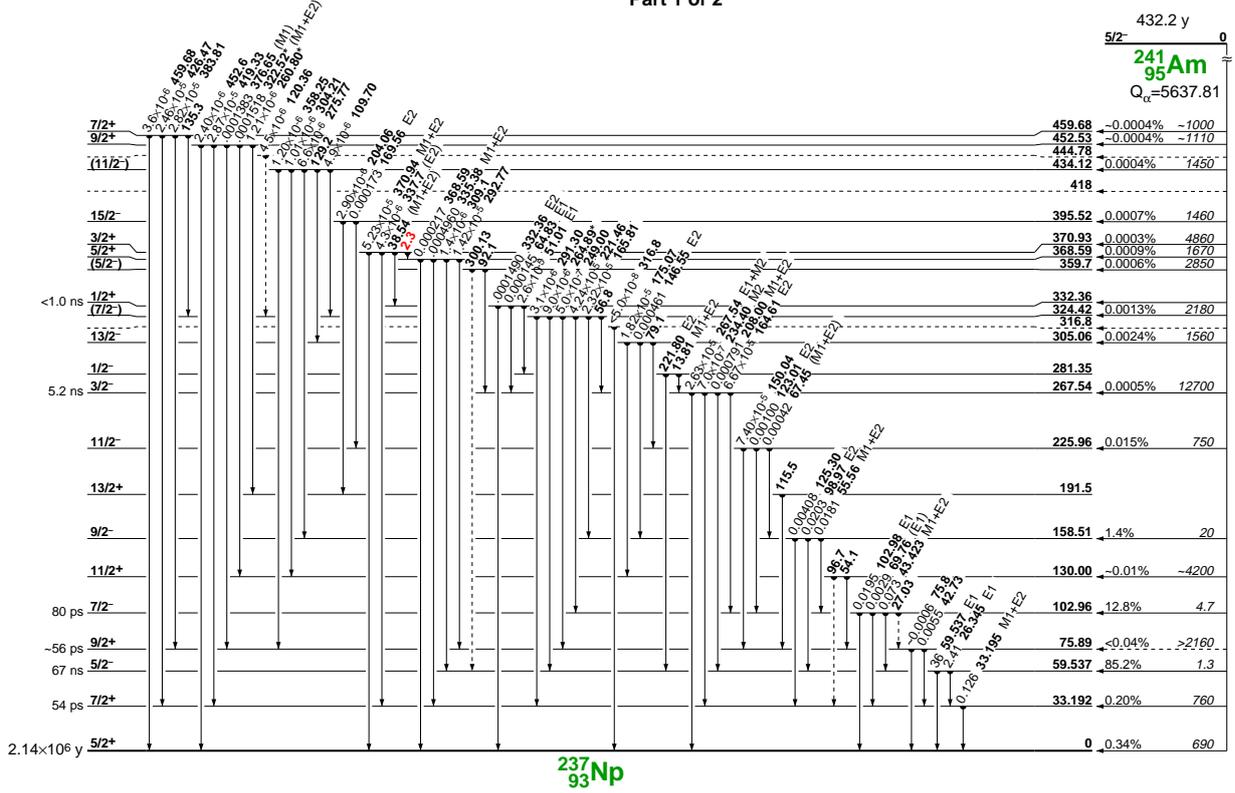


Abbildung 5:  $\alpha$ -Zerfallschema von <sup>241</sup>Am. Alle Energien sind in keV angegeben.

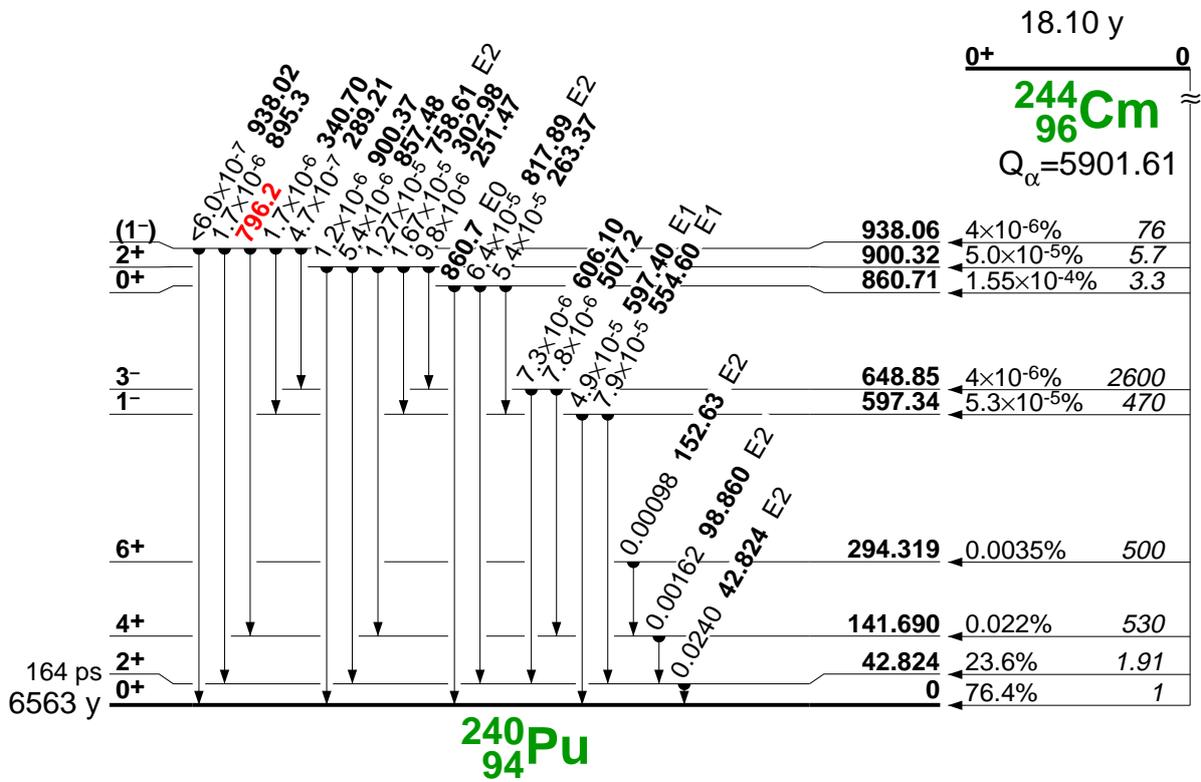


Abbildung 6:  $\alpha$ -Zerfallschema von <sup>244</sup>Cm. Alle Energien sind in keV angegeben.

Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm <sup>2</sup> /g)			Range		
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm <sup>2</sup> )	Projected (g/cm <sup>2</sup> )	Detour Factor Projected/CSDA
.0010	8.750E+01	1.340E+02	2.215E+02	5.377E-06	2.025E-06	.3767
.0015	1.086E+02	1.256E+02	2.342E+02	7.562E-06	3.034E-06	.4012
.0020	1.267E+02	1.178E+02	2.444E+02	9.651E-06	4.073E-06	.4220
.0025	1.427E+02	1.109E+02	2.536E+02	1.166E-05	5.129E-06	.4399
.0030	1.573E+02	1.049E+02	2.622E+02	1.360E-05	6.198E-06	.4558
.0040	1.835E+02	9.494E+01	2.784E+02	1.730E-05	8.355E-06	.4830
.0050	2.067E+02	8.698E+01	2.937E+02	2.079E-05	1.052E-05	.5058
.0060	2.279E+02	8.047E+01	3.084E+02	2.411E-05	1.267E-05	.5255
.0070	2.475E+02	7.501E+01	3.225E+02	2.728E-05	1.481E-05	.5427
.0080	2.659E+02	7.036E+01	3.362E+02	3.032E-05	1.692E-05	.5580
.0090	2.832E+02	6.635E+01	3.495E+02	3.324E-05	1.900E-05	.5717
.0100	2.996E+02	6.283E+01	3.625E+02	3.605E-05	2.106E-05	.5841
.0125	3.377E+02	5.568E+01	3.933E+02	4.266E-05	2.606E-05	.6108
.0150	3.723E+02	5.018E+01	4.225E+02	4.879E-05	3.087E-05	.6327
.0175	4.043E+02	4.579E+01	4.501E+02	5.452E-05	3.550E-05	.6511
.0200	4.343E+02	4.220E+01	4.765E+02	5.992E-05	3.996E-05	.6670
.0225	4.626E+02	3.919E+01	5.018E+02	6.503E-05	4.427E-05	.6808
.0250	4.894E+02	3.663E+01	5.260E+02	6.989E-05	4.843E-05	.6930
.0275	5.150E+02	3.443E+01	5.494E+02	7.454E-05	5.247E-05	.7038
.0300	5.395E+02	3.250E+01	5.720E+02	7.900E-05	5.638E-05	.7136
.0350	5.858E+02	2.929E+01	6.150E+02	8.743E-05	6.387E-05	.7305
.0400	6.290E+02	2.672E+01	6.557E+02	9.530E-05	7.097E-05	.7447
.0450	6.696E+02	2.461E+01	6.942E+02	1.027E-04	7.774E-05	.7569
.0500	7.081E+02	2.284E+01	7.310E+02	1.097E-04	8.420E-05	.7674
.0550	7.448E+02	2.133E+01	7.661E+02	1.164E-04	9.041E-05	.7767
.0600	7.798E+02	2.002E+01	7.998E+02	1.228E-04	9.638E-05	.7850
.0650	8.134E+02	1.888E+01	8.323E+02	1.289E-04	1.021E-04	.7923
.0700	8.457E+02	1.788E+01	8.636E+02	1.348E-04	1.077E-04	.7990
.0750	8.768E+02	1.699E+01	8.938E+02	1.405E-04	1.131E-04	.8051
.0800	9.068E+02	1.619E+01	9.230E+02	1.460E-04	1.184E-04	.8107
.0850	9.359E+02	1.547E+01	9.514E+02	1.513E-04	1.235E-04	.8158
.0900	9.640E+02	1.482E+01	9.788E+02	1.565E-04	1.284E-04	.8205
.0950	9.913E+02	1.422E+01	1.006E+03	1.616E-04	1.333E-04	.8248
.1000	1.018E+03	1.368E+01	1.031E+03	1.665E-04	1.380E-04	.8289
.1250	1.140E+03	1.152E+01	1.151E+03	1.894E-04	1.602E-04	.8457
.1500	1.247E+03	9.991E+00	1.257E+03	2.101E-04	1.804E-04	.8585
.1750	1.343E+03	8.848E+00	1.352E+03	2.293E-04	1.991E-04	.8685
.2000	1.429E+03	7.956E+00	1.437E+03	2.472E-04	2.167E-04	.8768
.2250	1.506E+03	7.240E+00	1.513E+03	2.642E-04	2.334E-04	.8837
.2500	1.575E+03	6.651E+00	1.582E+03	2.803E-04	2.494E-04	.8896
.2750	1.637E+03	6.157E+00	1.643E+03	2.958E-04	2.647E-04	.8948
.3000	1.693E+03	5.736E+00	1.698E+03	3.108E-04	2.795E-04	.8993
.3500	1.787E+03	5.057E+00	1.792E+03	3.394E-04	3.078E-04	.9070
.4000	1.861E+03	4.531E+00	1.866E+03	3.667E-04	3.350E-04	.9134
.4500	1.918E+03	4.111E+00	1.923E+03	3.931E-04	3.612E-04	.9187
.5000	1.961E+03	3.767E+00	1.964E+03	4.188E-04	3.867E-04	.9234
.5500	1.990E+03	3.479E+00	1.993E+03	4.441E-04	4.118E-04	.9274
.6000	2.008E+03	3.235E+00	2.012E+03	4.690E-04	4.367E-04	.9310
.6500	2.017E+03	3.025E+00	2.020E+03	4.938E-04	4.614E-04	.9343
.7000	2.019E+03	2.843E+00	2.021E+03	5.186E-04	4.860E-04	.9372
.7500	2.013E+03	2.682E+00	2.016E+03	5.433E-04	5.107E-04	.9399
.8000	2.002E+03	2.540E+00	2.005E+03	5.682E-04	5.355E-04	.9424

Tabelle 1: Abbremsvermögen und Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Luft.

Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm <sup>2</sup> /g)			Range		
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm <sup>2</sup> )	Projected (g/cm <sup>2</sup> )	Detour Factor Projected/CSDA
.8500	1.987E+03	2.413E+00	1.989E+03	5.932E-04	5.604E-04	.9447
.9000	1.968E+03	2.299E+00	1.970E+03	6.185E-04	5.856E-04	.9469
.9500	1.946E+03	2.196E+00	1.948E+03	6.440E-04	6.111E-04	.9488
1.0000	1.922E+03	2.103E+00	1.924E+03	6.698E-04	6.368E-04	.9507
1.2500	1.774E+03	1.738E+00	1.776E+03	8.049E-04	7.716E-04	.9586
1.5000	1.625E+03	1.487E+00	1.626E+03	9.520E-04	9.184E-04	.9647
1.7500	1.494E+03	1.302E+00	1.495E+03	1.112E-03	1.079E-03	.9696
2.0000	1.382E+03	1.160E+00	1.383E+03	1.287E-03	1.252E-03	.9735
2.2500	1.287E+03	1.048E+00	1.288E+03	1.474E-03	1.440E-03	.9767
2.5000	1.205E+03	9.560E-01	1.206E+03	1.675E-03	1.640E-03	.9793
2.7500	1.133E+03	8.799E-01	1.134E+03	1.889E-03	1.854E-03	.9816
3.0000	1.072E+03	8.157E-01	1.072E+03	2.116E-03	2.080E-03	.9834
3.5000	9.686E+02	7.129E-01	9.693E+02	2.607E-03	2.571E-03	.9863
4.0000	8.859E+02	6.341E-01	8.865E+02	3.147E-03	3.111E-03	.9885
4.5000	8.180E+02	5.718E-01	8.186E+02	3.734E-03	3.698E-03	.9902
5.0000	7.607E+02	5.211E-01	7.612E+02	4.368E-03	4.331E-03	.9915
5.5000	7.117E+02	4.791E-01	7.122E+02	5.048E-03	5.010E-03	.9925
6.0000	6.696E+02	4.436E-01	6.700E+02	5.772E-03	5.734E-03	.9934
6.5000	6.327E+02	4.133E-01	6.331E+02	6.540E-03	6.501E-03	.9940
7.0000	6.002E+02	3.870E-01	6.005E+02	7.351E-03	7.312E-03	.9946
7.5000	5.712E+02	3.640E-01	5.716E+02	8.205E-03	8.165E-03	.9951
8.0000	5.453E+02	3.437E-01	5.456E+02	9.100E-03	9.060E-03	.9955
8.5000	5.219E+02	3.257E-01	5.222E+02	1.004E-02	9.996E-03	.9959
9.0000	5.006E+02	3.095E-01	5.009E+02	1.102E-02	1.097E-02	.9962
9.5000	4.812E+02	2.949E-01	4.815E+02	1.203E-02	1.199E-02	.9964
10.0000	4.634E+02	2.817E-01	4.637E+02	1.309E-02	1.305E-02	.9967
12.5000	3.926E+02	2.308E-01	3.929E+02	1.897E-02	1.893E-02	.9975
15.0000	3.423E+02	1.959E-01	3.425E+02	2.581E-02	2.576E-02	.9980
17.5000	3.044E+02	1.705E-01	3.046E+02	3.356E-02	3.351E-02	.9983
20.0000	2.747E+02	1.511E-01	2.748E+02	4.222E-02	4.216E-02	.9985
25.0000	2.309E+02	1.234E-01	2.311E+02	6.214E-02	6.207E-02	.9988
27.5000	2.143E+02	1.131E-01	2.144E+02	7.338E-02	7.330E-02	.9989
30.0000	2.001E+02	1.045E-01	2.002E+02	8.546E-02	8.537E-02	.9990
35.0000	1.771E+02	9.074E-02	1.772E+02	1.121E-01	1.120E-01	.9991
40.0000	1.593E+02	8.026E-02	1.593E+02	1.419E-01	1.417E-01	.9992
45.0000	1.449E+02	7.201E-02	1.450E+02	1.748E-01	1.747E-01	.9992
50.0000	1.332E+02	6.533E-02	1.333E+02	2.108E-01	2.106E-01	.9993
55.0000	1.234E+02	5.981E-02	1.234E+02	2.498E-01	2.496E-01	.9993
60.0000	1.150E+02	5.516E-02	1.151E+02	2.918E-01	2.916E-01	.9993
65.0000	1.078E+02	5.119E-02	1.079E+02	3.367E-01	3.365E-01	.9994
70.0000	1.016E+02	4.776E-02	1.016E+02	3.845E-01	3.842E-01	.9994
75.0000	9.607E+01	4.477E-02	9.612E+01	4.351E-01	4.348E-01	.9994
80.0000	9.119E+01	4.215E-02	9.123E+01	4.885E-01	4.882E-01	.9994
85.0000	8.683E+01	3.982E-02	8.687E+01	5.447E-01	5.444E-01	.9994
90.0000	8.291E+01	3.774E-02	8.295E+01	6.036E-01	6.033E-01	.9994
95.0000	7.936E+01	3.587E-02	7.940E+01	6.652E-01	6.649E-01	.9994
100.0000	7.614E+01	3.418E-02	7.618E+01	7.295E-01	7.291E-01	.9994

Tabelle 1 (Fortsetzung): Abbremsvermögen und Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Luft.

Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm <sup>2</sup> /g)			Range		
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm <sup>2</sup> )	Projected (g/cm <sup>2</sup> )	Detour Factor Projected/CSDA
.0010	5.580E+01	7.469E+01	1.305E+02	9.964E-06	2.529E-06	.2538
.0015	7.189E+01	7.285E+01	1.447E+02	1.358E-05	3.704E-06	.2728
.0020	8.605E+01	7.032E+01	1.564E+02	1.690E-05	4.895E-06	.2896
.0025	9.892E+01	6.773E+01	1.667E+02	1.999E-05	6.094E-06	.3048
.0030	1.109E+02	6.525E+01	1.761E+02	2.291E-05	7.300E-06	.3186
.0040	1.327E+02	6.078E+01	1.935E+02	2.832E-05	9.717E-06	.3431
.0050	1.525E+02	5.693E+01	2.095E+02	3.329E-05	1.213E-05	.3644
.0060	1.709E+02	5.361E+01	2.245E+02	3.790E-05	1.452E-05	.3832
.0070	1.882E+02	5.072E+01	2.389E+02	4.221E-05	1.689E-05	.4001
.0080	2.045E+02	4.818E+01	2.527E+02	4.628E-05	1.922E-05	.4154
.0090	2.201E+02	4.593E+01	2.661E+02	5.014E-05	2.153E-05	.4294
.0100	2.351E+02	4.391E+01	2.790E+02	5.381E-05	2.379E-05	.4422
.0125	2.701E+02	3.969E+01	3.098E+02	6.230E-05	2.931E-05	.4704
.0150	3.025E+02	3.632E+01	3.388E+02	7.001E-05	3.460E-05	.4942
.0175	3.328E+02	3.355E+01	3.664E+02	7.710E-05	3.969E-05	.5147
.0200	3.615E+02	3.124E+01	3.927E+02	8.369E-05	4.458E-05	.5327
.0225	3.886E+02	2.927E+01	4.179E+02	8.986E-05	4.929E-05	.5485
.0250	4.146E+02	2.756E+01	4.421E+02	9.567E-05	5.384E-05	.5627
.0275	4.394E+02	2.607E+01	4.655E+02	1.012E-04	5.824E-05	.5756
.0300	4.633E+02	2.475E+01	4.880E+02	1.064E-04	6.250E-05	.5872
.0350	5.084E+02	2.253E+01	5.309E+02	1.162E-04	7.064E-05	.6077
.0400	5.504E+02	2.071E+01	5.711E+02	1.253E-04	7.835E-05	.6252
.0450	5.896E+02	1.920E+01	6.088E+02	1.338E-04	8.568E-05	.6404
.0500	6.265E+02	1.792E+01	6.444E+02	1.418E-04	9.269E-05	.6538
.0550	6.611E+02	1.681E+01	6.779E+02	1.493E-04	9.941E-05	.6657
.0600	6.937E+02	1.585E+01	7.095E+02	1.565E-04	1.059E-04	.6764
.0650	7.243E+02	1.501E+01	7.393E+02	1.634E-04	1.121E-04	.6861
.0700	7.532E+02	1.426E+01	7.674E+02	1.701E-04	1.182E-04	.6949
.0750	7.803E+02	1.359E+01	7.939E+02	1.765E-04	1.241E-04	.7030
.0800	8.059E+02	1.298E+01	8.189E+02	1.827E-04	1.298E-04	.7105
.0850	8.301E+02	1.244E+01	8.425E+02	1.887E-04	1.354E-04	.7175
.0900	8.528E+02	1.194E+01	8.648E+02	1.946E-04	1.409E-04	.7240
.0950	8.743E+02	1.148E+01	8.858E+02	2.003E-04	1.462E-04	.7301
.1000	8.945E+02	1.107E+01	9.056E+02	2.059E-04	1.515E-04	.7358
.1250	9.800E+02	9.395E+00	9.894E+02	2.322E-04	1.764E-04	.7599
.1500	1.045E+03	8.198E+00	1.053E+03	2.567E-04	1.999E-04	.7788
.1750	1.096E+03	7.293E+00	1.103E+03	2.798E-04	2.222E-04	.7942
.2000	1.136E+03	6.583E+00	1.142E+03	3.021E-04	2.438E-04	.8071
.2250	1.168E+03	6.009E+00	1.174E+03	3.237E-04	2.648E-04	.8183
.2500	1.195E+03	5.535E+00	1.200E+03	3.447E-04	2.854E-04	.8280
.2750	1.216E+03	5.136E+00	1.222E+03	3.654E-04	3.056E-04	.8365
.3000	1.234E+03	4.795E+00	1.239E+03	3.857E-04	3.256E-04	.8441
.3500	1.262E+03	4.242E+00	1.266E+03	4.256E-04	3.648E-04	.8572
.4000	1.280E+03	3.811E+00	1.284E+03	4.648E-04	4.034E-04	.8680
.4500	1.291E+03	3.466E+00	1.294E+03	5.035E-04	4.417E-04	.8772
.5000	1.297E+03	3.182E+00	1.300E+03	5.421E-04	4.798E-04	.8852
.5500	1.298E+03	2.944E+00	1.301E+03	5.805E-04	5.179E-04	.8921
.6000	1.297E+03	2.742E+00	1.300E+03	6.189E-04	5.560E-04	.8982
.6500	1.293E+03	2.567E+00	1.295E+03	6.575E-04	5.942E-04	.9037
.7000	1.286E+03	2.415E+00	1.289E+03	6.962E-04	6.326E-04	.9086
.7500	1.279E+03	2.282E+00	1.281E+03	7.351E-04	6.712E-04	.9131
.8000	1.269E+03	2.163E+00	1.271E+03	7.743E-04	7.101E-04	.9171

Tabelle 2: Abbremsvermögen und Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Aluminium.

Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm <sup>2</sup> /g)			Range		
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm <sup>2</sup> )	Projected (g/cm <sup>2</sup> )	Detour Factor Projected/CSDA
.8500	1.259E+03	2.057E+00	1.261E+03	8.137E-04	7.493E-04	.9208
.9000	1.248E+03	1.961E+00	1.250E+03	8.536E-04	7.889E-04	.9242
.9500	1.237E+03	1.875E+00	1.238E+03	8.937E-04	8.289E-04	.9274
1.0000	1.225E+03	1.796E+00	1.226E+03	9.343E-04	8.692E-04	.9303
1.2500	1.161E+03	1.490E+00	1.163E+03	1.144E-03	1.077E-03	.9422
1.5000	1.098E+03	1.277E+00	1.100E+03	1.365E-03	1.298E-03	.9509
1.7500	1.039E+03	1.120E+00	1.040E+03	1.598E-03	1.531E-03	.9575
2.0000	9.849E+02	1.000E+00	9.859E+02	1.845E-03	1.777E-03	.9628
2.2500	9.376E+02	9.042E-01	9.385E+02	2.105E-03	2.036E-03	.9670
2.5000	8.954E+02	8.261E-01	8.962E+02	2.378E-03	2.308E-03	.9705
2.7500	8.568E+02	7.612E-01	8.576E+02	2.663E-03	2.592E-03	.9734
3.0000	8.210E+02	7.062E-01	8.217E+02	2.961E-03	2.890E-03	.9758
3.5000	7.561E+02	6.182E-01	7.568E+02	3.596E-03	3.523E-03	.9797
4.0000	6.986E+02	5.506E-01	6.991E+02	4.283E-03	4.209E-03	.9826
4.5000	6.478E+02	4.971E-01	6.483E+02	5.027E-03	4.951E-03	.9849
5.0000	6.048E+02	4.535E-01	6.053E+02	5.825E-03	5.748E-03	.9867
5.5000	5.678E+02	4.173E-01	5.683E+02	6.678E-03	6.600E-03	.9882
6.0000	5.357E+02	3.867E-01	5.361E+02	7.585E-03	7.504E-03	.9894
6.5000	5.074E+02	3.605E-01	5.078E+02	8.544E-03	8.462E-03	.9904
7.0000	4.824E+02	3.379E-01	4.827E+02	9.554E-03	9.470E-03	.9913
7.5000	4.600E+02	3.180E-01	4.603E+02	1.061E-02	1.053E-02	.9920
8.0000	4.398E+02	3.004E-01	4.401E+02	1.173E-02	1.164E-02	.9926
8.5000	4.216E+02	2.848E-01	4.219E+02	1.289E-02	1.280E-02	.9931
9.0000	4.051E+02	2.708E-01	4.053E+02	1.410E-02	1.401E-02	.9936
9.5000	3.899E+02	2.582E-01	3.902E+02	1.535E-02	1.526E-02	.9940
10.0000	3.760E+02	2.468E-01	3.762E+02	1.666E-02	1.656E-02	.9944
12.5000	3.205E+02	2.025E-01	3.207E+02	2.388E-02	2.378E-02	.9957
15.0000	2.807E+02	1.722E-01	2.809E+02	3.224E-02	3.212E-02	.9964
17.5000	2.507E+02	1.501E-01	2.509E+02	4.167E-02	4.155E-02	.9970
20.0000	2.271E+02	1.332E-01	2.272E+02	5.216E-02	5.202E-02	.9973
25.0000	1.922E+02	1.090E-01	1.923E+02	7.617E-02	7.601E-02	.9978
27.5000	1.789E+02	1.001E-01	1.790E+02	8.966E-02	8.948E-02	.9980
30.0000	1.675E+02	9.251E-02	1.676E+02	1.041E-01	1.039E-01	.9981
35.0000	1.489E+02	8.048E-02	1.490E+02	1.358E-01	1.356E-01	.9983
40.0000	1.344E+02	7.131E-02	1.345E+02	1.712E-01	1.709E-01	.9984
45.0000	1.227E+02	6.407E-02	1.228E+02	2.102E-01	2.098E-01	.9985
50.0000	1.131E+02	5.820E-02	1.132E+02	2.526E-01	2.523E-01	.9986
55.0000	1.050E+02	5.334E-02	1.051E+02	2.985E-01	2.981E-01	.9987
60.0000	9.812E+01	4.925E-02	9.817E+01	3.478E-01	3.473E-01	.9987
65.0000	9.217E+01	4.577E-02	9.222E+01	4.003E-01	3.999E-01	.9988
70.0000	8.697E+01	4.275E-02	8.701E+01	4.562E-01	4.556E-01	.9988
75.0000	8.239E+01	4.012E-02	8.243E+01	5.153E-01	5.147E-01	.9988
80.0000	7.831E+01	3.780E-02	7.835E+01	5.775E-01	5.768E-01	.9988
85.0000	7.467E+01	3.574E-02	7.470E+01	6.429E-01	6.422E-01	.9989
90.0000	7.138E+01	3.390E-02	7.142E+01	7.114E-01	7.106E-01	.9989
95.0000	6.841E+01	3.225E-02	6.844E+01	7.829E-01	7.820E-01	.9989
100.0000	6.570E+01	3.075E-02	6.573E+01	8.575E-01	8.565E-01	.9989

Tabelle 2 (Fortsetzung): Abbremsvermögen und Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Aluminium.

Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm <sup>2</sup> /g)			Range		
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm <sup>2</sup> )	Projected (g/cm <sup>2</sup> )	Detour Factor Projected/CSDA
.0010	1.632E+02	1.829E+02	3.461E+02	3.432E-06	1.681E-06	.4897
.0015	1.953E+02	1.680E+02	3.633E+02	4.835E-06	2.487E-06	.5144
.0020	2.218E+02	1.554E+02	3.773E+02	6.186E-06	3.310E-06	.5351
.0025	2.449E+02	1.449E+02	3.898E+02	7.489E-06	4.139E-06	.5527
.0030	2.656E+02	1.359E+02	4.015E+02	8.753E-06	4.972E-06	.5680
.0040	3.019E+02	1.215E+02	4.234E+02	1.118E-05	6.637E-06	.5938
.0050	3.335E+02	1.103E+02	4.438E+02	1.348E-05	8.292E-06	.6150
.0060	3.618E+02	1.013E+02	4.631E+02	1.569E-05	9.928E-06	.6328
.0070	3.876E+02	9.388E+01	4.815E+02	1.781E-05	1.154E-05	.6482
.0080	4.115E+02	8.764E+01	4.991E+02	1.985E-05	1.313E-05	.6618
.0090	4.338E+02	8.230E+01	5.161E+02	2.182E-05	1.470E-05	.6738
.0100	4.548E+02	7.767E+01	5.325E+02	2.372E-05	1.624E-05	.6845
.0125	5.027E+02	6.835E+01	5.711E+02	2.825E-05	1.998E-05	.7073
.0150	5.457E+02	6.127E+01	6.069E+02	3.250E-05	2.359E-05	.7258
.0175	5.848E+02	5.568E+01	6.405E+02	3.651E-05	2.706E-05	.7411
.0200	6.210E+02	5.114E+01	6.722E+02	4.032E-05	3.040E-05	.7542
.0225	6.548E+02	4.736E+01	7.022E+02	4.395E-05	3.364E-05	.7654
.0250	6.866E+02	4.416E+01	7.308E+02	4.744E-05	3.678E-05	.7753
.0275	7.167E+02	4.142E+01	7.581E+02	5.080E-05	3.983E-05	.7841
.0300	7.453E+02	3.903E+01	7.843E+02	5.404E-05	4.280E-05	.7919
.0350	7.987E+02	3.507E+01	8.338E+02	6.022E-05	4.850E-05	.8054
.0400	8.479E+02	3.191E+01	8.799E+02	6.606E-05	5.394E-05	.8166
.0450	8.938E+02	2.933E+01	9.231E+02	7.160E-05	5.916E-05	.8262
.0500	9.368E+02	2.717E+01	9.640E+02	7.690E-05	6.417E-05	.8344
.0550	9.774E+02	2.534E+01	1.003E+03	8.199E-05	6.900E-05	.8417
.0600	1.016E+03	2.376E+01	1.040E+03	8.688E-05	7.368E-05	.8480
.0650	1.052E+03	2.238E+01	1.075E+03	9.161E-05	7.821E-05	.8538
.0700	1.087E+03	2.117E+01	1.108E+03	9.619E-05	8.262E-05	.8589
.0750	1.121E+03	2.009E+01	1.141E+03	1.006E-04	8.691E-05	.8636
.0800	1.153E+03	1.913E+01	1.172E+03	1.050E-04	9.109E-05	.8678
.0850	1.183E+03	1.827E+01	1.202E+03	1.092E-04	9.517E-05	.8717
.0900	1.213E+03	1.748E+01	1.230E+03	1.133E-04	9.916E-05	.8753
.0950	1.241E+03	1.677E+01	1.258E+03	1.173E-04	1.031E-04	.8786
.1000	1.269E+03	1.612E+01	1.285E+03	1.212E-04	1.069E-04	.8817
.1250	1.393E+03	1.354E+01	1.407E+03	1.398E-04	1.250E-04	.8945
.1500	1.500E+03	1.173E+01	1.512E+03	1.569E-04	1.419E-04	.9040
.1750	1.593E+03	1.037E+01	1.603E+03	1.730E-04	1.577E-04	.9115
.2000	1.673E+03	9.315E+00	1.683E+03	1.882E-04	1.727E-04	.9176
.2250	1.744E+03	8.468E+00	1.752E+03	2.027E-04	1.871E-04	.9228
.2500	1.806E+03	7.773E+00	1.814E+03	2.168E-04	2.010E-04	.9271
.2750	1.860E+03	7.191E+00	1.868E+03	2.303E-04	2.144E-04	.9309
.3000	1.908E+03	6.696E+00	1.914E+03	2.436E-04	2.275E-04	.9342
.3500	1.985E+03	5.897E+00	1.991E+03	2.691E-04	2.529E-04	.9398
.4000	2.042E+03	5.279E+00	2.047E+03	2.939E-04	2.776E-04	.9444
.4500	2.083E+03	4.786E+00	2.087E+03	3.181E-04	3.016E-04	.9483
.5000	2.110E+03	4.382E+00	2.114E+03	3.418E-04	3.253E-04	.9516
.5500	2.126E+03	4.046E+00	2.130E+03	3.654E-04	3.487E-04	.9544
.6000	2.133E+03	3.760E+00	2.137E+03	3.888E-04	3.721E-04	.9570
.6500	2.133E+03	3.515E+00	2.136E+03	4.122E-04	3.954E-04	.9592
.7000	2.126E+03	3.301E+00	2.130E+03	4.357E-04	4.188E-04	.9612
.7500	2.115E+03	3.114E+00	2.118E+03	4.592E-04	4.422E-04	.9631
.8000	2.100E+03	2.948E+00	2.103E+03	4.829E-04	4.659E-04	.9648

Tabelle 3: Abbremsvermögen und Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Mylar.

Energy (MeV)	Stopping Power (MeV cm <sup>2</sup> /g)			Range		Detour Factor Projected/CSDA
	Electronic	Nuclear	Total	CSDA (g/cm <sup>2</sup> )	Projected (g/cm <sup>2</sup> )	
.8500	2.082E+03	2.800E+00	2.084E+03	5.068E-04	4.897E-04	.9663
.9000	2.061E+03	2.667E+00	2.064E+03	5.309E-04	5.137E-04	.9677
.9500	2.038E+03	2.547E+00	2.041E+03	5.552E-04	5.381E-04	.9691
1.0000	2.014E+03	2.437E+00	2.016E+03	5.799E-04	5.626E-04	.9703
1.2500	1.874E+03	2.013E+00	1.876E+03	7.083E-04	6.908E-04	.9753
1.5000	1.731E+03	1.720E+00	1.733E+03	8.470E-04	8.293E-04	.9791
1.7500	1.599E+03	1.506E+00	1.601E+03	9.971E-04	9.793E-04	.9821
2.0000	1.482E+03	1.341E+00	1.483E+03	1.159E-03	1.141E-03	.9844
2.2500	1.379E+03	1.210E+00	1.380E+03	1.334E-03	1.316E-03	.9863
2.5000	1.290E+03	1.104E+00	1.291E+03	1.522E-03	1.503E-03	.9879
2.7500	1.215E+03	1.016E+00	1.216E+03	1.721E-03	1.703E-03	.9892
3.0000	1.148E+03	9.414E-01	1.149E+03	1.933E-03	1.914E-03	.9903
3.5000	1.038E+03	8.223E-01	1.038E+03	2.391E-03	2.372E-03	.9920
4.0000	9.485E+02	7.311E-01	9.492E+02	2.896E-03	2.876E-03	.9932
4.5000	8.753E+02	6.590E-01	8.759E+02	3.445E-03	3.425E-03	.9942
5.0000	8.138E+02	6.004E-01	8.144E+02	4.037E-03	4.017E-03	.9949
5.5000	7.615E+02	5.517E-01	7.620E+02	4.672E-03	4.651E-03	.9955
6.0000	7.163E+02	5.107E-01	7.168E+02	5.349E-03	5.328E-03	.9960
6.5000	6.766E+02	4.757E-01	6.771E+02	6.067E-03	6.045E-03	.9964
7.0000	6.416E+02	4.453E-01	6.421E+02	6.826E-03	6.803E-03	.9967
7.5000	6.105E+02	4.188E-01	6.109E+02	7.624E-03	7.602E-03	.9970
8.0000	5.825E+02	3.953E-01	5.829E+02	8.462E-03	8.439E-03	.9972
8.5000	5.573E+02	3.745E-01	5.577E+02	9.340E-03	9.316E-03	.9974
9.0000	5.344E+02	3.558E-01	5.348E+02	1.026E-02	1.023E-02	.9976
9.5000	5.136E+02	3.390E-01	5.139E+02	1.121E-02	1.118E-02	.9978
10.0000	4.945E+02	3.238E-01	4.948E+02	1.220E-02	1.218E-02	.9979
12.5000	4.186E+02	2.650E-01	4.189E+02	1.771E-02	1.769E-02	.9984
15.0000	3.645E+02	2.248E-01	3.647E+02	2.413E-02	2.410E-02	.9987
17.5000	3.238E+02	1.955E-01	3.240E+02	3.142E-02	3.138E-02	.9989
20.0000	2.920E+02	1.732E-01	2.922E+02	3.955E-02	3.951E-02	.9990
25.0000	2.452E+02	1.413E-01	2.454E+02	5.831E-02	5.826E-02	.9992
27.5000	2.275E+02	1.295E-01	2.276E+02	6.889E-02	6.884E-02	.9992
30.0000	2.123E+02	1.195E-01	2.124E+02	8.027E-02	8.021E-02	.9993
35.0000	1.878E+02	1.037E-01	1.879E+02	1.053E-01	1.053E-01	.9993
40.0000	1.688E+02	9.168E-02	1.689E+02	1.335E-01	1.334E-01	.9994
45.0000	1.536E+02	8.221E-02	1.536E+02	1.645E-01	1.644E-01	.9994
50.0000	1.411E+02	7.454E-02	1.411E+02	1.985E-01	1.984E-01	.9994
55.0000	1.306E+02	6.819E-02	1.307E+02	2.354E-01	2.353E-01	.9995
60.0000	1.217E+02	6.286E-02	1.218E+02	2.750E-01	2.749E-01	.9995
65.0000	1.141E+02	5.831E-02	1.142E+02	3.175E-01	3.173E-01	.9995
70.0000	1.075E+02	5.439E-02	1.075E+02	3.626E-01	3.624E-01	.9995
75.0000	1.016E+02	5.097E-02	1.017E+02	4.105E-01	4.103E-01	.9995
80.0000	9.642E+01	4.796E-02	9.647E+01	4.610E-01	4.608E-01	.9995
85.0000	9.180E+01	4.529E-02	9.184E+01	5.141E-01	5.139E-01	.9995
90.0000	8.764E+01	4.291E-02	8.768E+01	5.699E-01	5.696E-01	.9995
95.0000	8.388E+01	4.077E-02	8.392E+01	6.282E-01	6.279E-01	.9995
100.0000	8.046E+01	3.884E-02	8.050E+01	6.890E-01	6.887E-01	.9995

Tabelle 3 (Fortsetzung): Abbremsvermögen und Reichweite von  $\alpha$ -Teilchen in Mylar.