

**Zeitschrift:** Helvetica Physica Acta  
**Band:** 36 (1963)  
**Heft:** IV  
  
**Artikel:** Die Reaktionen  $\text{Li}^6(\text{d},\text{p})\text{Li}^7$  und  $\text{Li}^6(\text{d},\text{e})$  bei Deuteronenenergien von 3 bis 5 MeV  
**Autor:** Meyer, V. / Pfeifer, W. / Staub, H.H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-113384>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 30.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Die Reaktionen $\text{Li}^6(d\ p)\text{Li}^7$ und $\text{Li}^6(d\ \alpha)\alpha$ bei Deuteronenenergien von 3 bis 5 MeV

von V. Meyer, W. Pfeifer und H. H. Staub

Physik-Institut, Universität, Zürich

(2. XII. 62)

*Abstract:* The reactions  $\text{Li}^6(d\ p)\text{Li}^7$  to the ground state, the 1. excited state at 0.478 MeV and the 2. excited state at 4.63 MeV in  $\text{Li}^7$  were studied at deuteron energies between 3.4 and 5.2 MeV. Reduced widths are obtained for the first two reactions. The transition to the 4.63 MeV level in  $\text{Li}^7$  shows no stripping behaviour as is to be expected if this level is the  $7/2^-$  member of the  $^{22}\text{F}$  doublet in  $\text{Li}^7$ . In addition the  $\text{Li}^6(d\ \alpha)\alpha$ -reaction was studied in the same energy interval. A  $2^+$ -level in  $\text{Be}^8$  was found at an excitation energy of 25 MeV in  $\text{Be}^8$ .

### Einleitung

Die vorliegende Arbeit wurde unternommen zur Untersuchung der Reaktion  $\text{Li}^6(d\ p)\text{Li}^7$  zum 2. angeregten Zustand (4,63 MeV) in  $\text{Li}^7$ . Dieser Übergang wurde bisher zweimal bei einer Einfallenergie von 14,4 MeV beobachtet, mit widersprechenden Ergebnissen. HAFFNER<sup>1)</sup> stellte einen deutlichen Anstieg der Protonenausbeute nach kleinen Winkeln hin fest und erreichte gute Strippinganpassung mit  $l_n = 2$ . Aus dieser Zuordnung folgt indessen positive Parität für den 4,63-MeV-Zustand, während der analoge Zustand im Spiegelkern  $\text{Be}^7$  negative Parität besitzt. Tatsächlich fand HAMBURGER<sup>2)</sup> kein Strippingverhalten, sondern eine praktisch isotrope Winkelverteilung der Protonen. Ein Vorschlag von WILKINSON<sup>3)</sup> liess vermuten, dass ein allfälliger Strippingmechanismus dieser Reaktion, die den kleinen  $Q$ -Wert von 0,4 MeV hat, bei tieferen Deuteronenenergien deutlicher in Erscheinung treten müsste. Eine Untersuchung schien daher wünschenswert, um im Fall von Strippingverhalten Spin und Parität des 4,63-MeV-Zustands in  $\text{Li}^7$  zu bestimmen.

Um ein sauberes Strippingverhalten zu erreichen, muss man eine  $(d\ p)$ -Reaktion möglichst weit entfernt von Compoundkernresonanzen messen. In unserm Fall können solche Resonanzen im  $\text{Be}^8$ -Compoundkern auftreten. Die  $(d\ p)$ -Reaktion regt diesen Kern im Gebiet oberhalb von 22,279 MeV<sup>4)</sup> an, wo im Zeitpunkt der Durchführung unserer Messungen keine Zustände bekannt waren. Es wurde daher gleichzeitig mit der  $(d\ p)$ -Reaktion die Reaktion  $\text{Li}^6(d\ \alpha)\alpha$  gemessen. Diese verläuft aus kinematischen Gründen vorwiegend über den Compoundkern und ist wegen der hohen Energie der Reaktionsprodukte leicht messbar. Ein Nachteil besteht darin, dass sie nur Zustände in  $\text{Be}^8$  mit geradem Spin, positiver Parität und Isobarens spin  $T = 0$  erreicht. Es lagen bereits Messungen von HEYDENBURG<sup>5)</sup> vor bis zur Deuteronenenergie von 3,5 MeV. Die vorliegende Arbeit erweitert den Messbereich auf 5,2 MeV.

Als Nebenergebnis wurden die Übergänge der ( $d, p$ )-Reaktion in den Grundzustand und 1. angeregten Zustand bei 0,478 MeV in  $\text{Li}^7$  gemessen und die reduzierten Breiten aus ihren Stripping-Winkelverteilungen und Ausbeuten berechnet.

### Apparatives

Die Deuteronen wurden vom Van de Graaff-Hochspannungsgenerator auf Energien von 2,4 bis 5,2 MeV beschleunigt und durch einen  $90^\circ$ -Magneten in die Streukammer gelenkt (Fig. 1). Diese besitzt einen drehbaren Deckel mit einer schiefen Bohrung ( $13^\circ$  Neigung), durch welche die Reaktionsprodukte zum Detektor gelangen. Der Deckel ist auf justierbaren Rollen gelagert, so dass er von Hand mit Hilfe eines Zahnrades und Hebelarmes bewegt werden kann. Diese Konstruktion erlaubt eine kontinuierliche Schwenkung des Detektors von  $13^\circ$  bis  $167^\circ$  unter Aufrechterhaltung des Vakuums in der Kammer.

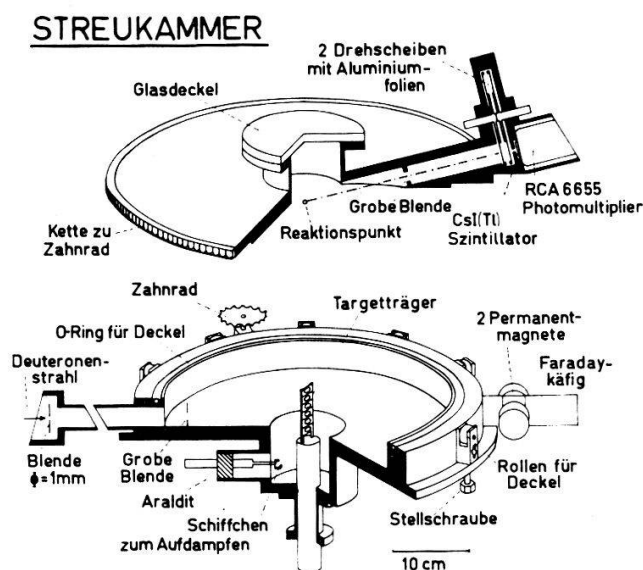


Fig. 1

Messapparatur

Der eng kollimierte Deuteronenstrahl ( $\varnothing = 1$  mm) durchdringt die dünne  $\text{Li}^6$ -Target, wird im Strahlfänger aufgefangen und mit einem Stromintegrator gemessen.

Das Lithium<sup>6</sup>) wurde in der Streukammer selbst aufgedampft auf eine selbsttragende, etwa  $7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  dicke Mowitalfolie<sup>7)</sup> als Targetträger. Die Dicke der Metallschicht ergab sich aus ihrem Bremsvermögen gegenüber  $\alpha$ ,  $\text{He}^3$  und  $d$ ; damit konnten die Wirkungsquerschnitte auf 20% genau absolut bestimmt werden. Zu Vergleichszwecken wurde auf diese Weise auch der Wirkungsquerschnitt der Reaktion  $\text{Li}^6(p, \alpha)\text{He}^3$  ( $60^\circ$ ,  $E_p = 1$  MeV) gemessen; er stimmt innerhalb des Fehlers mit der Angabe von MARION<sup>8)</sup> et al. überein.

Die geladenen Reaktionsprodukte wurden mit Hilfe eines dünnen CsJ-(Tl)-Szintillators<sup>9)</sup> gemessen, der auf einem RCA-6655-Photomultiplier aufgeklebt ist und dessen Pulse in einen RCL-256-Kanal-Analysator registriert. Direkt vor dem Detektor lassen sich Aluminiumfolien verschiedener Dicken einschieben; damit können die Teilchenarten anhand ihrer Energieverluste durch Abbremsung bestimmt werden.

## Messungen und Resultate

 $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$ 

Figur 2 zeigt die gemessenen Winkelverteilungen bei 6 verschiedenen Deuteronenenergien umgerechnet ins Schwerpunktsystem. Sie müssen in jedem Fall, unabhängig vom Reaktionsmechanismus, symmetrisch um  $90^\circ$  sein, da zwei  $\alpha$ -Teilchen entstehen. Die Wirkungsquerschnitte in Figur 2 geben aus dem gleichen Grunde nur die halbe Ausbeute an  $\alpha$ -Teilchen an.

Ferner ist es sehr unwahrscheinlich, dass die Reaktion durch  $\alpha$ -pick up verläuft, da die beiden Partikel wegen des hohen  $Q$ -Wertes einen sehr grossen Relativimpuls besitzen müssten. Nach RUSTGI<sup>10)</sup> berechnet sich die Wahrscheinlichkeit für diese Aufspaltung zu  $10^{-47}$ . Die stark energieabhängige Änderung der gemessenen Anisotropie zeigt auch experimentell, dass Stripping ausser Betracht fällt.

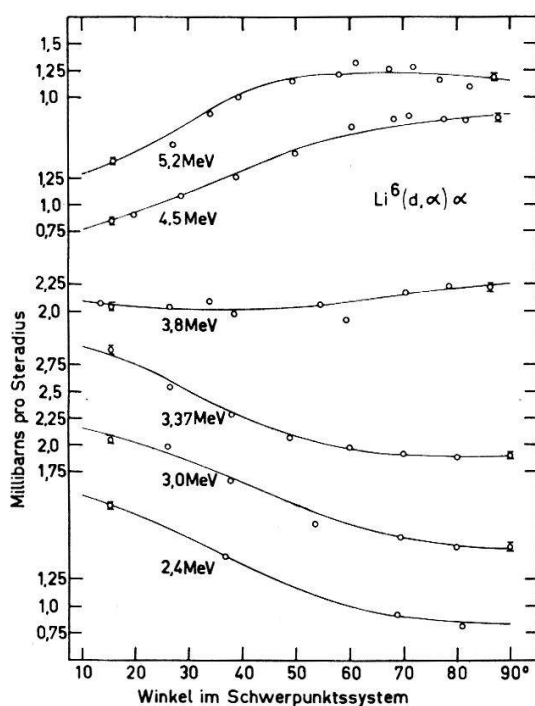


Fig. 2

Winkelverteilungen der Reaktion  $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$  bei 6 verschiedenen Deuteronenenergien. Die Kurven zeigen die Entwicklung nach geraden Legendre-Polynomen bis zur 4. Ordnung

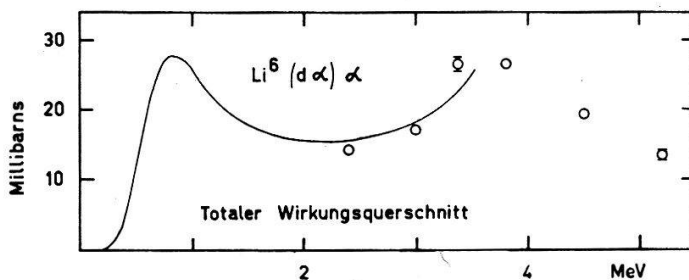


Fig. 3

Totaler Wirkungsquerschnitt der Reaktion  $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$  als Funktion der Deuteronenenergie  
Kreise: eigene Messungen; Kurve: Messungen von HEYDENBURG<sup>2)</sup> (angepasst)

Es muss also der Compoundkern  $\text{Be}^8$  gebildet werden. Aus dem Verlauf des totalen Wirkungsquerschnittes (Fig. 3) folgt, dass bei  $E_d = 3,6$  MeV, also bei 25 MeV Anregungsenergie des  $\text{Be}^8$ -Kerns, ein Niveau der Breite von etwa 1,4 MeV liegt. Die Messungen derselben Reaktion bei niedrigeren Energien durch HEYDENBURG<sup>5)</sup> lassen sich durch einen Maßstabsfaktor an die gegenwärtige Messreihe anfügen.

Zur weiteren Untersuchung wurden den gemessenen Winkelverteilungen (Fig. 2) Kurven der Form

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = a_0 P_0 + a_2 P_2 + a_4 P_4$$

angepasst ( $P_n$  = Legendrepolynom  $n$ -ten Grades). Diese Kurven liegen innerhalb der statistischen Fehler. Glieder höherer Ordnung wurden daher vernachlässigt. Figur 4 zeigt den Verlauf der Legendrekoeffizienten an. Aus ihrer Energieabhängigkeit geht hervor, dass nicht nur ein einzelner Zustand zur Reaktion beiträgt. Es wurde daher eine Anpassung versucht unter Annahme von zwei interferierenden Zuständen, nämlich einem bei  $E_d = 3,6$  MeV ( $E_x = 25$  MeV in  $\text{Be}^8$ ) und einem Zustand bei 0,8 MeV ( $E_{ex} = 22,9$  MeV), der bereits in <sup>5)</sup> angenommen worden war. Von den möglichen Spinkombinationen  $(0^+, 2^+)$ ,  $(0^+, 4^+)$ ,  $(2^+, 4^+)$  ergab die Zuordnung  $0^+$  für den tieferen,  $2^+$  für den höheren Zustand die beste Anpassung. Sie ist in Figur 4 durch die ausgezogene Kurve dargestellt. Die Rechnungen wurden durch-

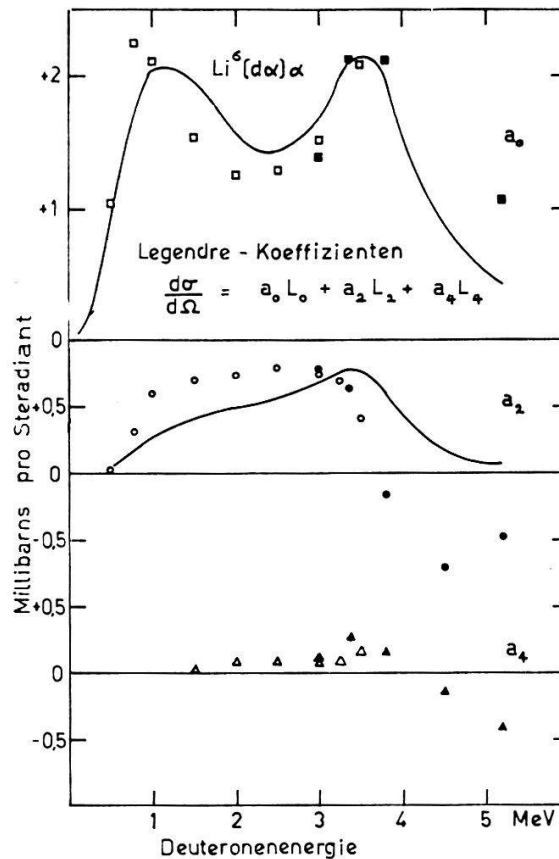
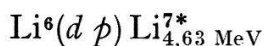


Fig. 4

Verlauf der Legendre-Koeffizienten aus der Entwicklung des differentiellen Wirkungsquerschnitts der Reaktion  $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$ . Gefüllte Signaturen: eigene Messung; leere Signaturen: Messung von HEYDENBURG<sup>2)</sup>; Kurve: theoretischer Verlauf für  $0^+$ - und  $2^+$ -Niveau

geführt mit Hilfe der Theorie der Winkelkorrelationen<sup>11)</sup> von BIEDENHARN. Dieser Formalismus gestattet jedoch keine Berechnung von Interferenzen, die von Zuständen gleichen Spins und gleicher Parität herrühren. Eine mögliche Zuordnung  $(2^+, 2^+)$  konnte daher in unseren Rechnungen nicht berücksichtigt werden. Hingegen fällt mit Sicherheit die Zuordnung  $(0^+, 0^+)$  ausser Betracht, da sie Isotropie der Winkelverteilung ergeben müsste. Die Kombination  $(4^+, 4^+)$  dagegen ergäbe einen viel grösseren Anteil des Koeffizienten  $a_4$  als gemessen.

Seit Abschluss dieser Experimente sind weitere Arbeiten bekannt geworden, die den Anregungsbereich von  $\text{Be}^8$  oberhalb von 20 MeV untersuchen. HAN und HEYDENBURG<sup>12)</sup> haben mit Hilfe der Reaktion  $\text{Li}^7(p, \alpha)\alpha$  Zustände gefunden bei  $E_{ex} = 22,15$  MeV ( $2^+$ ), 22,9 MeV ( $4^+$ ) und 25,13 MeV ( $2^+$ ), wobei die Spinzustände noch unsicher sind. Eine Gruppe in Saclay<sup>13)</sup> untersuchte ebenfalls die Reaktion  $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$ . Ihre Resultate stimmen mit den vorliegenden innerhalb der Fehler überein, eine Analyse wurde jedoch noch nicht abgeschlossen. Unter Verwendung der Ergebnisse von <sup>12)</sup> wäre eine mögliche Deutung der  $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$ -Resultate die folgende: Der Hauptanteil der Ausbeute stammt von den beiden Zuständen bei 22,15 MeV und 25,13 MeV (beide  $2^+$ ), wobei das Maximum bei 0,8 MeV durch eine Kombination von Resonanz und Penetrabilität der Deuteronen zustande kommt. Der Koeffizient  $a_4$  stammt dann vom 22,9-MeV-Zustand, der durch die kleinere Penetrabilität für  $l = 4$  Deuteronen stark unterdrückt ist. Eine quantitative Berechnung dieser Deutung steht noch aus. Die starken Abweichungen unserer angepassten Kurven von den Messresultaten bei  $E_d = 4$  MeV zeigen, dass dort Interferenz vorliegen muss mit mindestens einem weiteren höher gelegenen Zustand, der vorläufig noch unbekannt ist. Es ist somit klar, dass im ganzen Energiebereich der vorliegenden Arbeit Resonanzen im Compoundkern  $\text{Be}^8$  auftreten.



Figur 5 zeigt die Winkelverteilung der Protonen. Da sie immer auf einem kontinuierlichen Protonenuntergrund sitzen [aus  $\text{Li}^6(d, p)\alpha + H^3$ ] kann die Ausbeute dieser Reaktion nicht sehr genau bestimmt werden.

Im vorliegenden Energiebereich ist kein Stripping festzustellen. Das ist auch zu erwarten, wenn der Zustand bei 4,63 MeV in  $\text{Li}^7$  wie der analoge im  $\text{Be}^7$  zum  $^{22}\text{F}$ -Dublett gehört ( $I = 7/2^-$ ). Infolge der Spinerhaltung käme nur ein Einfang des Neutrons mit  $l_n = 3$  in Frage, was aber nicht zu einem angeregten Zustand innerhalb der  $p$ -Schale führen kann. Im übrigen könnte auch der andere Term des Dubletts ( $I = 5/2$ ) durch Stripping nicht erreicht werden, solange LS-Kopplung vorliegt, da auch dazu ein  $l_n = 3$  nötig wäre. Auf eine Analyse der Winkelverteilung mit Hilfe einer Distorted-wave-Analyse kann daher verzichtet werden.

In der Annahme, es handle sich um Compoundkernbildung, wurde der differentielle Wirkungsquerschnitt wieder nach Legendrepolynomen bis zur 4. Ordnung entwickelt. Figur 5 zeigt die angepassten Kurven und Figur 6 den Verlauf der Legendrekoeffizienten. Ausgehend von den Annahmen des vorigen Abschnittes wurde eine analoge Anpassung gesucht, die im Übergang  $2^+ 0 2^+ 3 3^-$  <sup>14)</sup> gefunden wurde (für den Endzustand des  $\text{Li}^7$ -Kernes wurde hier der Spin  $7/2^-$  angenommen). Man erhält damit eine isotrope Winkelverteilung, deren Verlauf als Funktion der Energie in Figur 6 eingezeichnet ist.

Wie bei der Reaktion  $\text{Li}^6(d, \alpha)\alpha$  deuten auch hier die Abweichungen in  $a_0$  und  $a_4$  oberhalb 4 MeV auf ein höher liegendes Niveau hin, während hier ausserdem auch  $a_2$  einen wesentlichen Beitrag aus einem Interferenzglied erhalten muss.



Die Winkelverteilungen der Protonen beider Reaktionen wurden bei den Deuteronenenergien 3,8 MeV und 5,2 MeV absolut gemessen. Es treten deutliche Strippingmaxima bei  $30^\circ$  (für 3,8 MeV) und bei  $27^\circ$  (für 5,2 MeV) auf. In allen Fällen lassen sich die Kurven für den differentiellen Wirkungsquerschnitt der Bornschen Näherung für Strippingreaktionen<sup>14)</sup> mit  $l_n = 1$  und  $R_0 = 5,6 \cdot 10^{-13}$  cm anpassen. Daraus ergeben sich die reduzierten Breiten:

Deuteronenergie	$\theta_{(0)}^2$	$\theta_{(0,478)}^2$
3,8 MeV	0,019	0,034
5,2 MeV	0,025	0,036

Bei  $E_d = 14,4$  MeV erhält HAMBURGER<sup>4)</sup> grössere Werte:

$$\theta_{(0)}^2 = 0,052; \quad \theta_{(0,478)}^2 = 0,070.$$

Da die Darstellung von FRENCH<sup>15)</sup>, welche aus der Butler-Theorie hergeleitet ist<sup>16)</sup>, Coulombkräfte vernachlässigt, ist es verständlich, dass die reduzierten Breiten bei tieferen Deuteronenergien kleiner erscheinen.

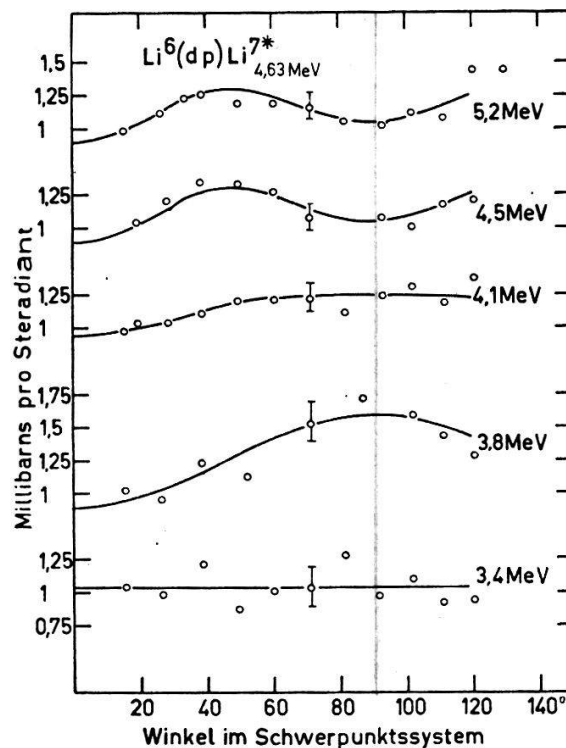


Fig. 5

Winkelverteilungen der Reaktion  $\text{Li}^6(d, p)\text{Li}^{7*}$  bei 5 verschiedenen Deuteronenergien. Die Kurven zeigen die Entwicklung nach geraden Legendre-Polynomen bis zur 4. Ordnung

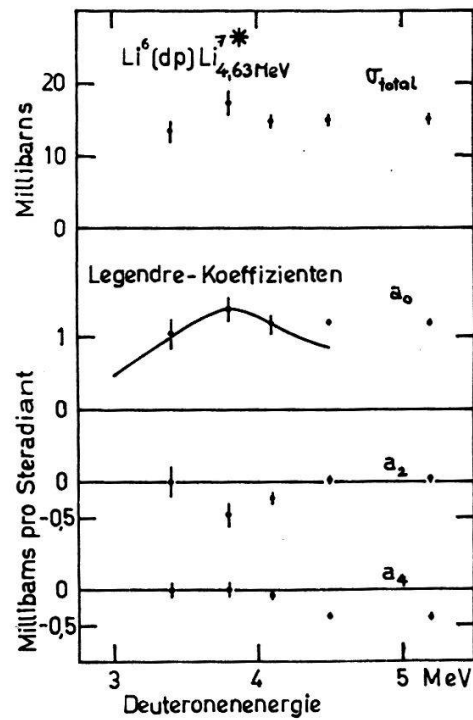


Fig. 6

Totaler Wirkungsquerschnitt der Reaktion  $\text{Li}^6(d p)\text{Li}^7_{4,63 \text{ MeV}}$  und Legendre-Koeffizienten aus der Entwicklung des differentiellen Wirkungsquerschnitts.

Kurve: theoretischer Verlauf für ein  $2^+$ -Niveau

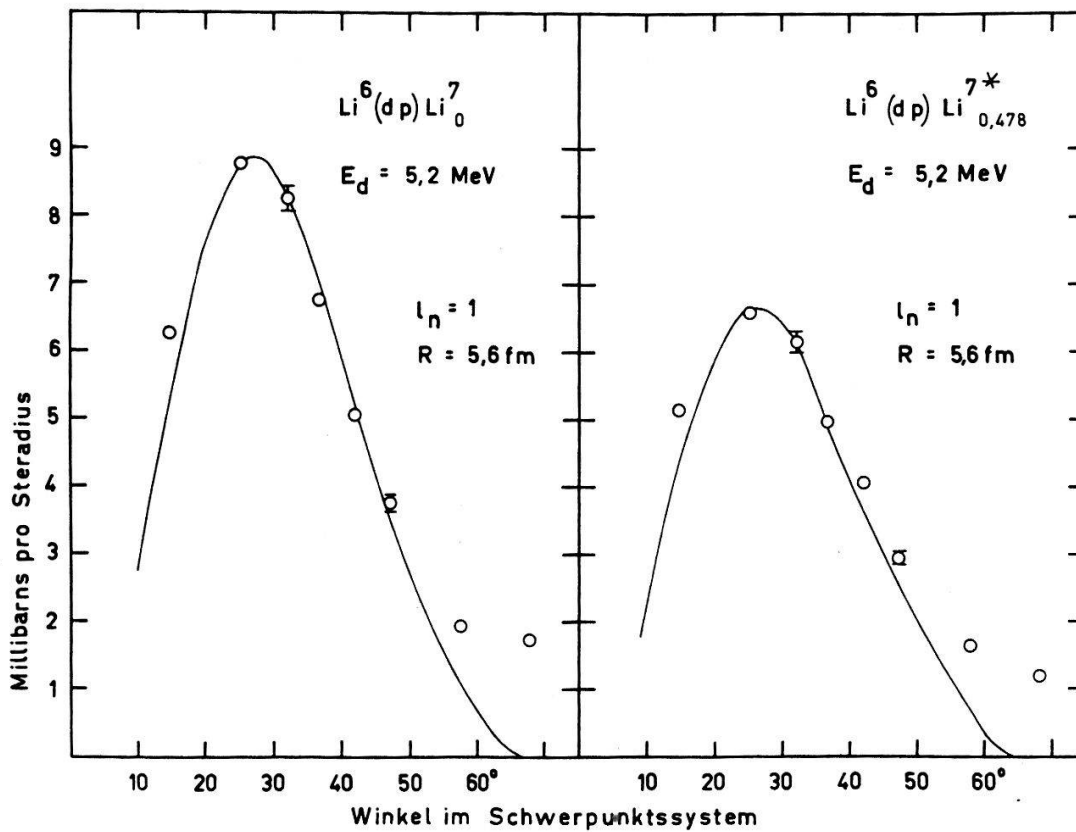


Fig. 7

Winkelverteilungen der Reaktionen  $\text{Li}^6(d p)\text{Li}^7$  und  $\text{Li}^6(d p)\text{Li}^7_{0,478 \text{ MeV}}$  bei der Deuteronenergie 5,2 MeV. Kurven: eingepasste Butlerverteilungen

**Literatur**

- <sup>1)</sup> J. W. HAFFNER, Phys. Rev. **103**, 1398 (1956).
- <sup>2)</sup> E. W. HAMBURGER, J. R. CAMERON, Phys. Rev. **117**, 781 (1960).
- <sup>3)</sup> D. H. WILKINSON, Phil. Mag. **8** Ser. 3, 1185 (1958).
- <sup>4)</sup> F. AJZENBERG-SELOVE, T. LAURITSEN, Nucl. Phys. **11**, 48 (1959).
- <sup>5)</sup> N. P. HEYDENBURG et al., Phys. Rev. **74**, 405 (1948).
- <sup>6)</sup> 96,1% angereichertes Li<sup>6</sup>, Oak Ridge National Laboratory.
- <sup>7)</sup> Mowital F 40, Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt.
- <sup>8)</sup> J. B. MARION, G. WEBER, F. S. MOZER, Phys. Rev. **104**, 1402 (1956).
- <sup>9)</sup> V. MEYER, H. MÜLLER, H. H. STAUB, R. ZURMÜHLE, Nucl. Phys. **27**, 284 (1961).
- <sup>10)</sup> M. L. RUSTGI, Nucl. Phys. **27**, 58 (1961).
- <sup>11)</sup> L. C. BIEDENHARN in Nuclear Spectroscopy, Part B, herausgegeben von F. AJZENBERG-SELOVE, Academic Press, N. Y. (1960).
- <sup>12)</sup> I. G. HAN, N. P. HEYDENBURG, Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II, Vol. **6**, 415 (1961).
- <sup>13)</sup> J. M. JERONYMO et al., Nucl. Phys. **38**, 11 (1962).
- <sup>14)</sup> Die Bezeichnungsweise wurde von BIEDENHARN übernommen (siehe <sup>11</sup>).
- <sup>15)</sup> M. H. MACFARLANE, J. B. FRENCH, Revs. Mod. Phys., Vol. **32**, No. 3, 569 (1960).
- <sup>16)</sup> W. GRÜEBLER, J. ROSSEL, Helv. Phys. Acta **34**, 718 (1961).