

(Mitteilung aus dem Institut für Sonnenphysik, Astrophysikalisches Observatorium, Potsdam.)

Über Quadrupolmoment und magnetisches Moment von ^{69}Ga und ^{71}Ga .

Von H. Schüler und H. Korsching in Potsdam.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 4. September 1936.)

1. Aus dem $4s\ 5s\ ^3S_1 - 4s\ 5p\ ^3P_{0,1,2}$ -Triplet des Ga II-Spektrums wird das Quadrupolmoment von ^{69}Ga zu $q = +1 \cdot 10^{-24}$ bestimmt, das von ^{71}Ga liegt in dem Bereich $-0,5 < q < +0,5$. 2. Das magnetische Moment ergibt sich aus Ga II in guter Übereinstimmung mit Messungen von Ga I: $\mu_{69} = +2,0$ und $\mu_{71} = +2,5$ Kernmagnetonen. 3. Als Wert für $\frac{\mu_{71}}{\mu_{69}}$ erhalten wir 1,269.
4. Bei $\lambda\ 6456$ und $\lambda\ 6419$ werden kleine Isotopenverschiebungen in der Größe von $\Delta\nu = 7$ bzw. $\Delta\nu = 12 \cdot 10^{-3}\text{ cm}^{-1}$ nachgewiesen, und zwar liegt der Schwerpunkt von ^{69}Ga nach Rot. 5. In einer Tabelle sind alle bisher bestimmten Quadrupolmomente mit den dazugehörigen mechanischen und magnetischen Momenten zusammengestellt.

Für eine Bestimmung des elektrischen Quadrupolmoments von ^{69}Ga und ^{71}Ga ist das Triplet $4s\ 5s\ ^3S_1 - 4s\ 5p\ ^3P_{0,1,2}$ ($\lambda = 6456, 6419, 6334$) des Ga II-Spektrums insofern geeignet, als die notwendigen Komponentenabstände der verschiedenen Isotope soweit getrennt sind, daß man hieraus q berechnen kann. Allerdings sind die Abweichungen von der Intervallregel bei den $^3P_{1,2}$ -Termen sehr klein, denn es handelt sich hier um den höher liegenden $5p$ -Term. Übergänge zu dem $4p$ -Term, wo die Abweichungen von der Intervallregel bedeutend größer sein müßten, liegen leider nicht in dem für das Perot-Fabry-Etalon zugänglichen Gebiet. Es ist deshalb notwendig gewesen, die Termdifferenzen so genau wie möglich zu bestimmen. Wie groß die erreichte Genauigkeit ist, ersieht man in der Fig. 1 aus den gemessenen Termdifferenzen vom $4s\ 5s\ ^3S_1$ -Term. Da ja bekanntlich die Ladungsverteilung von S -Termen kugelsymmetrisch ist, so sollte hier (ein ungestörter Term vorausgesetzt) keine Abweichung von der Intervallregel auftreten. Tatsächlich betragen die in der Figur angegebenen Abweichungen von der Intervallregel für ^{69}Ga nur $\Delta = -0,2$ und für ^{71}Ga $\Delta = -0,6 \cdot 10^{-3}\text{ cm}^{-1}$. Man sieht also daraus, daß bei gut zu messenden Linien die angegebenen Termdifferenzen innerhalb von $1 \cdot 10^{-3}\text{ cm}^{-1}$ genau sind.

Die Spektralbilder der untersuchten drei Linien sind erhalten mit der wassergekühlten Hohlkathodenentladungsröhre¹⁾, dem Zeisschen Dreiprismenvorzerlegungsapparat und einem Perot-Fabry-Etalon. In den Fig. 1 bis 3 sind die Termschemata und darunter die Strukturbilder der drei untersuchten Linien wiedergegeben. Die Figuren für ^{69}Ga , dessen

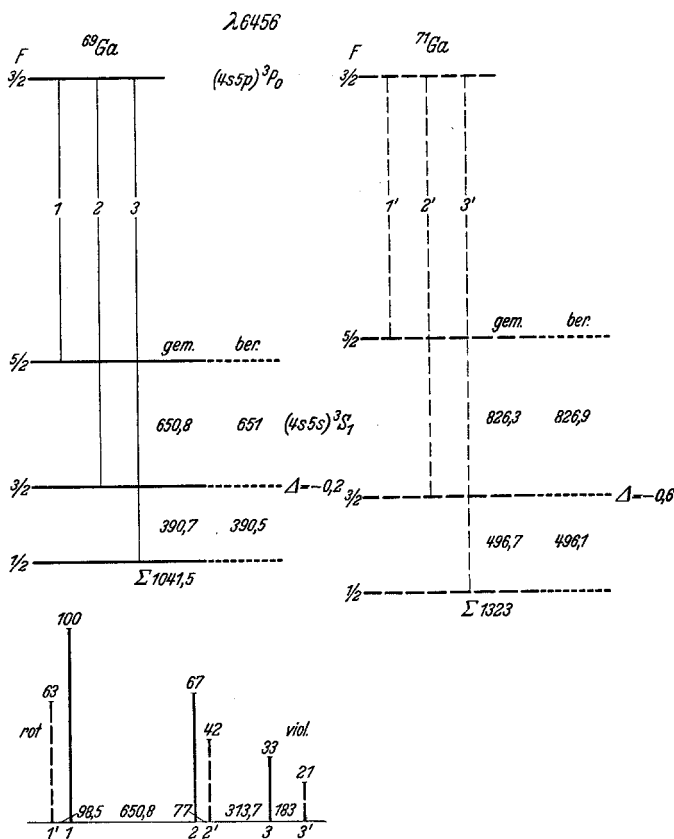


Fig. 1.

Mengenanteil 61,5% beträgt, sind voll ausgezogen, für ^{71}Ga (38,5%) sind die Figuren gestrichelt. Sämtliche Termabstände sind in 10^{-3} cm^{-1} angegeben; in den Strukturbildern sind die Intensitäten der Komponenten durch ihre Länge veranschaulicht, außerdem ist die relative Intensität über jede Komponente gesetzt. Die F -Werte für die Hyperfeinstrukturterme ergeben sich mit Hilfe des mechanischen Momentes $i = \frac{3}{2}$ für beide Isotope.

¹⁾ H. Schüler u. H. Gollnow, ZS. f. Phys. **93**, 611, 1935; H. Schüler, ebenda **35**, 323, 1925.

Die Linie λ 6456 ist bereits von Campbell¹⁾ untersucht worden, um das Verhältnis der magnetischen Momente μ_{71}/μ_{69} zu bestimmen.

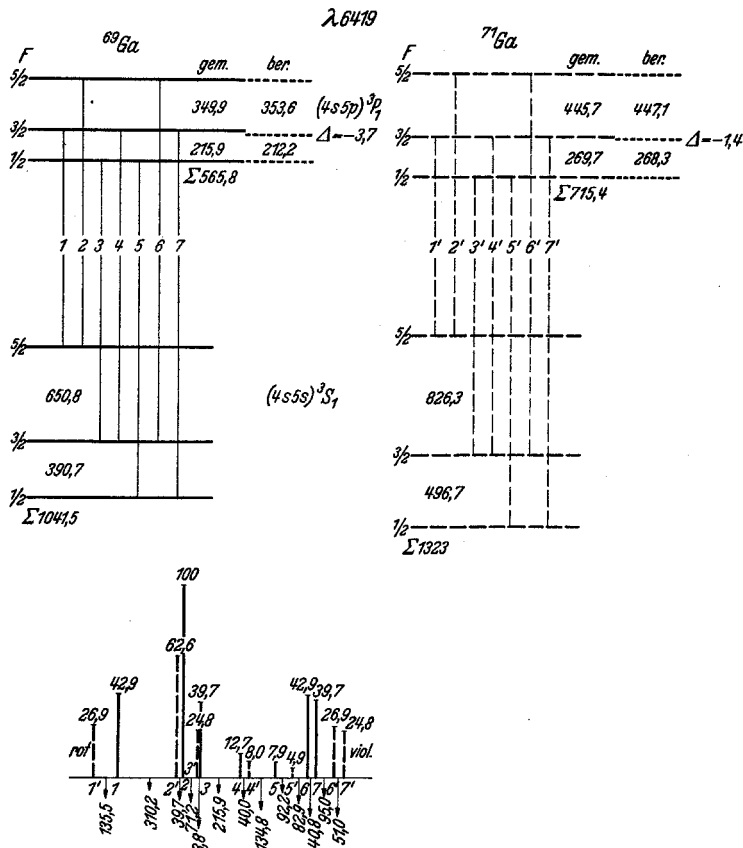


Fig. 2.

Diese Linie mußte deswegen genau bestimmt werden, weil sie die Aufspaltung des 3S_1 -Terms ergibt, der als unterer Term in den beiden anderen Linien auftritt.

Berechnung von q . Die zum Verständnis der folgenden Berechnungen notwendigen Formeln sind bereits in früheren Arbeiten mitgeteilt. Sie

¹⁾ Nature **131**, 204, 1933. In seiner Veröffentlichung hat Campbell darauf hingewiesen, daß bei λ 6456 möglicherweise eine kleine Isotopenverschiebung vorhanden sein könnte. Wir finden aus unseren Messungen bei λ 6456 eine Isotopenverschiebung $\Delta\nu = 7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ und bei λ 6419 $\Delta\nu = 12 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ in dem Sinne, daß ^{69}Ga nach Rot verschoben ist. Diese Werte dürften außerhalb unserer Meßgenauigkeit liegen.

Über Quadrupolmoment und magnetisches Moment von $^{69}_{31}\text{Ga}$ und $^{71}_{31}\text{Ga}$. 437
 werden entsprechend der untenstehenden Anmerkung¹⁾ mit römischen
 Ziffern bezeichnet.

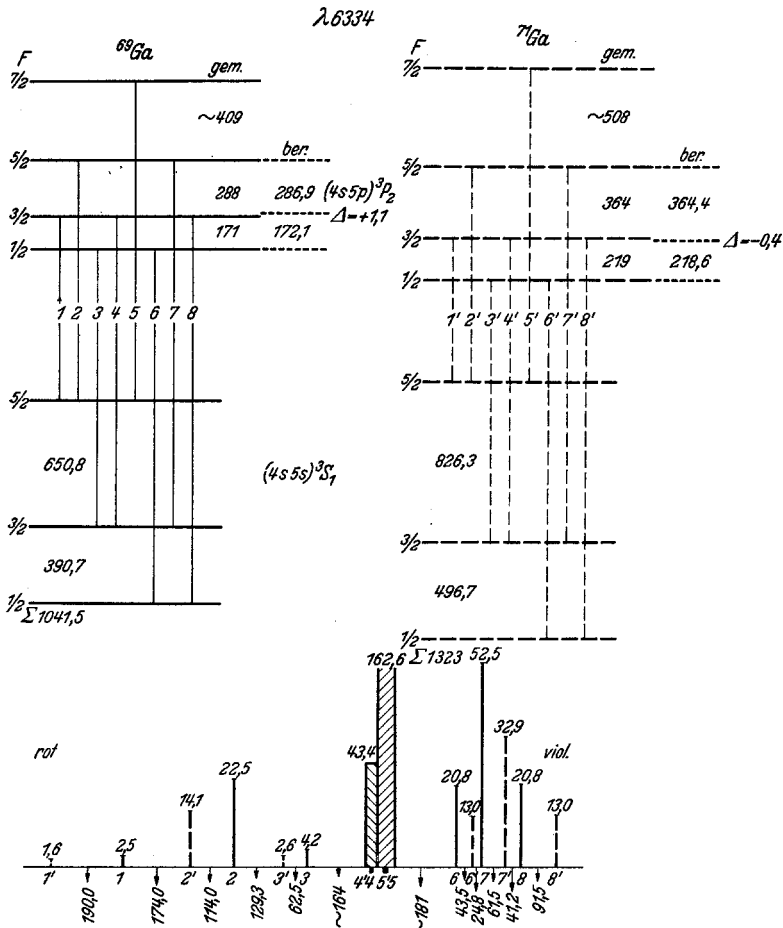


Fig. 3.

Man stellt die Energie der Hyperfeinstrukturterme durch die Formel
 (siehe I, S. 243) $E = a_0 + \frac{a}{2} C + b C(C + 1)$ dar, wo $C = F \cdot (F + 1) - I(I + 1) - J(J + 1)$ ist. Die Konstante a_0 gibt den Abstand des
 Schwerpunktes des Hyperfeinstrukturbildes vom tiefsten Hyperfeinstruktur-

¹⁾ I: H. Schüler u. Th. Schmidt, ZS. f. Phys. **98**, 239, 1935; II: **99**, 717, 1936; III: **100**, 113, 1936; IV: H. Schüler u. M. Marketu, ebenda, im Erscheinen.

term an; a ist der übliche Aufspaltungsfaktor, die Konstante b charakterisiert das Quadrupolmoment. Für den 3P_1 -Term ergibt sich:

Aus 3P_1	a_0	a	b
${}^{69}\text{Ga}$	357,4	+ 140,95	- 0,25
${}^{71}\text{Ga}$	448,6	+ 178,66	- 0,095

Aus den Werten von b ergibt sich nun das Quadrupolmoment q durch folgende Formel (siehe I, S. 243; IV, S. 3):

$$q = - \frac{b \cdot h \cdot c}{3 e^2} \cdot \frac{8 i (2i - 1) \cdot j \cdot (2j - 1)}{r^{-3} (3 \cos^2 d - 1)} \cdot 10^{-3}; \quad (1)$$

hierin ist der Wert von $\frac{1}{r^{-3} \cdot (3 \cos^2 d - 1)}$ aus der Struktur der äußeren Elektronen zu ermitteln. Wenn man nun dabei berücksichtigt, daß die vorliegende Konfiguration $4s 5p$ mittlere Kopplung besitzt und weiter die relativistischen Korrekturen anbringt, so ist der endgültige Ausdruck für q :

$$q_{3P_1} = \frac{b \cdot h \cdot c}{e^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{r^3}} \cdot \frac{4}{3} \cdot i (2i - 1) \frac{l (2l - 1) \cdot (2l + 1) \cdot (l + 1) (2l + 3) \cdot \lambda_{(Z^*)}}{c_1^2 \cdot l \cdot (l + 2) \cdot (2l - 1) R'_l - 6 c_1 c_2 \sqrt{l (l + 1)} \cdot S}; \quad (2)$$

aus der Multiplettaufspaltung ergibt sich:

$$\frac{1}{r^3} = \frac{\delta \cdot h \cdot c}{\mu_0^2 (2l + 1) \cdot Z^*}. \quad (2a)$$

Hierin bedeuten:

h, c, e : universelle Konstanten,

i : Kernmoment (${}^3/2$),

l : Bahnimpuls des P -Terms ($l = 1$),

c_1 und c_2 : Kopplungskonstanten, wie sie bei Breit und Wills¹⁾ definiert sind.

$c_1 = 0,5189$,

$c_2 = 0,8548$,

R'_l und S : relativistische Korrekturen für die Matrixelemente ($p_{3/2} | r^{-3} | p_{3/2}$) bzw. ($p_{3/2} | r^{-3} | p_{1/2}$), diese Korrekturen hat uns Herr Casimir, Leiden, freundlicherweise brieflich mitgeteilt.

$R'_l = 1,03$,

$S = 1,05$,

¹⁾ Breit u. Wills, Phys. Rev. **44**, 470, 1933.

δ : Abstand der Terme 3P_0 bis 3P_2 , $\delta = 299 \text{ cm}^{-1}$,

μ_0 : Bohrsches Magneton,

Z^* : effektive Kernladungszahl für den P -Term, $Z^* = Z - 4 = 27$,

$\lambda_{(IZ^*)}$: relativistische Korrektur der Dublettaufspaltung des $5p$ -Elektrons, $\lambda_{(IZ^*)} = 1,0175$.

Mit Hilfe dieser Werte ergibt sich für

	q_{3P_1}		q_{3P_1}
$^{69}_{31}\text{Ga}$	$+ 1,0 \cdot 10^{-24}$	$^{71}_{31}\text{Ga}$	$+ 0,4 \cdot 10^{-24}$

Es sei noch erwähnt, daß bei der Berechnung von q die Wechselwirkung zwischen Spin des s -Elektrons und Bahn des p -Elektrons, wie eine Kontrolle zeigte, nicht berücksichtigt zu werden braucht. Für die Berechnung von q ist der 3P_2 -Term insofern nicht so günstig, weil, wie Fig. 3 zeigt, die Lage des $F = 7/2$ -Terms nicht genau bestimmt werden kann, denn es fallen die für die Berechnung notwendigen Komponenten 5 und $5'$ zusammen. Wir müssen uns deshalb zur Berechnung der Konstanten a_0 , a und b auf die Differenzen zwischen den Termen $F = 5/2$, $3/2$ und $1/2$ beschränken. Sie ergeben folgende Werte für die Konstanten:

Aus 3P_2	a_0	a	b
^{69}Ga	517,0	$+ 116,1$	$+ 0,075$
^{71}Ga	655,7	$+ 145,3$	$- 0,025$

q ergibt sich dann (siehe II, S. 725 und IV, S. 5) zu:

$$q_{3P_2} = b \cdot Z^* \cdot \frac{1}{\delta} \cdot i(2i - 1) \cdot \frac{\lambda_{(IZ^*)}}{R'_i} \cdot 44,37 \cdot 10^{-24}, \quad (3)$$

wo die Buchstaben die oben angegebene Bedeutung und mitgeteilten Zahlenwerte haben. Es ergibt sich dann:

$$^{69}\text{Ga} \quad q = + 0,9 \cdot 10^{-24},$$

$$^{71}\text{Ga} \quad q = - 0,3 \cdot 10^{-24}.$$

Die q -Werte zusammengestellt ergeben folgendes Bild:

	q_{3P_1}	q_{3P_2}		q_{3P_1}	q_{3P_2}
^{69}Ga	$+ 1,0 \cdot 10^{-24}$	$+ 0,9 \cdot 10^{-24}$	^{71}Ga	$+ 0,4 \cdot 10^{-24}$	$- 0,3 \cdot 10^{-24}$

Für ^{69}Ga ist die Übereinstimmung zwischen beiden q -Werten gut. Wir möchten deshalb für das Quadrupolmoment von ^{69}Ga den Wert

$$\underline{^{69}\text{Ga} \quad q = + 1 \cdot 10^{-24}}$$

angeben. Wobei das positive Vorzeichen ausdrückt, daß der ^{69}Ga -Kern in Richtung der Kernspinachse verlängert ist. Für ^{71}Ga ergeben sich nun q -Werte, die zahlenmäßig kleiner sind und verschiedene Vorzeichen haben. Das bedeutet, ^{71}Ga besitzt einen q -Wert so nahe bei Null, daß die experimentelle Genauigkeit nicht mehr ausreicht, um die Richtung der Kernunsymmetrie anzugeben. Wir möchten den möglichen Bereich, in dem der q -Wert liegen kann, zu $\pm 0,5$ angeben, d. h.:

$$\underline{\underline{^{71}\text{Ga } q = 0 \pm 0,5 \cdot 10^{-24}}}$$

Magnetische Momente. Aus den Aufspaltungsfaktoren a (siehe oben) lassen sich nun weiter mit Hilfe der Formeln von Goudsmit und Fermi die magnetischen Momente μ berechnen. Unter Benutzung der relativistischen Korrekturen und der Kopplungsverhältnisse ergibt sich:

	μ_{69}	μ_{71}
Aus 3S_1	+ 1,94	+ 2,46
Aus $^3P_{2,1}$ { Anteil des s -Elektrons	+ 2,0	+ 2,53
{ Anteil des p -Elektrons	+ 1,91	+ 2,42

Wie die Tabelle zeigt, sind die aus den verschiedenen Termen errechneten magnetischen Momente in guter Übereinstimmung. Wir möchten für $^{69}\text{Ga } \mu = + 2,0$ und für $^{71}\text{Ga } \mu = + 2,5$ als Mittelwert angeben¹⁾. Aus den bekannten Werten von a lassen sich auch die Verhältnisse der magnetischen Momente genauer bestimmen, es ergibt sich:

Aus	3S_1	3P_1	3P_2
μ_{71}/μ_{69}	1,270	1,268	1,252

Die Werte für 3S_1 und 3P_1 stimmen gut überein. Der 3P_2 -Term, der, wie oben bereits bemerkt, nicht so genau ausmeßbar ist, liefert einen weniger zuverlässigen Wert. Es sei deshalb als Mittel der Wert

$$\frac{\mu_{71}}{\mu_{69}} = 1,269$$

¹⁾ Die von D. A. Jackson (ZS. f. Phys. **75**, 229, 1932) aus dem Ga I-Spektrum angegebenen Aufspaltungswerte lassen zwar keine getrennte Berechnung von μ_{71} und μ_{69} zu, weil die beiden Isotope dort nicht getrennt erscheinen; aber der sich daraus ergebende Mittelwert stimmt gut mit den hier gefundenen Werten überein.

angegeben. In Hinblick auf die Größen i , μ , q läßt sich zusammenfassend folgendes sagen: Die Kerne von ^{69}Ga und ^{71}Ga haben zwar das gleiche Kernmoment $i = 3/2$, doch zeigen die Verschiedenheiten ihrer magnetischen Momente und Quadrupolmomente, daß in dem Aufbau wesentliche Unterschiede vorhanden sein müssen.

Auch hier hat wie beim Eu der Kern mit dem kleineren magnetischen Moment das größere Quadrupolmoment und umgekehrt. Eine gewisse Ähnlichkeit scheint zwischen dem ^{71}Ga und den ^{63}Cu , ^{65}Cu -Kernen zu bestehen. Sie haben neben dem gleichen mechanischen Moment $i = 3/2$ das gleiche magnetische Moment; und außerdem besteht auch in bezug auf die Größe ihrer Quadrupolmomente eine gewisse Parallelität. Diese Frage hätte noch genauer entschieden werden können, wenn beim Ga ebenso günstige Terme zur Verfügung gestanden hätten wie beim Cu.

Zum Schluß sind die bisher ermittelten Quadrupolmomente in einer Tabelle zusammengestellt. Außerdem sind die zugehörigen mechanischen Momente i und, soweit bekannt, auch die magnetischen Momente μ eingetragen.

Tabelle 1.

Kern	i	μ Kernmagnetonen	q in 10^{-24}	Bemerkung
$^{63}_{29}\text{Cu}$	$3/2$	+ 2,5	- 0,1	} (l. c. III)
$^{65}_{29}\text{Cu}$	$3/2$	+ 2,6	- 0,1	
$^{69}_{31}\text{Ga}$	$3/2$	+ 2,0	+ 1	
$^{71}_{31}\text{Ga}$	$3/2$	+ 2,5	$0 \pm 0,5$	} (l. c. IV)
$^{75}_{33}\text{As}$	$3/2$	+ 1,5	+ 0,3	
$^{151}_{63}\text{Eu}$	$5/2$	—	$\sim + 1,2$	} s. 1.
$^{153}_{63}\text{Eu}$	$5/2$	—	$\sim + 2,5$	
$^{175}_{71}\text{Cp}$	$7/2$	$\sim + 2,6$	+ 5,9	s. 2.
$^{201}_{80}\text{Hg}$	$3/2$	- 0,6	+ 0,5	(l. c. I)
$^{209}_{83}\text{Bi}$	$9/2$	+ 3,6	- 0,4	(l. c. II)

1. Die beim Eu angegebenen Quadrupolmomente hat Herr Th. Schmidt berechnet. Sie sind etwas kleiner als die früher von H. Casimir angegebenen (Physica 2, 719, 1935). Die Verkleinerung rührt zum Teil von der Berücksichtigung der relativistischen Korrektur her. Die q -Werte sind mit einem \sim -Zeichen versehen, weil die zur Berechnung zur Verfügung stehenden Terme sicher mit anderen Termen vermischt sind.

2. Die Werte von Cp sind von Herrn H. Gollnow in seiner Dissertationsarbeit, die demnächst erscheint, berechnet.

Bei diesen q - und μ -Werten sind alle Korrekturen, so weit bekannt, berücksichtigt.

Die Genauigkeit der Werte ist nicht einheitlich, denn es kommt sehr darauf an, was für Terme des Spektrums für die Beobachtung zur Verfügung stehen und wie weit die Komponenten der Strukturbilder isoliert werden können. Ganz allgemein läßt sich aber sagen, daß die q - und μ -Werte, wenn man sie aus verschiedenen Termen und verschiedenen Spektren berechnet, sehr vernünftig übereinstimmen, wenn man nur Terme benutzt, die ungestört sind. In vielen Fällen kann man das aus dem Grobstrukturschema ersehen.

Ein Teil der benutzten Apparate stammt aus den Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft, der wir sehr zu Dank verpflichtet sind.

Diese Untersuchung wurde mit der dankenswerten Unterstützung der I. G. Farbenindustrie, Ludwigshafen-Oppau, durchgeführt.
