

# Streuung langsamer Neutronen an Lanthan und Cer

K. Knopf und W. Waschkowski

Fakultät für Physik der Technischen Universität München, Reaktorstation Garching  
D-8046 Garching

Z. Naturforsch. **37a**, 1132–1138 (1982); eingegangen am 30. Juni 1982

Herrn Prof. Dr. L. Koester zum 60. Geburtstag gewidmet

Scattering of Slow Neutrons by Lanthanum and Cerium

The coherent scattering lengths  $b$  for the bound atom were measured by the Christiansen filter technique for natural Lanthanum and Cerium and the Cerium isotopes. In addition the free scattering cross sections at zero neutron energy could be determined. We obtained the following data:

$$\begin{aligned} b^{(\text{natLa})} &= 8,24 (4) \text{ fm}, \\ b^{(\text{natCe})} &= 4,84 (2) \text{ fm}, \\ b^{(136\text{Ce})} &= 5,76 (9) \text{ fm}, \\ b^{(138\text{Ce})} &= 6,65 (9) \text{ fm}, \\ b^{(140\text{Ce})} &= 4,81 (9) \text{ fm}, \\ b^{(142\text{Ce})} &= 4,72 (9) \text{ fm}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_s(E = 0) &= 10,02 (22) \text{ b}, \\ \text{La} & \\ \sigma_s(E = 0) &= 3,01 (5) \text{ b}, \\ \text{Ce} & \end{aligned}$$

By comparison with the resonance parameters the potential radii could be derived and discussed.

## 1. Einleitung

Mit dieser Arbeit wird die Serie der Bestimmungen der kohärenten Streulängen und des Streuwirkungsquerschnittes für Neutronen im eV-Bereich fortgeführt. Die am FRM (Schwimmbadreaktor mit 4 MW thermischer Leistung) routinemäßig praktizierten Meßverfahren lieferten auch diesmal wieder nahezu komplette Sätze der Streuparameter für niedrige Energien.

Für La konnten die Literaturwerte für die kohärente Streulänge und den Streuwirkungsquerschnitt bestätigt werden, wobei die vorliegenden Messungen die bisher höchste Genauigkeit besitzen. Für Ce waren die bisherigen Daten lückenhaft oder mit größeren Fehlern behaftet. Die vorliegenden Meßwerte bilden einen konsistenten Datensatz.

Lanthan und Cer sind physikalisch interessant, weil je ein Isotop zu den Isotonen der magischen Zahl  $N=82$  gehört und damit ein Beitrag zur Diskussion des Schalenmodells des Atomkerns geliefert wird.

Andererseits liegt die Massenzahl  $A=140$  dicht unterhalb der 2ten Oszillation des optischen Modells

für die Potentialstreuolänge. Diese Arbeit vertieft die Kenntnis über die Potentialstreuung in diesem Massenbereich und bestätigt die theoretischen Ansätze.

## 2. Messungen der kohärenten Streulänge

Die Messungen der kohärenten Streulänge erfolgten nach der Christiansen-Filtertechnik, wie sie im Detail in [1–4] beschrieben ist. Dabei wird die Pulverprobe der Moleküldichte  $N$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] mit einem Flüssigkeitsgemisch bekannter Streulängendichte ( $\text{Nb}$ )<sub>F</sub> aufgefüllt und von einem Strahl langsamer Neutronen (Neutronenleiter mit  $E_n = 0,57 \text{ meV}$ )

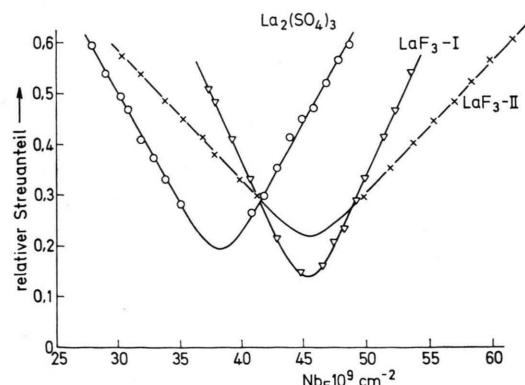


Abb. 1. Streukurven von Christiansen-Filtern für  $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$  und  $\text{LaF}_3$ .  $\text{LaF}_3 - \text{I}$  Pulver: 5 – 20 micron;  $\text{LaF}_3 - \text{II}$  Pulver: 30 – 100 micron.

0340-4811 / 82 / 1000-1132 \$ 01.30/0. — Please order a reprint rather than making your own copy.



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

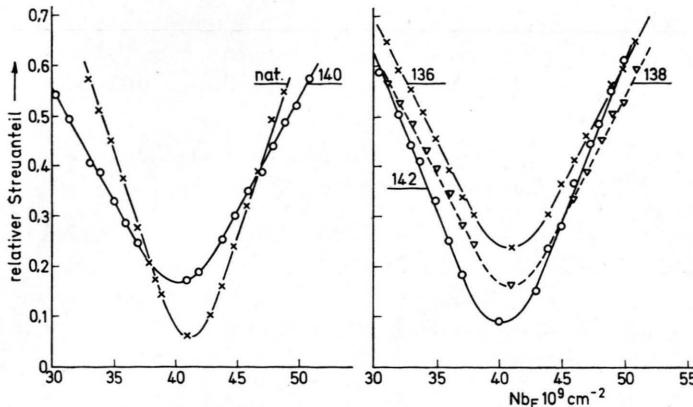


Abb. 2. Streukurven von Christiansen-Filtern für  $^{nat}\text{CeO}_2$ ,  $^{136}\text{CeO}_2$ ,  $^{138}\text{CeO}_2$ ,  $^{140}\text{CeO}_2$ , und  $^{142}\text{CeO}_2$ .

durchsetzt. Die Neutronen unterliegen einer Kleinwinkelstreuung am Pulverkorn, solange die Streudichte von Probenmaterial ( $\text{Nb}_P$ ) und von Flüssigkeitsgemisch ( $\text{Nb}_F$ ) differieren. Erreicht man durch Konzentrationsvariation der organischen Flüssigkeitskomponenten von  $\text{C}_6\text{D}_6$  und  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  Streudichten-Gleichheit, verschwindet die Kleinwinkelstreuung. Dieser Gleichgewichtspunkt kann recht genau durch Extrapolation der Kurvenflanken (siehe hierzu auch Abb. 1) gefunden und daraus die gesuchte Streulänge des Pulvers errechnet werden.

Die Abb. 1 und 2 zeigen die Meßkurven an den La-Verbindungen, einem natürlichen Ceroxyd und

den isotopenangereicherten Ceroxyden. Aus Tab. 1 sind der Reinheitsgrad, die Isotopenhäufigkeit, die spezifische Dichte sowie die Streudichte und -länge ersichtlich. Alle Proben, auch das  $\text{LaF}_3$ , das als wasserfrei vorlag, wurden bei  $1100^\circ\text{C}$  getrocknet und mit Sorgfalt in Argonatmosphäre gehandhabt. Die pyknometrischen Dichtebestimmungen erfolgten bei  $20^\circ\text{C}$  unter  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ .

### 3. Messung der totalen Wirkungsquerschnitte

Die totalen Wirkungsquerschnitte wurden bei den Neutronenenergien 5,19 eV, 1,26 eV und 0,57 meV mittels Transmissionsmessungen in guter Anordnung

Tab. 1. Physikalische Daten der Proben und Ergebnisse der Streulängenmessung. Zur Auswertung wurden verwendet:  $b_0 = 5,805$  (4) fm [4],  $b_F = 5,654$  (10) fm [4],  $b_S = 2,847$  (1) fm [7].

| Probe  | Reinheit % | Häufigkeit der Massenzahl      | pykn. Dichte bei $20^\circ\text{C}$ g/cm <sup>3</sup> | $(\text{Nb})_P$ $10^9/\text{cm}^2$ | $b_{\text{Molek\"ul}}$ fm | $b_{\text{Atom}}$ fm                         |
|--|------------|--------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------|--|
|  |            | 138      139                   |   |                                    |                           |  |
| natLaF <sub>3</sub> -I                             | 99,99      | 0,00089                        | 0,99911   | 5,839 (2)                          | 45,28 (8)                 | 25,23 (4)                                    |
| natLaF <sub>3</sub> -II                            | 99,99      |                                |   | 5,882 (2)                          | 45,50 (7)                 | 25,16 (4)                                    |
| natLa <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 99,99      |                                |   | 3,802 (5)                          | 38,32 (7)                 | 94,74 (21)                                   |
| natLa <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | 99,99      |                                |   | 3,797 (6)                          | 38,27 (6)                 | 94,72 (21)                                   |
|  |            |                                |   |                                    |                           | gewichtetes Mittel: $\bar{b} = 8,24$ (4)     |
|  |            | 136      138      140      142 |   |                                    |                           |  |
| natCeO <sub>2</sub> -I                             | 99,9       | 0,0019                         | 0,0025  | 0,8848                             | 0,1107                    | 6,787 (5)                                    |
| natCeO <sub>2</sub> -I                             | 99,9       |                                |   |                                    |                           | 7,005 (20)                                   |
| natCeO <sub>2</sub> -II                            | 99,9       |                                |   |                                    |                           | 6,943 (3)                                    |
| natCeO <sub>2</sub> -III                           | 99,99      |                                |   |                                    |                           | 7,159 (6)                                    |
|  |            |                                |   |                                    |                           | gewichtetes Mittel: $\bar{b} = 4,84$ (2)     |
| 136CeO <sub>2</sub>                                | 99,70      | 0,243                          | 0,011   | 0,697                              | 0,049                     | 6,968 (36)                                   |
| 138CeO <sub>2</sub>                                | 99,54      | 0,003                          | 0,131   | 0,830                              | 0,036                     | 6,997 (36)                                   |
| 140CeO <sub>2</sub>                                | 99,42      | —                              | —   | 0,982                              | 0,018                     | 7,006 (36)                                   |
| 142CeO <sub>2</sub>                                | 99,49      | —                              | —   | 0,103                              | 0,897                     | 7,078 (36)                                   |
|  |            |                                |   |                                    |                           | $\sum h_i^{\text{nat}} \cdot b_i = 4,81$ (8) |

bestimmt. Die Neutronen im eV-Bereich stammen aus einem Kadmium-gefilterten Reaktorstrahl und werden von quasikontinuierlich arbeitenden Resonanzaktivierungsdetektoren nachgewiesen. Dabei wird eine rotierende Detektorscheibe aus Silber ( $E_{\text{res}} = 5,19 \text{ eV}$ ) bzw. aus Rhodium ( $E_{\text{res}} = 1,26 \text{ eV}$ ) vom Neutronenstrahl an einer Stelle der Randzone aktiviert und diametral entgegengesetzt mit Zählrohren vermessen. Die ausführliche Beschreibung dieser Apparatur befindet sich in [3]. Eine hohe Energieselektivität erreicht man durch Differenzmessungen zweier gleichartiger hintereinanderstehender Meßstellen [5]. Durch eine Monitorisierung werden eventuelle Schwankungen in der Neutronenintensität ausgeglichen.

Für die Transmissionsmessungen bei  $0,57 \text{ meV}$  diente die gleiche Apparatur wie für die Christiansenfiltermessungen [6]. Die mittlere Neutronenergie wurde durch Transmissionsmessungen an Au mit gut bekannter  $1/v$ -Absorption bestimmt. Die Kleinwinkelstreuung am Probenmaterial braucht nicht korrigiert zu werden, da sie durch geeignete Position der Probe eliminiert wird.

Zur Vermeidung von Aufnahme von Luftfeuchtigkeit wurden die Proben unter Ar-Atmosphäre in wohlvermessene Küvetten abgefüllt und kamen in geschlossenen Boxen zur Messung.

Wegen der erforderlichen Probenmenge ließen sich die Transmissionsmessungen nur an Substanzen mit natürlicher Isotopenhäufigkeit durchführen.

#### 4. Ergebnisse der Streulängen- und Wirkungsquerschnittsmessungen

Die Ergebnisse der Streulängenmessungen sind in Tab. 1 und die der Wirkungsquerschnittsmessungen in Tab. 2 aufgelistet. Die Auswertung der Transmissionsmessungen bei  $1,26 \text{ eV}$  und  $5,19 \text{ eV}$  erfolgt in Tabelle 3.

##### 4.1. Lanthan

Gemessen an den Verbindungen  $\text{LaF}_3$  und  $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$  ergeben sich für das natürliche Lanthan übereinstimmende Streulängenwerte, deren Mittelwert, mit den Fehlern der Einzelmessungen gewichtet,

$$b(\text{La}) = 8,24(4) \text{ fm}$$

ergibt. Dieser Wert stimmt mit den Literaturwerten überein, trägt jedoch den kleinsten Fehler:

$$b = 8,32(14) \text{ fm} [8]$$

und

$$b = 8,3(3) \text{ fm} [9].$$

Tab. 2.  
Ergebnisse der Transmissionsmessungen.  
Zur Auswertung wurden verwendet:

|    | $1,26 \text{ eV}$<br>$\sigma_{\text{tot}} b$ | $5,19 \text{ eV}$<br>$\sigma_{\text{tot}} b$ |
|----|--|--|
| O: | 3,757 (8)                                    | 3,760 (8) [4]                                |
| F: | 3,641 (1)                                    | 3,641 (1) [4]                                |
| S: | 1,052 (3)                                    | 1,021 (2) [5]                                |

Die Absorption wurde mit einem  $(1/v)$ -Gang von  $\sigma_a = 8,97(5) \text{ b}$  [10] auf  $E_n = 0,57 \text{ meV}$  hochgerechnet.

| Probe                        | Reinheit<br>(%) | $E_n: 0,57 \text{ meV}$ |                            | totaler Wirkungsquerschnitt $b$  |                                  |                               |                   | (Korrektur)       |
|------------------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|
|                              |                 | $\sigma_{\text{abs}}$   | $\sigma_{\text{gemessen}}$ | $1,26 \text{ eV}$<br>pro Molekül | $5,19 \text{ eV}$<br>pro Molekül | $1,26 \text{ eV}$<br>pro Atom | $5,19 \text{ eV}$ |                   |
| $\text{La}_2\text{O}_3$      | 99,99           | 120 (1)                 | 124 (1)                    | 32,59 (14)                       | 29,56 (14)                       | 10,65 (7)                     | 9,14 (7)          |                   |
| $\text{La F}_3$ wasserfrei   | 99,99           | 59,8 (5)                | 63,8 (3)                   | 21,57 (4)                        | 20,00 (5)                        | 10,65 (6)                     | 9,08 (7)          |                   |
| $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ | 99,99           | 126 (1)                 | —                          | 69,5 (5)                         | 66,4 (5)                         | 10,61 (27)                    | 9,14 (25)         |                   |
|                              |                 |                         |                            | arithm. Mittel 10,64 (5)         |                                  |                               |                   | 9,12 (5)          |
| $\text{CeO}_2$               | 99,99           | 4,2 (3)                 | 20,4 (4)                   | 10,72 (6)                        | 10,85 (5)                        | 3,20 (6)                      | -0,11 (5)         | [3,34 (6)] *      |
|                              |                 |                         |                            | 10,72 (6)                        | 10,87 (5)                        | 3,20 (6)                      | -0,11 (5)         | [3,36 (6)]        |
| $\text{CeF}_2$ wasserfrei    | 99,99           | 4,2 (3)                 | 21,1 (2)                   | 14,15 (4)                        | 14,15 (5)                        | 3,23 (4)                      | -0,11 (5)         | 3,23 (4)-0,11 (5) |
|                              |                 |                         |                            | arithm. Mittel                   |                                  |                               |                   | 3,10 (5) 3,12 (6) |

\* wegen einer Sm-Verunreinigung nicht zur Auswertung herangezogen.

|   | $E_n$  | La                         |            | Ce         |           |
|---|--|----------------------------|------------|------------|-----------|
|   |  | 1,26 eV                    | 5,19 eV    | 1,26 eV    | 5,19 eV   |
| $\sigma_{\text{tot}}$                   | $b$  | 10,64 (5)                  | 9,12 (5)   | 3,10 (5)   | 3,12 (6)  |
| $\sigma_{\text{abs}}$                   | $b$  | (Ref. [10])                | -1,29 (6)  | -0,63 (3)  | -0,09 (1) |
| $\sigma_{S,\text{frei}}$                | $b$  |                            | 9,35 (8)   | 8,49 (6)   | 3,01 (5)  |
| $\sigma_{S,\text{geb}}$                 | $b$  |                            | 9,49 (8)   | 8,61 (6)   | 3,05 (5)  |
| $\Delta\sigma_{\text{res}}$             | $b$  |                            | 0,00       | 0,00       | 0,00      |
| $\sigma_{\text{inc}}$                   | $b$  | 1,49 (20)<br>bei $E_n = 0$ | -1,41 (19) | -1,19 (16) | 0,00      |
| $b_{\text{Kern}}$                       | $\sqrt{\frac{\sigma_{\text{coh, geb}}}{4\pi}}$ | fm                         | 8,02 (10)  | 7,68 (9)   | 4,92 (4)  |
| $b_{\text{Atom (E)}}$                   |  | fm                         | 7,95 (10)  | 7,61 (9)   | 4,85 (4)  |
| $b_{\text{Atom berechnet aus }} b_A(0)$ |  | 8,14                       | 7,86       | 4,85 (2)   | 4,85 (2)  |

Tab. 3. Auswertung der Transmissionsmessungen.

Lanthan besteht zu über 99,9% aus dem Isotop mit der Massenzahl 139; das restliche Isotop der Masse 138 ist nicht vermessen worden.

Der totale Wirkungsquerschnitt bei  $E_n = 0,57$  eV ergibt sich zu

$$\sigma_{\text{tot}}(\text{La}) = (62,5 \pm 1,0) \text{ b}.$$

Dieser Wert läßt sich fast vollständig mit der Absorption von  $\sigma_{\text{abs}} = 8,97(5)$  b [10] erklären, wenn der Energieabhängigkeit der  $1/v$ -Gang zu Grunde gelegt wird. Nachdem  $\sigma_{\text{inc}} = (1,5 \pm 0,2)$  b beträgt [10] und die inelastische Streuung nach der Debye-Approximation gemäß [1] und [11] zu  $\sigma_{\text{inel}} = 0,23$  b abgeschätzt werden kann, bleibt für Verunreinigungen  $\sigma_{\text{verunr.}} = \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{abs}} - \sigma_{\text{inc}} - \sigma_{\text{inel}} \approx 0,5$  b übrig. Das bedeutet, daß Verunreinigungen der Lanthaniden wie Sm, Eu oder Gd, die einen sehr großen Absorptionswirkungsquerschnitt besitzen, im Probenmaterial nicht eindeutig nachweisbar sind und lediglich in geringerer Konzentration als maximal 10 ppm vorkommen können.

Mit oben genanntem Absorptionswert aus dem BNL 325 liefert die Transmissionsmessung mit eV-Neutronen folgende Daten:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{tot}}(1,26 \text{ eV}) \\ = 10,64(5) \text{ b} : \sigma_S(1,26 \text{ eV}) = 9,35(8) \text{ b}\end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{tot}}(5,19 \text{ eV}) \\ = 9,12(5) \text{ b} : \sigma_S(5,19 \text{ eV}) = 8,49(6) \text{ b}.\end{aligned}$$

Die Streuwirkungsquerschnitte zeigen eine auffällige Energieabhängigkeit und sind wegen der Resonanzeffekte (am meisten trägt der gebundene Zustand bei -48,6 eV, also dicht unterhalb des Nullpunktes hierzu bei) nicht direkt mit dem Literaturwert [10]

von  $\sigma_{S(E=0)} = 10,13(22)$  b vergleichbar. Schlägt man den umgekehrten Weg von Tab. 3 ein, erhält man ausgehend von der direkten Streulängenmessung unter Berücksichtigung der Neutron-Elektron-Wechselwirkung und der Inkohärenz einen freien Streuwirkungsquerschnitt von

$$\begin{aligned}\sigma_{S(0 \text{ eV})} = \{4\pi[b + (1-Zf)b_{ne}]^2 \\ + \sigma_{\text{inc}}\} \left(\frac{A}{A+1}\right)^2 = 10,02(22) \text{ b}.\end{aligned}$$

Darin ist  $Z$  die Ladungszahl des Kerns,  $f$  der durch Röntgenstrukturanalyse bestimmte Formfaktor der Elektronenhülle und  $b_{ne} = -1,38(2) \cdot 10^{-3}$  fm [12] die Neutron-Elektron-Streulänge.

Die Korrekturen für Doppler-Effekte, Interferenz und Schwingerstreuung sind so klein, daß sie bei der hier auftretenden Fehlergröße vernachlässigbar werden.

Vollzieht man die Auswertung der Transmissionsmessungen gemäß Tab. 3 weiter, so bewirken die Resonanzen bei positiver Neutronenenergie eine vernachlässigbar kleine Korrektur am Wirkungsquerschnitt. Bedingt durch den gebundenen Zustand bei  $E_n = -48,6$  eV zeigt der inkohärente Wirkungsquerschnitt eine wenn auch schwache Energieabhängigkeit. Dies führt zu einer Streulänge  $b^* = \sqrt{\sigma_{\text{coh}}/4\pi}$ , die wegen des ne-Beitrages nur um  $\Delta b = 0,01$  fm kleiner ist als die Streulänge des gebundenen Kerns  $b_K$ . Korrigiert mit  $Z b_{ne}$  erhält man eine Atomstreuulänge für die jeweilige Meßenergie. Diese Werte sind zu vergleichen mit der Atomstreuulänge bei  $E_n = 0$ , die mit der Energieabhängigkeit des Resonanzbeitrages auf die Meßenergie mit

$$\Delta b = b_{(0 \text{ eV})} - b_{(E)} = \frac{\bar{\lambda}}{2} \sum_i \Gamma_{ni} \left( \frac{1}{E_{\text{resi}}} - \frac{1}{E - E_{\text{resi}}} \right)$$

umgerechnet ist. Hierbei gehen sowohl der Fehler der Resonanzbreite  $\Gamma_n$  wie auch der der Energielage  $E_{\text{res}}$  ein, die beide für den gebundenen Zustand, der den Hauptanteil der Korrektur ausmacht, in BNL nicht angegeben sind.

Aus der Differenz  $\Delta b$  zur letzten Zeile von Tab. 3 könnte die Resonanzbreite oder -lage korrigiert werden.

#### 4.2. Cer

Für die Ceroxydproben der natürlichen Isotopenzusammensetzung teils mit unterschiedlicher Reinheit, teils mit verschiedener Pulverkorngröße ergaben sich innerhalb der Standardabweichung übereinstimmende Werte für die kohärente Atomstreu-länge. Der gewichtete Mittelwert

$$b(^{\text{nat}}\text{Ce}) = 4,84(2) \text{ fm}$$

steht in Übereinstimmung mit den folgenden Literaturwerten

$$\begin{aligned} b &= 4,8(2) \text{ fm [13]}, \quad 4,82(6) \text{ fm [14]}, \\ &\quad 4,84(6) \text{ fm [8]}, \quad 4,6(2) \text{ fm [9]}. \end{aligned}$$

Von den Isotopen mit den Massenzahlen 136 und 138 gab es bisher keine Streulängendaten.

Die aus den Meßwerten durch Ausgleichsrechnung erhaltenen Streulängen lauten im Vergleich zu Referenzen:

$$\begin{aligned} b(^{136}\text{Ce}) &= 5,76(9) \text{ fm}, \quad - \\ b(^{138}\text{Ce}) &= 6,65(9) \text{ fm}, \quad - \\ b(^{140}\text{Ce}) &= 4,81(9) \text{ fm}, \quad 4,7(1) \text{ fm [9]}, \\ b(^{142}\text{Ce}) &= 4,72(9) \text{ fm}, \quad 4,5(2) \text{ fm [9]}. \end{aligned}$$

Mit der natürlichen Häufigkeit gewichtet, resultiert daraus in Übereinstimmung mit obigem Wert eine Streulänge von  $b(^{\text{nat}}\text{Ce}) = 4,81(8) \text{ fm}$ .

Die größeren Fehler stammen hauptsächlich aus der Dichtemessung an den nur geringen Probenmengen.

Nachdem die stabilen Cerisotope alle gg-Kern haben, gibt es keine Spininkohärenz. Die Isotopeninkohärenz kann mit den natürlichen Häufigkeiten  $h$  und oben genannten Streulängen zu

$$\sigma_{\text{inc}}^{\text{iso}} = 2 \pi \sum_{k=1}^4 \sum_{l=1}^4 h_k h_l (b_k - b_l)^2 = 1,4(2) \text{ mb}$$

berechnet werden.

Die Transmissionsmessungen bei 0,57 meV ergeben sowohl für das  $\text{CeO}_2$  als auch für das  $\text{CeF}_2$  einen

totalen Wirkungsquerschnitt von

$$\sigma_{\text{tot}}(0,57 \text{ meV}) = 20,5(5) \text{ b}.$$

Die Absorption für das natürliche Cer ist im BNL [10] mit

$$\sigma_{\text{abs}}(0,0253 \text{ eV}) = 0,63(4) \text{ b}$$

angegeben und verhält sich konsistent mit den Absorptionswirkungsquerschnitten der einzelnen Isotope. Unter Voraussetzung eines  $1/v$ -Gangs in der Absorption und der inelastischen Streuung erhält man für den Beitrag von Verunreinigungen

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{verunr.}} &= \sigma_{\text{tot}} - \sigma_{\text{abs}} - \sigma_{\text{inc}} - \sigma_{\text{inel}} - \\ &= 20,5 - 4,2 - 0 - 0,2 = 16,1(6) \text{ b}. \end{aligned}$$

Wegen der Verwendung von  $\text{CeF}_2$  als wasserfrei und einer zusätzlichen Trocknung ist eine Wasserkontamination in diesem Ausmaß auszuschließen. Dieser Effekt lässt sich lediglich durch eine Verunreinigung mit schwer abzutrennenden seltenen Erden wie z. B. Sm, Eu oder Gd erklären. Mit einer erforderlichen Konzentration von  $\psi = 6(3) \cdot 10^{-5} \text{ g Eu/g}$  ergibt sich eine Wirkungsquerschnittskorrektur von  $\Delta \sigma_{\text{verunr.}} = -0,11(5) \text{ b}$  bei 1,26 eV und 5,19 eV für das Cerfluorid. Diese Verunreinigung hat eine Streulängenkorrektur von nur  $\Delta \alpha = -0,0001 \text{ fm}$  zur Folge. Beim  $\text{CeO}_2$  erkennt man in Tab. 2 einen deutlichen Resonanzeffekt der auf eine zusätzliche Sm-Kontamination hindeutet, dieser Meßwert wurde wegen zu unsicherer Aussage nicht zur Auswertung mit herangezogen. Damit erhält man:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}}(1,26 \text{ eV}) &= 3,10(5) \text{ b} : \sigma_S = 3,01(5) \text{ b}, \\ \sigma_{\text{tot}}(5,19 \text{ eV}) &= 3,12(5) \text{ b} : \sigma_S = 3,08(6) \text{ b}. \end{aligned}$$

Da Resonanzkorrekturen und Inkohärenz vernachlässigbar sind, ergeben sich gemäß Tab. 3 folgende Streulängen für das gebundene Ceratom:

$$\text{bei } 1,26 \text{ eV: } b = 4,85(4) \text{ fm},$$

$$\text{bei } 5,19 \text{ eV: } b = 4,92(4) \text{ fm}.$$

Der höhere Wert bei 5,19 eV deutet auf eine noch nicht völlig erfaßte Resonanzkorrektur irgendwelcher Verunreinigungen hin. Bei  $E_n = 1,26 \text{ eV}$  ist eine volle Übereinstimmung mit der direkten Streulängenmessung erreicht.

#### 5. Ermittlung der Potentialstreulänge

##### 5.1. Lanthan

Von La gibt es einen gut vermessenen Satz von Resonanzparametern. Schreibt man die gemessene

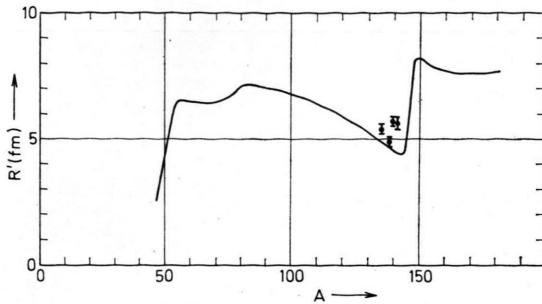


Abb. 3. Verlauf der Potentialstreuulänge  $R'$  über der Massenzahl  $A$  nach dem deformierten optischen Modell. Die in der Berechnung verwendeten Parameter lauten:  $V_0 = 43,5$  MeV,  $r_0 = 1,35$  fm,  $V_{s0} = 8$  MeV und  $W_D = 5,4$  MeV [10].

Streulänge dem zu über 99,9% vorkommenden Isotop der Masse 139 zu, kann man unter Verwendung der Resonanzparameter die freie Potentialstreuulänge

$$R' = a_{coh} - a_{res} = a_{coh} - \frac{0,286 \cdot 10^{-8}}{8\pi g} \sum \frac{2g \Gamma_n^0}{E - E_{res}} \left( \frac{A}{A+1} \right)$$

ermitteln. Den Hauptbeitrag zu  $a_{res}$  liefert der gebundene Zustand bei  $E_n = -48,6$  eV, der außerdem eine deutlich sichtbare Energieabhängigkeit sowohl in  $a_{res}$  wie auch in  $\sigma_{inc}$  verursacht. Für  $^{139}\text{La}$  ergibt sich

$$R' = 4,6(2) \text{ fm},$$

wobei der Fehler wegen der unbekannten Fehlerbreite der reduzierten Resonanzbreite auf 0,2 fm geschätzt ist. Dieser Wert des Potentialstreuradius stimmt mit dem Literaturwert  $R' = 5,0(2)$  fm [10] überein und liegt, wie Abb. 3 zeigt, auf der Kurve des deformierten Kernmodells.

Konsistent mit diesen Betrachtungen sind die Werte für die Spinzustandsstreuulängen für die Energie  $E_n \rightarrow 0$ :

$$b_+ = 11,4(3) \text{ fm} \quad \text{und} \quad b_- = 4,5(4) \text{ fm}.$$

Für die Energieabhängigkeit der Inkohärenz ergibt sich:

$$\frac{\sigma_{inc}(0 \text{ eV})}{\sigma_{inc}(1,26 \text{ eV})} = 1,06 \quad \text{und}$$

$$\frac{\sigma_{inc}(0 \text{ eV})}{\sigma_{inc}(5,19 \text{ eV})} = 1,25.$$

- [1] L. Koester, Neutron Scattering Lengths and Fundamental Neutron Interactions, Springer Tracts in Mod. Phys. **80**, (1977).
- [2] L. Koester u. K. Knopf, Z. Naturforsch. **26a**, 391 (1971) und **27a**, 901 (1972).

## 5.2. Cer

Beim Cer sind die Resonanzparameter nicht vollständig bekannt, so daß man für Detailaussagen Zusatzannahmen machen muß. Setzt man bei  $^{136}\text{Ce}$  für die Hauptresonanzen s-Streuung voraus, ergibt sich ein Potentialstreuuradius von

$$R'(^{136}\text{Ce}) = 5,3(2) \text{ fm}.$$

Ein Literaturwert zum Vergleich ist nicht bekannt.

Von  $^{138}\text{Ce}$  sind überhaupt keine Resonanzen vermessen. Der große Wert  $b = 6,65(9)$  fm müßte im Vergleich zur Potentialstreuulänge benachbarter Kerne durch einen Resonanzbeitrag, stammend von einem oder mehreren gebundenen Zuständen, um  $b \approx 1,5$  fm korrigiert werden. Das bedeutet ein Verhältnis von reduzierter Resonanzbreite zur Resonanzenergie von

$$\Sigma 2g \Gamma_n^0 / E_{res} = -1,3 \cdot 10^{-3}.$$

$^{140}\text{Ce}$  ist das häufigste Ce-Isotop, demzufolge die Resonanzparameter gut vermessen und Spinzustände und Momente angegeben sind. Unter der Addition der ( $l=0$ )-Zustände erhält man einen freien Potentialstreuuradius von

$$R'(^{140}\text{Ce}) = 5,6(2) \text{ fm},$$

der gegenüber  $R'$ -Werten benachbarter Kerne geringfügig zu groß erscheint und auf weitere gebundene Zustände oder auf falsche Energielage oder falsche Breite der bei  $E_n = -64$  eV angegebenen Resonanz hindeutet. Der Literaturwert lautet  $R'(^{140}\text{Ce}) = 5,7(5)$  fm [10].

Auch beim  $^{142}\text{Ce}$  sind die Momente und Spinzustände nicht mit angegeben. Ordnet man der Resonanz bei 1,29 keV den Wert  $l=0$  zu, erhält man  $R'(^{142}\text{Ce}) = 5,5(3)$  fm, der ebenfalls zum Literaturwert  $R' = 5,9(7)$  fm [10] paßt.

Wegen fehlender Streuwirkungsquerschnittsmessungen können keine Angaben für die Spinzustandsstreuulängen  $b_+$  und  $b_-$  für die Ce-Isotope gemacht werden.

Wir danken der Reaktorbelegschaft für hilfreiche Unterstützung bei dieser Arbeit.

- [3] L. Koester, K. Knopf u. W. Waschkowski, Z. Phys. A **277**, 77 (1976).
- [4] L. Koester, K. Knopf u. W. Waschkowski, Z. Phys. A **292**, 95 (1979).
- [5] W. Waschkowski u. L. Koester, Z. Naturforsch. **31a**, 115 (1976).

- [6] L. Koester u. P. Schacht, Z. angew. Phys. **31**, 21 (1971).
- [7] W. D. Trüstedt, Z. Naturforsch. **96a**, 400 (1971).
- [8] Atoji, J. Chem. Phys. **35**, 1950 (1961).
- [9] Koehler, Phys. Rev. **91**, 597 (1953).
- [10] Mughabghab, e.a. BNL Part A, Academic Press, New York 1981.
- [11] K. Binder, Phys. Stat. Sol. **41**, 767 (1970).
- [12] L. Koester, W. Nistler u. W. Waschkowski, Phys. Rev. Let. **26**, 1021 (1976).
- [13] Adib, Atomkernenergie **33**, 212 (1979).
- [14] Valentine, Harwell-Reports, AERE-R-4939 (1965).