

# Untersuchung der ${}^6\text{Li}(d, )^4\text{He}$ -Reaktion mit polarisierten Deuteronen

Autor(en): **Neff, R. / Huber, P. / Nägele, H.P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **44 (1971)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-114304>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Untersuchung der ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ - Reaktion mit polarisierten Deuteronen

von R. Neff, P. Huber, H. P. Nägele, H. Rudin und F. Seiler

Physikalisches Institut der Universität Basel

(20. II. 71)

*Abstract.* The vector and tensor analysing power of the  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -reaction for polarized incident deuterons have been measured at 400, 600, 800 and 960 keV mean deuteron energies. The four independent components  $A_y(\vartheta)$ ,  $A_{zz}(\vartheta)$ ,  $A_{xx}(\vartheta) - A_{yy}(\vartheta)$  and  $A_{xz}(\vartheta)$  are fitted by the appropriate associated Legendre functions. It is shown that the results can be explained by the assumption of three states with  $J^\pi = 2^+$ ,  $4^+$  and  $0^+$ .

## 1. Einleitung

Die  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion wurde von zahlreichen Autoren mit unpolarisierten und polarisierten Deuteronen untersucht [1–17]. Die Analyse der gewonnenen Daten aufgrund von Niveaus im  ${}^8\text{Be}$ -Zwischenkern, die auch auf der  ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion [5, 18, 19] basiert, hat bisher zu folgenden Ergebnissen geführt: Als gesichert können ein Niveau bei 22,5 MeV Anregungsenergie mit Spin und Parität  $J^\pi = 2^+$  [1, 5, 15, 19] und ein Niveau bei 25,3 MeV mit  $J^\pi = 2^+$  [5, 6, 8, 16, 19] angesehen werden. Im weiteren werden ein Niveau mit  $J^\pi = 0^+$  bei 24,0 MeV [19] und ein 23 MeV-Zustand mit  $J^\pi = 4^+$  [18] angenommen. Chan et al. [20] geben verschiedene mögliche Niveauschemata, die den Verlauf der experimentellen  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Daten erklären können. Die oben erwähnte  $2^+$ ,  $0^+$ ,  $2^+$ -Reihenfolge halten sie dabei auch für möglich.

In der vorliegenden Arbeit wurde die  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion mit vektor- bzw. tensorpolarisierten Deuteronen bei unpolarisiertem Target untersucht. Dazu wurde mit einem gegenüber der Arbeit von Bürgisser et al. [15] verbesserten Messverfahren [27] die Winkelabhängigkeit der vier unabhängigen Komponenten der Analysatorstärke bei 400, 600, 800 und 960 keV Deuteronenenergie gemessen.

## 2. Theoretischer Teil

### 2.1. Differentieller Wirkungsquerschnitt einer Reaktion mit polarisierten Deuteronen

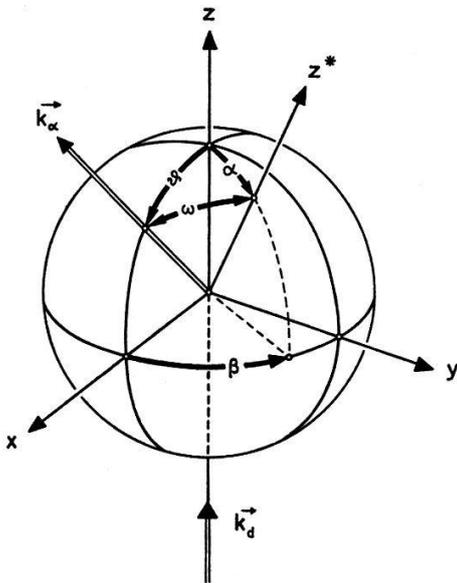
Zur Beschreibung des Polarisationszustandes eines Deuteronenstrahls und einer Reaktion mit polarisierten Deuteronen werden die Arbeiten von Goldfarb und Rook [21, 22] verwendet. Wählt man ein kartesisches Koordinatensystem nach der Madison-Konvention, in dem die Quantisierungsachse  $z^*$  der Deuteronen den Polarwinkel  $\alpha$

und den Azimutwinkel  $\beta$  aufweist (Fig. 1), so gilt bei unpolarisiertem Target für den differentiellen Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma_{pol}(\vartheta) = \sigma_0(\vartheta) \left[ 1 + \frac{3}{2} p_y A_y(\vartheta) + \frac{1}{2} p_{zz} A_{zz}(\vartheta) + \frac{2}{3} p_{xz} A_{xz}(\vartheta) + \frac{1}{6} (p_{xx} - p_{yy}) \{A_{xx}(\vartheta) - A_{yy}(\vartheta)\} \right]. \quad (1)$$

$\sigma_0(\vartheta)$  ist der differentielle Wirkungsquerschnitt für unpolarisierte Deuteronen. Die Analysatorstärke der Reaktion wird durch die drei Tensorgrößen  $A_{zz}(\vartheta)$ ,  $A_{xz}(\vartheta)$ ,  $A_{xx}(\vartheta) - A_{yy}(\vartheta)$  und durch die Vektorkomponente  $A_y(\vartheta)$  gegeben. Der Polarisationszustand des Deuteronenstrahls wird durch den Vektor  $\mathbf{p}$  und den Tensor  $(p_{ij})$  beschrieben. Es ergeben sich die folgenden Komponenten der Vektor- und Tensorpolarisation [23]:

$$\begin{aligned} p_y &= |\mathbf{p}^*| \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta, \\ p_{zz} &= \frac{1}{2} p_{zz}^* (3 \cos^2 \alpha - 1), \\ p_{xz} &= \frac{3}{4} p_{zz}^* \cdot \sin 2\alpha \cdot \cos \beta, \\ p_{xx} - p_{yy} &= \frac{3}{2} p_{zz}^* \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos 2\beta. \end{aligned} \quad (2)$$



Figur 1

Koordinatensystem am Targetort nach der Madison-Konvention.

$\mathbf{k}_d$  = Wellenvektor der einfallenden Deuteronen.  
 $\mathbf{k}_\alpha$  = Wellenvektor der ausgehenden  $\alpha$ -Teilchen.

## 2.2. Entwicklung der Komponenten der Analysatorstärke nach Legendre-Funktionen

Nach [21] können die Komponenten der Analysatorstärke durch Linearkombinationen von Legendre-Funktionen  $L_{l,m}(\cos \vartheta)$ <sup>1)</sup> in der folgenden Weise dargestellt werden:

<sup>1)</sup> In der Notierung von Jahnke-Emde [24]:  $P_l(\cos \vartheta) = L_{l,0}(\cos \vartheta)$ ;  $P_l^m(\cos \vartheta) = L_{l,m}(\cos \vartheta)$ .

$$\begin{aligned}
 A_{zz}(\vartheta) &= \frac{1}{\sigma_0^N(\vartheta)} \sum_{n=0}^{n_{\max}} a_{zz}^{(2n)} \cdot L_{2n,0}(\cos\vartheta), \\
 A_{xx}(\vartheta) - A_{yy}(\vartheta) &= \frac{1}{\sigma_0^N(\vartheta)} \sum_{n=1}^{n_{\max}} a_{xx-yy}^{(2n)} \cdot L_{2n,2}(\cos\vartheta), \\
 A_{xz}(\vartheta) &= \frac{1}{\sigma_0^N(\vartheta)} \sum_{n=1}^{n_{\max}} a_{xz}^{(2n)} \cdot L_{2n,1}(\cos\vartheta), \\
 A_y(\vartheta) &= \frac{1}{\sigma_0^N(\vartheta)} \sum_{n=1}^{n_{\max}} a_y^{(2n)} \cdot L_{2n,1}(\cos\vartheta).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Wegen der zwei identischen Bosonen im Ausgangskanal der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion kommen nur Legendre-Funktionen mit geradzahligem  $l$  vor.  $\sigma_0^N(\vartheta)$  ist der auf einen totalen Wirkungsquerschnitt von  $4\pi$  normierte differentielle Wirkungsquerschnitt für unpolarisierte Deuteronen:

$$\sigma_0^N(\vartheta) = \frac{\sigma_0(\vartheta)}{a_0^{(0)}}. \tag{4}$$

Mit  $\sigma_0(\vartheta) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} a_0^{(2n)} \cdot L_{2n,0}(\cos\vartheta)$  und  $b_0^{(2n)} = a_0^{(2n)}/a_0^{(0)}$  ergibt sich:

$$\sigma_0^N(\vartheta) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} b_0^{(2n)} \cdot L_{2n,0}(\cos\vartheta). \tag{5}$$

Die Koeffizienten  $a_{ij}^{(k)}$ ,  $a_y^{(k)}$  und  $b_0^{(k)}$  werden durch die an der Reaktion beteiligten Reaktionsmatrixelemente  $R_n = \langle l'_n, s'_n, J_n^{\pi'} | R | l_n, s_n, J_n^\pi \rangle$  und die reduzierte Deuteronenwellenlänge  $\lambda$  der Relativbewegung im Eingangskanal bestimmt [21]. Das Matrixelement  $R_n$  verknüpft den Zustand mit Bahndrehimpuls  $l_n$ , Kanalspin  $s_n$  und Totalspin  $J_n^\pi$  im Eingangskanal mit dem Zustand  $l'_n, s'_n, J_n^{\pi'}$  im Ausgangskanal. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 a_{ij}^{(k)} &= \frac{\lambda^2}{a_0^{(0)}} \sum_{p,q} \alpha_{ij}^{(k,p,q)} \cdot \text{Re}(R_p \cdot R_q^*) = \sum_{p,q} \alpha_{ij}^{(k,p,q)} \cdot R_{p,q}, & ij &= \begin{cases} zz \\ xx - yy \\ xz \end{cases} \\
 a_y^{(k)} &= \frac{\lambda^2}{a_0^{(0)}} \sum_{p,q} \alpha_y^{(k,p,q)} \cdot \text{Im}(R_p \cdot R_q^*) = \sum_{p,q} \alpha_y^{(k,p,q)} \cdot I_{p,q}, \\
 b_0^{(k)} &= \frac{\lambda^2}{a_0^{(0)}} \sum_{p,q} \alpha_0^{(k,p,q)} \cdot \text{Re}(R_p \cdot R_q^*) = \sum_{p,q} \alpha_0^{(k,p,q)} \cdot R_{p,q}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Für  $(\lambda^2/a_0^{(0)}) \text{Re}(R_p \cdot R_q^*)$  und  $(\lambda^2/a_0^{(0)}) \text{Im}(R_p \cdot R_q^*)$  werden die Abkürzungen  $R_{p,q}$  bzw.  $I_{p,q}$  verwendet. Die  $\alpha_{ij}^{(k,p,q)}$ ,  $\alpha_y^{(k,p,q)}$  und  $\alpha_0^{(k,p,q)}$  sind Zahlenwerte, die sich aus der Drehimpulsalgebra für vorgegebene Indizes ergeben [25, 26].

Im Deuteronenenergiebereich bis 1 MeV kann aufgrund von Penetrabilitätsbetrachtungen angenommen werden, dass nur Deuteronen mit Bahndrehimpulsen  $l \leq 2$  wesentlich zur Reaktion beitragen können. Zudem entfallen wegen der identischen Teilchen im Ausgangskanal alle ungeraden  $l$ -Werte. Deshalb sind nur Zustände

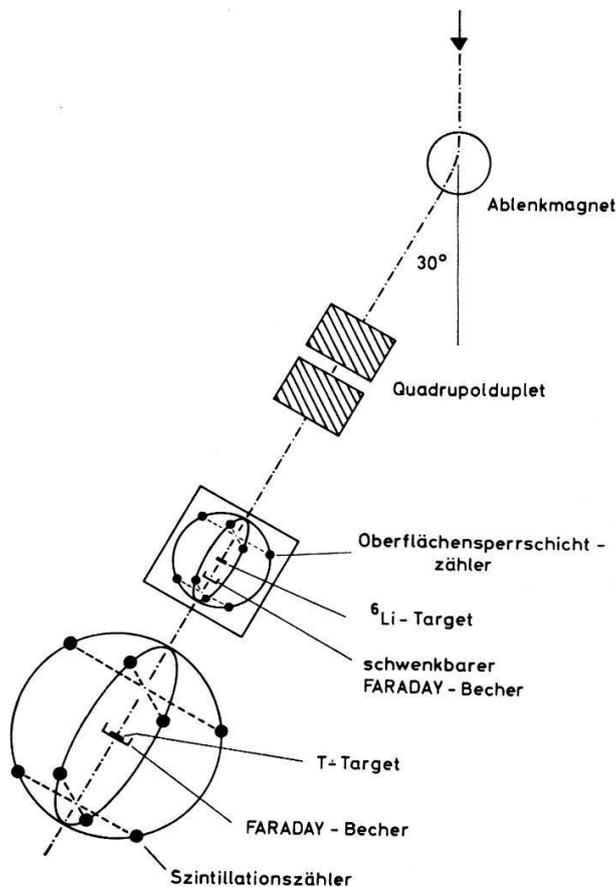
mit  $J^\pi = 2^+$ ,  $J^\pi = 4^+$  und  $J^\pi = 0^+$  möglich. Die Matrixelemente, die den Reaktionsablauf über diese Zustände beschreiben, sind die folgenden:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \langle 2 \ 0 \ 2^+ | R | 0 \ 2 \ 2^+ \rangle \\
 R_2 &= \langle 2 \ 0 \ 2^+ | R | 2 \ 0 \ 2^+ \rangle \\
 R_3 &= \langle 2 \ 0 \ 2^+ | R | 2 \ 1 \ 2^+ \rangle \\
 R_4 &= \langle 2 \ 0 \ 2^+ | R | 2 \ 2 \ 2^+ \rangle \\
 R_5 &= \langle 4 \ 0 \ 4^+ | R | 2 \ 2 \ 4^+ \rangle \\
 R_6 &= \langle 0 \ 0 \ 0^+ | R | 0 \ 0 \ 0^+ \rangle \\
 R_7 &= \langle 0 \ 0 \ 0^+ | R | 2 \ 2 \ 0^+ \rangle .
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

### 3. Experimenteller Teil

#### 3.1. Anordnung

Der Strahl polarisierter Deuteronen wird von einer nach der Atomstrahlmethode arbeitenden Quelle geliefert, die sich auf der Hochspannungsseite eines 1 MV-Kaskadengenerators befindet und von Grunder et al. [28] beschrieben wird. Nach der Beschleunigung auf die gewünschte Energie wird der Deuteronenstrahl um  $30^\circ$  abgelenkt und mit Hilfe eines magnetischen Quadrupolduplets fokussiert:



Figur 2  
Messanordnung.

Die zu untersuchende  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion erfolgt in einer Streukammer, in welcher acht Oberflächensperrschichtzähler<sup>2)</sup>, angeordnet zu Quadrupeln gemäss

<sup>2)</sup> ORTEC-Silizium-Halbleiterzähler SCEJ-100-300.

Petitjean et al. [27], zur Verfügung stehen. Ihre Entfernung vom  ${}^6\text{Li}$ -Target beträgt 140 mm. In Abständen von 30 mm und 3 mm vor jeder Zähleroberfläche befinden sich Blenden aus Tantal ( $\varnothing = 9,2$  mm). Die Blende bei 3 mm trägt eine  $3,8$  mg/cm<sup>2</sup> dicke Aluminiumfolie, die gestreute Deuteronen vom Zähler fernhält. Das kreisförmige Target ( $\varnothing = 10$  mm) besteht aus 95,6prozentigem  ${}^6\text{Li}$ , das auf eine  $0,45$  mg/cm<sup>2</sup> dicke Nickelfolie aufgedampft wurde. Für den einzelnen Zähler ergibt sich eine Winkelauflösung von  $\pm 4^\circ$ . Die Targetdicke beträgt für die Messungen bei 400 und 600 keV mittlerer Deuteronenenergie  $0,11$  mg/cm<sup>2</sup>, für diejenigen bei 800 und 960 keV  $0,20$  mg/cm<sup>2</sup>.

Ein Faraday-Becher, der sich 50 mm hinter dem  ${}^6\text{Li}$ -Target befindet, dient zusammen mit einem Stromintegrator als Strahlmonitor. Die im Deuteronenstrahl vorhandenen  $\text{H}_2^+$ -Teilchen werden durch entsprechend dimensionierte Nickelfolien vom Faraday-Becher ferngehalten.

Das  ${}^6\text{Li}$ -Target und der Faraday-Becher können aus dem Strahl herausgezogen werden, so dass die Deuteronen auf ein 72 cm unterhalb der Streukammer liegendes T-Ti-Target treffen können. Die Winkelverteilung der Neutronen aus der  $\text{T}(\vec{d}, n){}^4\text{He}$ -Reaktion dient zur Bestimmung bzw. Überwachung der Deuteronenpolarisation. Zum Nachweis der Neutronen dient ein Zählersystem, bestehend aus acht Szintillationszählern<sup>3)</sup>. Jeder Szintillatormittelpunkt hat einen Abstand von 18,5 cm vom Target. Die Dicke des T-Ti(1:1)-Targets beträgt  $0,4$  mg/cm<sup>2</sup>. Die aus Intensitätsgründen gewählte Einschussenergie der Deuteronen von 930 keV wird von einer  $2,1$  mg/cm<sup>2</sup> dicken Aluminiumfolie auf 230 keV reduziert, was zu einer mittleren Energie im Target von 130 keV führt. Die zum Abbremsen des Strahls verwendete Aluminiumfolie hält die  $\text{H}_2^+$ -Teilchen vom Faraday-Becher fern. Die Folie hat vom Target einen Abstand von 7,8 cm.

Die Intensität des Deuteronenstrahls beträgt auf dem  ${}^6\text{Li}$ -Target ca. 14 nA, auf dem T-Ti-Target 8–10 nA, bei einem durch Blenden begrenzten Strahlfleck von  $7 \times 4$  mm<sup>2</sup> bzw.  $11 \times 4$  mm<sup>2</sup>.

### 3.2. Auswertverfahren und Bestimmung der Strahlpolarisation

Die Bestimmung der Komponenten der Analysatorstärke mit Hilfe der Quadrupelanordnung der Zähler wird von Petitjean et al. [27] ausführlich beschrieben.

Die einzige Änderung betrifft die Bestimmung der Polarisationskomponente  $p_{zz}^*$  des Deuteronenstrahls. Für die Messung von  $p_{zz}^*$  dient die bei Annahme eines durch s-Wellen induzierten Reaktionsablaufs der  $\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ -Reaktion über das  $3/2^+$ -Niveau des Zwischenkerns gültige Formel:

$$\sigma_{pol}(\omega) = \sigma_0 \left\{ 1 - \frac{1}{4} p_{zz}^* (3 \cos^2 \omega - 1) \right\}. \quad (8)$$

Der Winkel  $\omega$  ist in Figur 1 eingezeichnet. Die Messung erfolgt mit zwei Szintillationszählern unter  $\omega_{CM} = 0^\circ$  bzw.  $180^\circ$  und vier Zählern unter  $\omega_{CM} = 90^\circ$ . Die beiden übrigen Zähler dienen zur Lagekontrolle der Symmetrieachse  $z^*$ ; sie stehen deshalb

<sup>3)</sup>  $1\frac{1}{4}'' \times 1\frac{3}{8}''$  Plastiksintillatoren NE 102 mit Photomultipliern Philips 150 AVP.

unter  $\omega_{CM} = 54,7^\circ$ . Um  $D(d, n)^3\text{He}$ -Neutronen und weitere Untergrundneutronen von der Registrierung auszuschliessen, sind die Pegel so eingestellt, dass nur Neutronen mit Energien  $> 6$  MeV gezählt werden.

Der so ermittelte Wert für  $p_{zz}^*$  ist zu klein, da ein gewisser Anteil der  $T(d, n)^4\text{He}$ -Reaktion über einen  $1/2^+$ -Zustand verläuft. Ohlsen et al. [29] haben diesen Anteil bei mittleren Energien in einem T-Zr-Target von 40, 58 und 67 keV zu 4–5% bestimmt. Die Werte sind für eine Korrektur der  $p_{zz}^*$ -Messungen dieser Arbeit zu unsicher, zumal im vorliegenden Fall die mittlere Energie im Target 130 keV beträgt.

Im weiteren ist zu beachten, dass wegen der Distanz zwischen der Aluminiumfolie und dem T-Ti-Target (vgl. Abschnitt 3.1) eine Depolarisation der Deuteronen eintritt [30]. Bei der vorliegenden Energie verlässt der Bruchteil  $\gamma$  der Deuteronen (ca. 17%) die Folie als Atome. Die Depolarisation der Atomkerne entsteht durch Kopplung des unpolarisierten Elektrons mit dem polarisierten Deuteron während der restlichen Flugzeit bis zum Target. Für das wahre  $p_{zz}^*$  ergibt sich aus dem gemessenen  $p_{zz}^{*m}$ :

$$p_{zz}^* = \frac{p_{zz}^{*m}}{1 - \frac{2}{3}\gamma} = \eta \cdot p_{zz}^{*m} \quad (9)$$

### 3.3. Messungen an der ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion

Unter Ausnützung der Symmetrie der  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion erfolgen die Messungen hauptsächlich in den experimentell günstigen Rückwärtswinkeln. Mit Zählerquadrupeln unter  $\vartheta_{Lab} = 40^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 100^\circ, 110^\circ, 120^\circ, 145^\circ$  und  $160^\circ$  werden die Stosszahlverhältnisse mit polarisierten und unpolarisierten Deuteronen bestimmt. Die mittleren Deuteronenenergien im Target sind dabei 400, 600, 800 und 960 keV bei einer Breite von  $\pm 20$  keV.

Die Erfassung der  $\alpha$ -Pulse der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion ( $Q$ -Wert: 22,36 MeV) geschieht mit Hilfe von Fensterdiskriminatoren. Um die allfällige Störreaktion  ${}^{14}\text{N}(d, \alpha){}^{12}\text{C}$  zu überwachen, wird bei einem kinematisch günstigen Winkel (Vorwärtswinkel) ein zusätzlicher Oberflächensperrschichtzähler angebracht.

Die Messungen werden bei festem  $\vartheta$  für drei verschiedene Stellungen der Quantisierungsachse  $z^*$  durchgeführt, nämlich für  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 54,7^\circ$  und  $\alpha = 90^\circ$  (Fig. 1). Damit wird es möglich, die Konsistenz der Messungen zu überprüfen. Sowohl bei der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion als auch bei der  $T(\vec{d}, n){}^4\text{He}$ -Reaktion gelangt ein festes Messschema zur Anwendung [28]. Das Messprogramm sieht für  $\alpha = 54,7^\circ$  und  $\alpha = 90^\circ$  wie folgt aus:

- a) 2 Messzyklen  $T(\vec{d}, n){}^4\text{He}$ ,
- b) 8 Messzyklen  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ ,
- c) 2 Messzyklen  $T(\vec{d}, n){}^4\text{He}$ ,
- d) 6 Messzyklen  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ ,
- e) 2 Messzyklen  $T(\vec{d}, n){}^4\text{He}$ .

Für  $\alpha = 0^\circ$  kann man sich mit a), b) und c) begnügen, da bei dieser Stellung eine grössere relative Genauigkeit erreicht wird.

Jeder Messzyklus der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion wird für sich ausgewertet. Die Zuordnung des  $p_{zz}^*$ -Wertes geschieht durch Mittelung der  $p_{zz}^*$ -Werte von a) und c) bzw. c) und e), sofern sich die beiden Werte innerhalb der Fehlerschranken decken; andernfalls wird linear interpoliert. Für jede Stellung der Quantisierungsachse werden die berechneten Komponenten der Analysatorstärke über alle Messzyklen gewichtet gemittelt und die statistischen Fehler der Mittelwerte berechnet. Zur Gewichtung dienen die statistischen Fehler der Einzelwerte. Diese Fehler ergeben sich aus den Stosszahlen und dem statistischen Fehler des zugehörigen  $p_{zz}^*$ -Wertes. Die für jede Stellung der Quantisierungsachse  $z^*$  bestimmten Komponenten der Analysatorstärke werden gemittelt.

## 4. Resultate

### 4.1. Strahlpolarisation

Die einzelnen Messwerte für  $p_{zz}^*$ (SF) und  $p_{zz}^*$ (SWF) haben bei den gewählten Stosszahlen eine statistische Unsicherheit von 2,5% bzw. 2%. Wegen der auftretenden Depolarisation (vgl. Abschnitt 3.2) müssen die Messwerte nach Formel (9) mit dem experimentell bestimmten Faktor  $\eta = 1,117 \pm 0,008$  multipliziert werden. Für die Angabe von  $p^*$ (SWF) und  $p^*$ (WF) werden die Messungen des Vektoreffekts der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion zu Hilfe genommen. Die Werte folgen aus dem Vergleich der Größen  $p_y(\text{SF}) \cdot A_y(\vartheta)$  mit den entsprechenden Größen  $p_y(\text{SWF}) \cdot A_y(\vartheta)$  bzw.  $p_y(\text{WF}) \cdot A_y(\vartheta)$  [28]. In Tabelle 1 sind die mittleren Werte von  $p_{zz}^*$  und  $p^*$  zusammengestellt. In Klammern stehen die bei idealer Quelle erreichbaren Werte.

Tabelle 1  
Polarisation des Deuteronenstrahls

Übergang	$p_{zz}^*$	$p^*$
SF (3) $\rightarrow$ (5)	- 0,61 (- 1)	+ 0,20 (+ 1/3)
SF + WF (SWF)	+ 0,60 (+ 1)	- 0,24 (- 1/3)
WF	+ 0,01 ( 0)	- 0,45 (- 2/3)

### 4.2. Analysatorstärke der ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion

Tabelle 2 enthält die Messresultate mit ihren statistischen Fehlern. Die Winkel  $\vartheta$  sind im Schwerpunktsystem angegeben. Eine typische  $\alpha$ -Stossrate bei 800 keV Deuteronenenergie und  $\vartheta_{CM} = 115^\circ$  beträgt 4000 Impulse/min.

Die Messdaten werden, wie in den Gleichungen (3) angegeben, nach Legendrefunktionen entwickelt. Die dazu benötigten differentiellen Wirkungsquerschnitte  $\sigma_0^N(\vartheta)$  für unpolarisierte Deuteronen werden unter Ausnützung der in Arbeit [13] gemessenen Energieabhängigkeit den Publikationen von Longequeue et al. [11] und Bruno et al. [10] entnommen. Die berechneten Entwicklungskoeffizienten sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 2

Komponenten der Analysatorstärke der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion als Funktion des Emissionswinkels  $\vartheta$  im Schwerpunktsystem

$\bar{E}_d$	$\vartheta_{CM}$	$A_{zz}(\vartheta)$	$A_{xx}(\vartheta) - A_{yy}(\vartheta)$	$A_{xz}(\vartheta)$	$A_y(\vartheta)$
400 keV	42,5°	-0,167 ± 0,005	-0,649 ± 0,006	-0,650 ± 0,006	-0,032 ± 0,003
	83,8°	+0,409 ± 0,007	-1,206 ± 0,009	-0,080 ± 0,011	-0,013 ± 0,004
	88,8°	+0,428 ± 0,007	-1,190 ± 0,011	-0,007 ± 0,012	+0,002 ± 0,002
	103,8°	+0,364 ± 0,004	-1,165 ± 0,008	+0,290 ± 0,012	+0,022 ± 0,003
	113,6°	+0,266 ± 0,012	-1,061 ± 0,009	+0,443 ± 0,008	+0,026 ± 0,003
	123,3°	+0,109 ± 0,009	-0,947 ± 0,012	+0,553 ± 0,007	+0,033 ± 0,003
	147,2°	-0,427 ± 0,008	-0,443 ± 0,009	+0,634 ± 0,008	+0,030 ± 0,003
	161,3°	-0,730 ± 0,006	-0,152 ± 0,009	+0,446 ± 0,006	+0,015 ± 0,003
600 keV	43,0°	-0,115 ± 0,010	-0,658 ± 0,012	-0,607 ± 0,006	-0,045 ± 0,003
	84,6°	+0,366 ± 0,005	-0,988 ± 0,013	-0,050 ± 0,013	-0,006 ± 0,003
	89,6°	+0,374 ± 0,014	-1,011 ± 0,012	+0,005 ± 0,009	+0,000 ± 0,003
	104,6°	+0,331 ± 0,006	-0,963 ± 0,013	+0,220 ± 0,007	+0,037 ± 0,004
	114,4°	+0,240 ± 0,013	-0,923 ± 0,011	+0,368 ± 0,008	+0,041 ± 0,004
	124,0°	+0,125 ± 0,005	-0,855 ± 0,011	+0,499 ± 0,007	+0,052 ± 0,004
	147,7°	-0,391 ± 0,005	-0,456 ± 0,012	+0,616 ± 0,007	+0,039 ± 0,003
	161,6°	-0,711 ± 0,010	-0,167 ± 0,009	+0,433 ± 0,007	+0,025 ± 0,004
800 keV	43,4°	-0,045 ± 0,004	-0,655 ± 0,019	-0,538 ± 0,005	-0,070 ± 0,003
	85,3°	+0,339 ± 0,004	-0,786 ± 0,015	-0,032 ± 0,009	-0,011 ± 0,003
	90,3°	+0,329 ± 0,005	-0,795 ± 0,008	+0,020 ± 0,009	+0,002 ± 0,002
	105,3°	+0,311 ± 0,005	-0,807 ± 0,007	+0,187 ± 0,007	+0,053 ± 0,003
	115,0°	+0,251 ± 0,003	-0,810 ± 0,006	+0,313 ± 0,010	+0,067 ± 0,003
	124,6°	+0,156 ± 0,005	-0,767 ± 0,010	+0,415 ± 0,005	+0,073 ± 0,002
	148,1°	-0,347 ± 0,005	-0,452 ± 0,008	+0,604 ± 0,007	+0,047 ± 0,003
	161,8°	-0,683 ± 0,004	-0,178 ± 0,004	+0,452 ± 0,006	+0,026 ± 0,002
960 keV	43,8°	+0,025 ± 0,005	-0,687 ± 0,011	-0,501 ± 0,004	-0,093 ± 0,003
	85,8°	+0,324 ± 0,006	-0,623 ± 0,006	-0,032 ± 0,005	-0,015 ± 0,004
	90,9°	+0,327 ± 0,008	-0,638 ± 0,007	+0,022 ± 0,008	+0,016 ± 0,005
	105,8°	+0,312 ± 0,005	-0,682 ± 0,013	+0,141 ± 0,006	+0,080 ± 0,004
	115,5°	+0,281 ± 0,008	-0,725 ± 0,008	+0,252 ± 0,005	+0,103 ± 0,004
	125,1°	+0,206 ± 0,007	-0,740 ± 0,009	+0,379 ± 0,007	+0,106 ± 0,004
	148,4°	-0,298 ± 0,007	-0,475 ± 0,012	+0,609 ± 0,008	+0,060 ± 0,003
	162,0°	-0,657 ± 0,007	-0,188 ± 0,009	+0,472 ± 0,007	+0,030 ± 0,002

Tabelle 3

Entwicklungskoeffizienten der  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion

		400 keV	600 keV	800 keV	960 keV
$\sigma_0^N$	$b_0^{(0)}$	+1,000 ± 0,007	+1,000 ± 0,007	+1,000 ± 0,013	+1,000 ± 0,013
	$b_0^{(2)}$	+0,041 ± 0,013	+0,125 ± 0,013	+0,192 ± 0,027	+0,249 ± 0,026
	$b_0^{(4)}$				+0,010 ± 0,004
$\sigma_0^N \cdot A_{zz}$	$a_{zz}^{(0)}$	+0,036 ± 0,004	+0,022 ± 0,002	+0,031 ± 0,004	+0,056 ± 0,003
	$a_{zz}^{(2)}$	-0,846 ± 0,011	-0,808 ± 0,006	-0,762 ± 0,012	-0,729 ± 0,007
	$a_{zz}^{(4)}$	-0,139 ± 0,015	-0,226 ± 0,009	-0,333 ± 0,014	-0,413 ± 0,009
	$a_{zz}^{(6)}$		-0,024 ± 0,010	-0,054 ± 0,013	-0,062 ± 0,010

	400 keV	600 keV	800 keV	960 keV	
$\sigma_0^N \cdot (A_{xx} - A_{yy})$	$a_{xx-yy}^{(2)}$	$-0,4172 \pm 0,0019$	$-0,3568 \pm 0,0018$	$-0,3012 \pm 0,0009$	$-0,2641 \pm 0,0014$
	$a_{xx-yy}^{(4)}$	$-0,0093 \pm 0,0005$	$-0,0191 \pm 0,0006$	$-0,0268 \pm 0,0003$	$-0,0351 \pm 0,0005$
	$a_{xx-yy}^{(6)}$		$-0,0006 \pm 0,0003$	$-0,0011 \pm 0,0001$	$-0,0018 \pm 0,0003$
$\sigma_0^N \cdot A_{xz}$	$a_{xz}^{(2)}$	$-0,428 \pm 0,005$	$-0,393 \pm 0,004$	$-0,353 \pm 0,006$	$-0,332 \pm 0,004$
	$a_{xz}^{(4)}$	$-0,026 \pm 0,004$	$-0,052 \pm 0,003$	$-0,075 \pm 0,005$	$-0,097 \pm 0,003$
	$a_{xz}^{(6)}$			$-0,009 \pm 0,003$	$-0,013 \pm 0,003$
$\sigma_0^N \cdot A_y$	$a_y^{(2)}$	$-0,0231 \pm 0,0011$	$-0,0343 \pm 0,0014$	$-0,0494 \pm 0,0011$	$-0,0698 \pm 0,0016$
	$a_y^{(4)}$	$+0,0017 \pm 0,0008$	$+0,0024 \pm 0,0010$	$+0,0053 \pm 0,0007$	$+0,0099 \pm 0,0010$

## 5. Diskussion

### 5.1. Drehimpuls und Parität der an der Reaktion beteiligten Zustände

Zur Analyse der Messdaten dienen die Beziehungen (6). Die benötigten  $\alpha_{ij}^{(k,p,q)}$ ,  $\alpha_y^{(k,p,q)}$  und  $\alpha_0^{(k,p,q)}$  können für alle mit den Matrixelementen (7) möglichen Kombinationen berechnet werden [31]. Es ist das Ziel der Analyse, mit Hilfe der auftretenden Entwicklungskoeffizienten Aufschluss über die an der Reaktion beteiligten Zustände zu erhalten.

Nach den bestehenden Messergebnissen [1, 5, 6, 8, 15, 16, 19] verläuft die  ${}^6\text{Li}(\vec{d}, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion bei den vorliegenden Energien zu einem grossen Teil über einen  ${}^8\text{Be}$ -Zwischenkern mit  $J^\pi = 2^+$ . Als erstes wird deshalb eine Anpassung der Messdaten mit Hilfe der über einen  $2^+$ -Zustand führenden Matrixelemente  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  versucht. Es zeigt sich, dass in grober Näherung der Verlauf der Daten damit erklärt werden kann. Die Resultate bei 400 keV stimmen weitgehend mit der getroffenen Annahme überein, während bei 600, 800 und 960 keV bereits recht grosse Abweichungen auftreten. Die Mängel äussern sich hauptsächlich bei den Entwicklungskoeffizienten  $a_{ij}^{(2)}$ , und dies vor allem bei der Komponente  $A_{xx}(\vartheta) - A_{yy}(\vartheta)$ . Auch bei 400 keV treten bei dieser Komponente die noch verbleibenden Abweichungen am deutlichsten in Erscheinung.

Ein wichtiges Merkmal bei steigender Energie ist das Auftreten der Entwicklungskoeffizienten  $a_{ij}^{(6)}$ . Diese Koeffizienten können bei den benutzten Einschussenergien der Deuteronen nur auftreten, wenn an der Reaktion ein Zustand mit  $J^\pi = 4^+$  beteiligt ist (Matrixelement  $R_5$ ). Um Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zu erreichen, ist aber neben  $J^\pi = 2^+$  und  $J^\pi = 4^+$  noch ein dritter Zustand mit  $J^\pi = 0^+$  notwendig (Matrixelemente  $R_6$  und  $R_7$ ). Eine Berücksichtigung von nur zwei Zuständen mit  $J^\pi = 2^+$  und  $J^\pi = 4^+$  vermag die Messdaten nicht wesentlich besser zu befriedigen als ein alleiniger  $2^+$ -Zustand; die Relationen zwischen den Entwicklungskoeffizienten  $a_{ij}^{(2)}$  können nicht erfüllt werden.

Im folgenden werden die Beziehungen (6) für die drei Zustände mit  $J^\pi = 2^+$ ,  $J^\pi = 4^+$  und  $J^\pi = 0^+$  angegeben. Im Bestreben, mit einem Minimum an Parametern auszukommen, wird eine physikalisch sinnvolle Auswahl der Grössen  $R_{p,q}$  bzw.  $I_{p,q}$  getroffen: Bei den Anpassungsversuchen mit  $J^\pi = 2^+$  alleine hat sich gezeigt, dass das

Matrizelement  $R_1$  sehr viel grösser ist als die Matrizelemente  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$ , was auch aus Gründen der Eindringwahrscheinlichkeit zu erwarten ist. Deshalb genügen zur Erfassung des  $2^+$ -Zustandes die Grössen  $R_{1,1}$ ,  $R_{1,2}$ ,  $R_{1,3}$  und  $R_{1,4}$ . Ebenso kann man aus der Grösse der Entwicklungskoeffizienten  $a_{ij}^{(6)}$  auf ein im Vergleich zu  $R_1$  kleines  $R_5$  schliessen, weshalb nur  $R_{5,5}$  und  $R_{1,5}$  für den  $4^+$ -Zustand berücksichtigt werden. Weil auch  $R_6$  im Vergleich zu  $R_1$  klein ist, kann aus Penetrabilitätsgründen  $R_7$  weggelassen werden. Der  $0^+$ -Zustand geht deshalb lediglich mit den Grössen  $R_{6,6}$  und  $R_{1,6}$  ein.

Das entstehende Gleichungssystem ist in Tabelle 4 wiedergegeben. Die linear abhängigen Gleichungen bzw. Gleichungsteile sind eingerahmt.

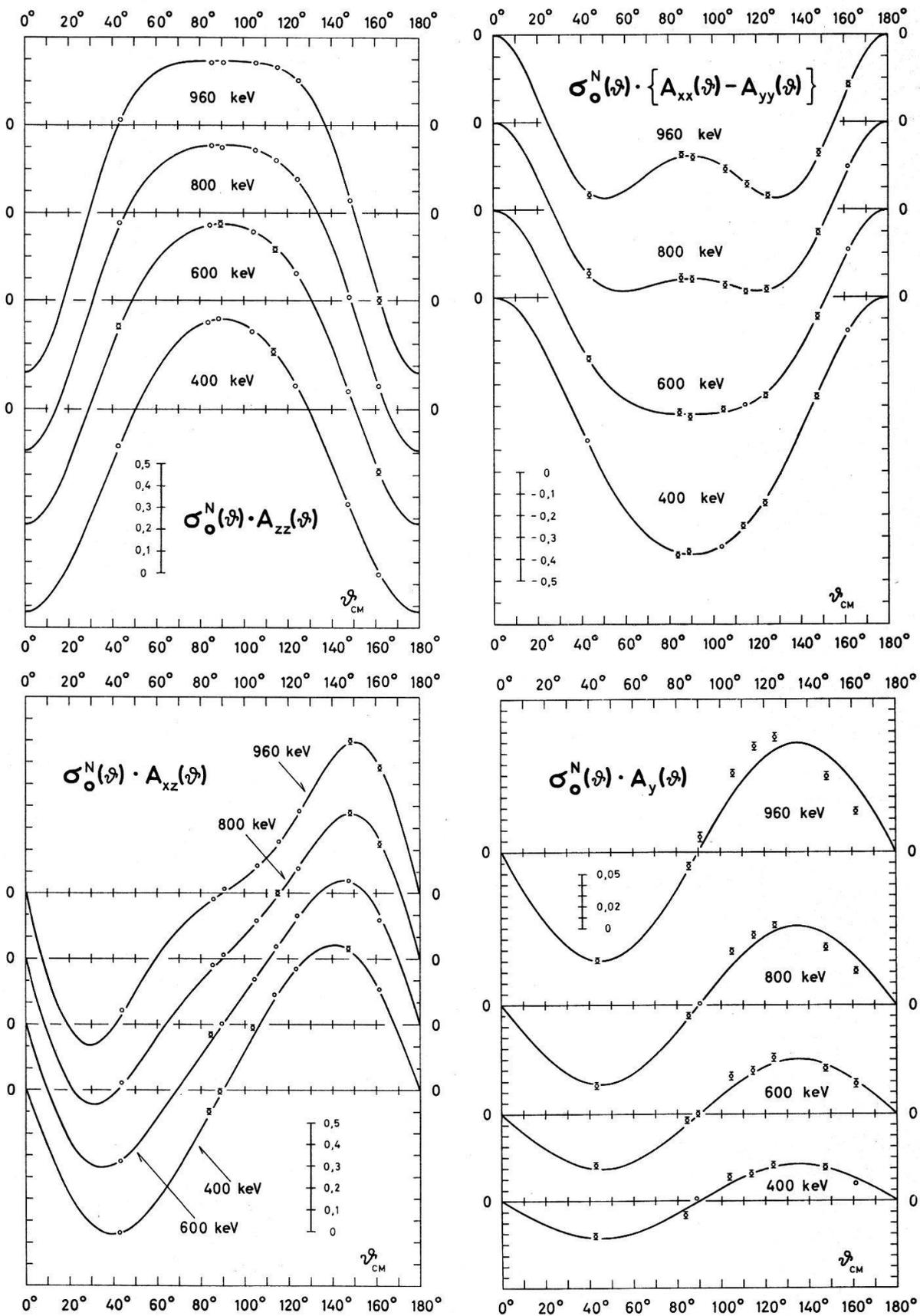
Tabelle 4

Gleichungssystem zur Ermittlung der Entwicklungskoeffizienten aus den Reaktionsmatrixelementen

$b_0^{(0)}$	$= +0,13889 R_{1,1} + 0,25000 R_{5,5} + 0,02778 R_{6,6}$
$a_{zz}^{(0)}$	$= -0,07143 R_{5,5} + 0,17569 R_{1,2} - 0,26352 R_{1,3} + 0,23241 R_{1,4}$
$b_0^{(2)}$	$= +0,25510 R_{5,5} - 0,33201 R_{1,4} + 0,59761 R_{1,5}$
$a_{zz}^{(2)}$	$= -0,13889 R_{1,1} - 0,12755 R_{5,5} \left[ +0,25098 R_{1,2} - 0,18823 R_{1,3} - 0,07115 R_{1,4} - 0,17075 R_{1,5} \right] + 0,17569$
$a_{xx-yy}^{(2)}$	$= -0,06945 R_{1,1} - 0,12755 R_{5,5} \left[ -0,12549 R_{1,2} + 0,09412 R_{1,3} + 0,03557 R_{1,4} + 0,08537 R_{1,5} \right] + 0,08784$
$a_{xz}^{(2)}$	$= -0,06945 R_{1,1} - 0,06377 R_{5,5} \left[ +0,06274 R_{1,2} - 0,04706 R_{1,3} - 0,01779 R_{1,4} - 0,04269 R_{1,5} \right] + 0,08784$
$a_y^{(2)}$	$= -0,07320 I_{1,3} + 0,08300 I_{1,4} + 0,19920 I_{1,5}$
$b_0^{(4)}$	$= +0,13776 R_{5,5}$
$a_{zz}^{(4)}$	$= -0,20037 R_{5,5} \left[ +0,45176 R_{1,2} + 0,45176 R_{1,3} + 0,17075 R_{1,4} - 0,42687 R_{1,5} \right]$
$a_{xx-yy}^{(4)}$	$= -0,02505 R_{5,5} \left[ +0,03765 R_{1,2} + 0,03765 R_{1,3} + 0,01423 R_{1,4} - 0,03557 R_{1,5} \right]$
$a_{xz}^{(4)}$	$= -0,05635 R_{5,5} \left[ +0,11294 R_{1,2} + 0,11294 R_{1,3} + 0,04269 R_{1,4} - 0,10672 R_{1,5} \right]$
$a_y^{(4)}$	$= 0$
$b_0^{(6)}$	$= 0$
$a_{zz}^{(6)}$	$= -0,24351 R_{5,5}$
$a_{xx-yy}^{(6)}$	$= -0,00812 R_{5,5}$
$a_{xz}^{(6)}$	$= -0,04058 R_{5,5}$
$a_y^{(6)}$	$= 0$

Für die  $a_{ij}^{(4)}$ - und  $a_{ij}^{(6)}$ -Koeffizienten ergeben sich Konsistenzrelationen für die getroffenen Annahmen, die durch das Experiment innerhalb der Fehlerschranken bestätigt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass bei diesen Koeffizienten der  $0^+$ -Zustand nicht eingeht. Bei den  $a_{ij}^{(2)}$ -Koeffizienten liefert der  $0^+$ -Zustand seinen Hauptbeitrag und erlaubt es, Übereinstimmung mit dem Experiment herbeizuführen. Ohne den  $0^+$ -Zustand können die für die  $a_{ij}^{(2)}$  geltenden Relationen nur gerade für 400 keV einigermaßen erfüllt werden. Die mit Hilfe der Messresultate berechneten Zahlenwerte für die  $R_{p,q}$  sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die in den  $R_{p,q}$  vorkommenden  $a_0^{(0)}$ -Werte können den Arbeiten [10] und [13] entnommen werden.

Die Beziehungen in Tabelle 4 erlauben keine Aussage über die Werte der Imaginärteile  $I_{1,3}$ ,  $I_{1,4}$  und  $I_{1,5}$ . Im Rahmen der zugelassenen Matrizelementkombinationen sollten die Entwicklungskoeffizienten  $a_y^{(4)}$  nicht auftreten. Bei Deuteronenenergien um



Figur 3

Komponenten der Analysatorstärke der  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ -Reaktion multipliziert mit  $\sigma_0^N(\vartheta)$ . Die eingezeichneten Kurven sind Anpassungen aufgrund der getroffenen Annahmen; die Punkte sind die Messpunkte. Wenn die Fehler nicht angegeben werden, so sind sie in der geometrischen Ausdehnung der Punkte enthalten.

1 MeV sind sie wohl klein, aber deutlich von null verschieden. Daraus folgt, dass entweder die Interferenzterme  $I_{2,3}$ ,  $I_{3,4}$ ,  $I_{3,5}$  und  $I_{4,5}$  nicht mehr vernachlässigt werden dürfen oder aber, dass weitere nicht mehr berücksichtigte Matrixelemente beizutragen beginnen.

Tabelle 5  
Zahlenwerte für die  $R_{p,q}$  aufgrund des Gleichungssystems in Tabelle 4

		400 keV	600 keV	800 keV	960 keV
$R_{1,1} + 0,2$	$R_{6,6}$	$+ 7,20 \pm 0,08$	$+ 7,04 \pm 0,09$	$+ 6,85 \pm 0,11$	$+ 6,73 \pm 0,11$
$R_{1,1} - 1,265$	$R_{1,6}$	$+ 6,05 \pm 0,07$	$+ 5,36 \pm 0,06$	$+ 4,64 \pm 0,06$	$+ 4,16 \pm 0,05$
	$R_{1,2}$	$- 0,05 \pm 0,03$	$- 0,14 \pm 0,02$	$- 0,20 \pm 0,04$	$- 0,23 \pm 0,03$
	$R_{1,3}$	$- 0,14 \pm 0,02$	$- 0,13 \pm 0,02$	$- 0,15 \pm 0,02$	$- 0,20 \pm 0,02$
	$R_{1,4}$	$+ 0,04 \pm 0,02$	$+ 0,08 \pm 0,02$	$+ 0,18 \pm 0,02$	$+ 0,27 \pm 0,02$
	$R_{5,5}$	$+ 0,00 \pm 0,04$	$+ 0,09 \pm 0,04$	$+ 0,20 \pm 0,03$	$+ 0,26 \pm 0,03$
	$R_{1,5}$	$+ 0,09 \pm 0,03$	$+ 0,22 \pm 0,03$	$+ 0,33 \pm 0,04$	$+ 0,45 \pm 0,04$

Die durchgeführte Analyse lässt keine Aussage zu, ob es sich bei den drei Zuständen mit  $J^\pi = 2^+$ ,  $4^+$  und  $0^+$  um Zwischenkernniveaus in  $^8\text{Be}$  handelt. Aufgrund der Arbeiten [1, 5, 6, 8, 15, 16, 19] darf angenommen werden, dass der Zustand mit  $J^\pi = 2^+$  grösstenteils dem  $2^+$ -Niveau mit 22,5 MeV Anregungsenergie entspricht, zu einem kleineren Teil aber auch dem  $2^+$ -Niveau bei 25,3 MeV.

Figur 3 zeigt die unter Annahme der Zustände  $2^+$ ,  $4^+$  und  $0^+$  berechnete  $\vartheta$ -Abhängigkeit der mit  $\sigma_0^N(\vartheta)$  multiplizierten Komponenten der Analysatorstärke. Bei der Vektorkomponente werden nur die  $a_y^{(2)}$ -Koeffizienten berücksichtigt.

## 5.2. Vergleich mit bestehenden Messungen

Die einzigen Messungen gleicher Art und im gleichen Energiegebiet stammen von Bürgisser et al. [15]. Sie wurden bei einer mittleren Deuteronenenergie von 550 keV durchgeführt. Vergleicht man mit den Messungen der vorliegenden Arbeit, so stimmen die Komponenten der Analysatorstärke innerhalb der Fehlergrenzen miteinander überein. Bürgisser et al. konnten ihre Resultate mit einem alleinigen Zustand mit  $J^\pi = 2^+$  erklären, weil ihre Messfehler relativ gross sind.

Für die Ausführung verschiedener Einrichtungen danken wir den Herren des Elektroniklabors und der mechanischen Werkstatt. Die Durchführung dieser Arbeit wurde durch die finanzielle Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds ermöglicht.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] N. P. HEYDENBURG, C. M. HUDSON, D. R. INGLIS und W. D. WHITEHEAD, Phys. Rev. 74, 405 (1948).
- [2] W. WHALING und T. W. BONNER, Phys. Rev. 79, 258 (1950).
- [3] F. HIRST, I. JOHNSTONE und M. J. POOLE, Phil. Mag. 45, 762 (1954).
- [4] I. G. HAN und N. P. HEYDENBURG, Bull. Am. Phys. Soc. 7, 570 (1962).
- [5] J. M. F. JERONYMO, G. S. MANI, F. PICARD und A. SADEGHI, Nucl. Phys. 38, 11 (1962).
- [6] V. MEYER, W. PFEIFER und H. H. STAUB, Helv. phys. Acta 36, 465 (1963).

- [7] Y. P. ANTOUFIEV, M. M. EL-SHESHENI, H. R. SAAD, Z. A. SALEH und P. V. SOROKIN, Nucl. Phys. 48, 299 (1963).
- [8] P. PAUL und K. P. LIEB, Nucl. Phys. 53, 465 (1964).
- [9] G. S. MANI, R. M. FREEMAN, F. PICARD, D. REDON und A. SADEGHI, Proc. Phys. Soc. 85, 281 (1965).
- [10] G. BRUNO, J. DECHARGE, A. PERRIN, G. SURGET und C. THIBAUT, J. Phys. 27, 517 (1966).
- [11] N. LONGEQUEUE, M. M. J. F. CAVAINAC, E. LIGEON, J. P. LONGEQUEUE und H. BEAUMEVIEILLE, J. Phys. 27, 649 (1966).
- [12] G. J. CLARK, D. J. SULLIVAN und P. B. TREACY, Nucl. Phys. A98, 473 (1967).
- [13] F. BERTRAND, G. GRENIER und J. PORNET, Rapport CEA-R-3428, Commissariat à l'Energie Atomique, France (1968).
- [14] L. G. PONDROM und J. W. DAUGHTRY, Proc. of the International Symposium on Polarization Phenomena of Nucleons 1960 (Birkhäuser, Basel 1961), p. 201.
- [15] H. BÜRGISSER, E. BAUMGARTNER, R. E. BENENSON, G. MICHEL, F. SEILER und H. R. STRIEBEL, Helv. phys. Acta 40, 185 (1967).
- [16] G. R. PLATTNER, E. BAUMGARTNER, S. E. DARDEN, H. MEINER und F. SEILER, Helv. phys. Acta 40, 465 (1967).
- [17] W. E. BURCHAM, J. A. R. GRIFFITH, O. KARBAN, G. S. MANI und S. ROMAN, Nucl. Phys. A120, 145 (1968).
- [18] I. G. HAN und N. P. HEYDENBURG, Bull. Am. Phys. Soc. 6, 415 (1961).
- [19] R. M. FREEMAN und G. S. MANI, Proc. Phys. Soc. 85, 267 (1965).
- [20] TSAN UNG CHAN, J. P. LONGEQUEUE, H. BEAUMEVIEILLE, Nucl. Phys. A124, 449 (1969).
- [21] L. J. B. GOLDFARB, Nucl. Phys. 7, 622 (1958).
- [22] L. J. B. GOLDFARB und J. R. ROOK, Nucl. Phys. 12, 494 (1959).
- [23] W. TRÄCHSLIN, H. BÜRGISSER, P. HUBER, G. MICHEL und H. R. STRIEBEL, Helv. phys. Acta 38, 523 (1965).
- [24] E. JAHNKE und F. EMDE, *Funktionentafeln* (Dover Publications, New York).
- [25] T. A. WELTON, *Fast Neutron Physics*, Part II (Interscience, New York, London 1963), p. 1317.
- [26] S. DEVONS, L. J. B. GOLDFARB, *Handbuch der Physik*, Bd. 42 (Springer-Verlag, Berlin 1957), S. 362.
- [27] CL. PETITJEAN, P. HUBER, H. PAETZ gen. SCHIECK und H. R. STRIEBEL, Helv. phys. Acta 40, 401 (1967).
- [28] H. GRUNDER, R. GLEYVOD, G. LIETZ, G. MORGAN, H. RUDIN, F. SEILER und A. STRICKER, Helv. phys. Acta. 44, 662 (1971).
- [29] G. G. OHLSEN, J. L. MCKIBBEN und G. P. LAWRENCE, Proc. of the 3rd International Symposium on Polarization Phenomena in Nuclear Reactions, Madison 1970 (The University of Wisconsin Press, Madison 1971), p. 503.
- [30] W. W. LINDSTROM, R. GARRETT und U. VON MÖLLENDORFF, Nucl. Instr. and Meth. 93, 385 (1971).
- [31] F. SEILER und E. BAUMGARTNER, Nucl. Phys. A153, 193 (1970).