

der gemessenen Schwachfeld-Widerstandsänderung in der Eigenleitung, wenn die Widerstandsänderung in den Einzelbändern vernachlässigt wird. Näherungsweise gilt dann für $\sigma_{p_1} \geq \sigma_{p_2}$ (vgl. ¹⁷)

$$\Delta \rho_i^0 / (\rho_0 B^2) \approx \mu_n \mu_{p_1} (1 + \sigma_{p_2} / \sigma_{p_1}). \quad (21)$$

Daraus ergibt sich als obere Grenze für die elektrische Leitfähigkeit der schnellen Löcher in InAs bei 625 °K: $\sigma_{p_2} \approx \sigma_{p_1}$.

Den Herren Dr. H. WEISS und Dr. H. PFLEIDERER danke ich für wertvolle Hinweise und Diskussionen.

Energie- und Intensitätsmessung der während des Ta^{182} - und Ta^{183} -Zerfalls von W^{182} und W^{183} ausgesandten γ -Strahlung

U. GRUBER, R. KOCH, B. P. MAIER und O. W. B. SCHULT

Laboratorium für Technische Physik der Technischen Hochschule München
und Forschungsanlage der Dänischen Atomenergiekommission in Risø

(Z. Naturforschg. **20 a**, 929–938 [1965]; eingegangen am 2. April 1965)

17 γ -lines were measured in the decay of Ta^{182} and 31 γ -transitions have been observed during the decay of Ta^{183} using the Risø bent crystal spectrometer. The consistency of the energies found was tested by means of the combination principle. The best set of states was determined for the level scheme of W^{182} and W^{183} . Some discrepancies between earlier intensity measurements are removed.

Für die Termschemata von W^{182} und W^{183} besteht großes Interesse, weil sich hier die Eigenschaften stark deformierter Kerne gut studieren lassen. Beim Zerfall von Ta^{182} und Ta^{183} werden viele Niveaus vom W^{182} und W^{183} angeregt, weshalb diese Niveaus häufig untersucht wurden ^{1–22} und die Grundzüge der Niveauschemata bekannt sind. Genaue Energien der emittierten Linien wurden von MURRAY ¹ und insbesondere, jedoch nur unvollständig, von SEPPI ¹⁸ mit einem Kristallspektrometer gemessen. In der vorliegenden Arbeit wurde der Zerfall von Ta^{182} und Ta^{183} erneut mit einem Spektrometer mit ge-

bogenem Quarzkristall untersucht, und zwar aus folgenden Gründen:

a) Kürzlich wurde mit dem Risø-Spektrometer das $Nb^{93}(n,\gamma)Nb^{94}$ -Spektrum aufgenommen ²³. Die Niobiumquelle enthielt kleine Tantalverunreinigungen (etwa 0,1%), weshalb eine zusätzliche Untersuchung des Tantalspektrums nötig war. Im Anschluß daran konnte nach Abschalten des Reaktors der Zerfall der durch Neutroneneinfang gebildeten Kerne Ta^{182} und Ta^{183} gemessen werden.

b) Zwischen früheren Intensitätsmessungen ^{18, 19} an den von W^{182} und W^{183} ausgesandten Linien be-

¹ J. J. MURRAY, F. BOEHM, P. MARMIER u. J. W. M. DuMOND, Phys. Rev. **97**, 1007 [1955].

² R. C. WILLIAMS u. K. I. ROULSTON, Canad. J. Phys. **34**, 1087 [1956].

³ J. DEMUYNCK, J. VERHAEGE u. B. VAN DER VELDE, C. R. Acad. Sci., Paris **244**, 3050 [1957].

⁴ P. O. FRÖMAN u. H. RYDE, Arkiv Fysik **12**, 399 [1957].

⁵ O. J. SUMBAYEV, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz. **21**, 987 [1957].

⁶ B. P. SINGH, H. S. HANS u. P. S. GILL, Nuovo Cim. **14**, 99 [1959].

⁷ N. A. VOINOVA, B. S. DZELEPOV u. N. N. ZUKOVSKIY, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz. **23**, 828 [1959].

⁸ W. F. EDWARDS, F. BOEHM, J. ROGERS u. E. J. SEPPI, erscheint in Nucl. Phys.

⁹ H. DANIEL, Z. Naturforschg. **15 a**, 284 [1960].

¹⁰ V. S. GVOZDEV, L. J. RUSINOV u. J. L. KHASOV, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz. **24**, 1444 [1960].

¹¹ G. D. HICKMANN u. M. L. WIEDENBECK, Phys. Rev. **118**, 284 [1960].

¹² S. S. VASILLENKO, M. G. KAKANSKIY, D. L. KAMINSKIY u. S. F. KOKZAROVA, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz. **25**, 61 [1961].

¹³ V. D. VITMAN, N. A. VOINOVA, B. S. DZELEPOV u. A. A. KARAN, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz. **25**, 199 [1961].

¹⁴ N. A. VOINOVA, B. S. DZELEPOV u. J. V. CHOLNOV, Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz. **25**, 233 [1961].

¹⁵ J. AUROJA MOREIRA, C. R. Acad. Sci., Paris **255**, 884 [1962].

¹⁶ H. RYDE u. Z. SUJKOWSKI, Arkiv Fysik **20**, 289 [1962].

¹⁷ M. S. EL-NESR, Z. GRABOSKI u. E. BASHANDY, Arkiv Fysik **23**, 283 [1963].

¹⁸ E. J. SEPPI, H. HENRIKSON, F. BOEHM u. J. W. M. DuMOND, Nucl. Instr. **16**, 17 [1962].

¹⁹ H. DANIEL, J. HUEFNER, Th. LORENZ, O. W. B. SCHULT u. U. GRUBER, Nucl. Phys. **56**, 147 [1964].

^{20a} P. G. HANSEN, H. L. NIELSEN u. K. WILSKY, Nucl. Phys. **54**, 657 [1964].

^{20b} H. L. NIELSEN u. C. J. GALLAGHER, Nucl. Phys. **24**, 422 [1961].

²¹ S. V. STARODUBTSEV, Soviet Phys. — JETP **18**, 635 [1964].

²² W. MOLL, Dissertation, Labor f. Techn. Physik, Techn. Hochschule München 1964.

²³ U. GRUBER, O. W. B. SCHULT u. R. SHELIN, erscheint in Nucl. Phys.



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 digitalized 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.

standen Unterschiede, die außerhalb des zweifachen Fehlers lagen. Die Intensitäten dieser Übergänge sollten erneut ermittelt werden.

c) In der Arbeit von MURRAY¹ wird von einer 33 keV-Linie des W¹⁸² berichtet. Von uns konnte diese Linie nicht gefunden werden¹⁹. Hingegen beobachtete MOLL²² einen Reflex mit 31,7 keV. Die genaue Energie dieses Übergangs sollte bestimmt und sein Einbau in das Niveauschema überprüft werden.

d) Sowohl beim Zerfall von Ta¹⁸² als auch beim Zerfall von Ta¹⁸³ wird eine 84 keV-Linie emittiert. Die Energien dieser Übergänge unterscheiden sich nur so geringfügig, daß sie bisher nicht voneinander getrennt beobachtet werden konnten, was eine genaue Energiebestimmung der Komponenten erschwerte. Es lag darum nahe, das hohe Auflösungsvermögen des Risö-Spektrometers auszunützen, um die Energien der beiden Linien in einer Messung zu ermitteln.

e) Energiekombinationsgleichungen bieten ein wichtiges Hilfsmittel zur Aufstellung eines neuen Niveauschemas, wenn die Energien der Übergänge sehr genau bestimmt wurden. In diesem Fall konnte, da das Termschema schon bekannt war, untersucht werden, wie die zahlreichen Kombinationsgleichungen durch die am Risö-Spektrometer gemessenen Energien erfüllt werden. Es ergab sich somit die Möglichkeit, die mit dem Spektrometer erreichbare Genauigkeit näher zu untersuchen.

1. Versuchsanordnung

Die Messungen wurden mit dem Kristallspektrometer mit gebogenem Quarz vorgenommen²⁴. Die Quelle, ein $0,1 \times 6 \times 30$ mm³ großes Tantal-Metallblech von 300 mg Gewicht, hing an zwei dünnen Kupferdrähten in einem der horizontalen Tangentialkanäle des DR-3-Reaktors. Die Isotope Ta¹⁸² und Ta¹⁸³ entstanden durch Neutroneneinfang bei der dreiwöchigen Bestrahlung in einem Fluß von 6×10^{13} n·cm⁻²·sec⁻¹. Ihre Halbwertszeiten von 115 und 5 Tagen ermöglichten die Untersuchung des Zerfalls nach Abschalten des Reaktors.

Mit dieser Tantalquelle wurde eine Halbwertsbreite der Reflexe von 8'' gemessen, was einer Auflösung von

$$\Delta E/E = 1,6 \cdot 10^{-5} E/n$$

(E = Energie in keV, n = Ordnung des Reflexes)

oder $\Delta E/E = 3,2 \cdot 10^{-4}$ für eine 100 keV-Strahlung in der 5. Ordnung entspricht.

Eine Reflexbreite von weniger als 5'' (dies ist die kleinste uns bekannte Linienbreite, die bisher mit einem gebogenen Kristall beobachtet wurde, Abb. 1 a) war bei früheren Messungen erreicht worden. Sehr kleine Verdrehungen der 6 mm tiefen Quelle, die sich bei einem freihängenden Metallblech nahe dem Reaktorkern schwer vermeiden lassen, ergaben die Verbreiterung der Reflexe in dieser Untersuchung.

2. Meßmethode

Nahezu alle Linien wurden mehrmals punktweise auf beiden Seiten der Nullposition mit dem Theodoliten T4 (Fa. Wild, Heerbrugg, Schweiz) gemessen. Nur einige sehr schwache Übergänge wurden auf dem Registrierstreifen des automatisch aufgezeichneten Spektrums gesucht und ihre Energien aus dem Vergleich mit nahe benachbarten, punktweise gemessenen Linien bestimmt.

Der Messung relativer Intensitäten dienten die integralen Zählraten, die nach Abzug des Untergrunds und unter Berücksichtigung der Diskriminatoreinstellung bei gleichmäßiger kleiner Winkelgeschwindigkeit des Spektrometers unter einem Reflex erhalten wurden. Da nur die Intensitäten benachbarter Linien verglichen wurden, waren nur kleine Korrekturfaktoren für die Absorption und die Nachweisempfindlichkeit notwendig.

3. Meßergebnis und Diskussion

3.1. Intensitäten

Die von EDWARDS⁸ und uns früher gemessenen γ -Intensitäten¹⁹ zeigen Übereinstimmung mit der Ausnahme einiger Linien. Die Abweichungen übersteigen den zweifachen Fehler bei den 156 und 152 keV-Linien des W¹⁸² und den 101, 102 und 142 keV-Übergängen des W¹⁸³. Für die 103 keV-Strahlung wurde von EDWARDS sogar eine dreimal größere Intensität, als wir sie beobachtet hatten, angegeben.

Die 152 und 156 keV-Reflexe konnten relativ zur 179 keV-Linie gemessen werden, bei der gute Übereinstimmung zwischen den früheren Messungen herrscht. Die neuen Werte, Tab. 1, wurden aus 3 Messungen, zwei in der 3. Ordnung und einer in der 2. Ordnung, gemittelt. Die Fehler übersteigen die statistischen Fehler, die man aus den Zählraten erhält, da kleine Drehungen der 6 mm tiefen Quelle die Absorption in ihr merklich ändern.

Die für diese Linien gefundenen Werte bestätigen EDWARDS Angaben. Die Abweichungen von den von uns früher erhaltenen Intensitäten beruhen wahrscheinlich darauf, daß kleine Verschiebungen der Quelle oder des Spektrometers von 5/100 mm durch

²⁴ U. GRUBER, B. P. MAIER u. O. W. B. SCHULT, Kernphysik 5, 17, 19 [1963].

Energie der Linien (keV)	Relative Intensitäten		
	Neue Messung	Risö	EDWARDS
179 (W^{182}) *	23 \pm 0,8	23 \pm 1,2	23 \pm 1,0
156	20,7 \pm 1,3	16,8 \pm 0,9	20,1 \pm 0,9
152	52,6 \pm 1,5	44,8 \pm 1,8	51,2 \pm 2,0
99 (W^{183}) *	26,6 \pm 1,5	26,6 \pm 1,5	26,6 \pm 1,6
101	1,12 \pm 0,09	1,22 \pm 0,07	1,5 \pm 0,12
102	0,48 \pm 0,04	0,51 \pm 0,03	0,82 \pm 0,09
103	0,35 \pm 0,04	0,35 \pm 0,02	1,17 \pm 0,13
144 (W^{183}) *	9,5 \pm 0,4	9,5 \pm 0,4	9,5 \pm 0,6
142	1,4 \pm 0,1	1,4 \pm 0,06	1,05 \pm 0,06

Tab. 1. Relative Intensitäten. * Bezugslinie.

thermische Effekte oder durch Arbeiten in der Reaktorhalle hervorgerufen werden. Bei der damals erfolgten¹⁹ nur einmaligen Messung der Zählraten konnten derartige Verschiebungen Änderungen der Intensitäten bewirken, die in der Größenordnung des beobachteten Effekts liegen.

Die Intensitäten der 101 keV-, 102 keV- und 103 keV-Übergänge wurden relativ zur 99 keV-Linie bestimmt, die Intensität der 142 keV-Strahlung ergab sich aus dem Vergleich mit der 144 keV-Linie. Es wurde gute Übereinstimmung mit unseren früheren Messungen erhalten.

3.2. Energien

Bei der Angabe der Energien besteht folgendes Problem. Der Reflexionswinkel und damit die Wellenlänge eines Übergangs läßt sich sehr genau relativ zu einer anderen Linie des gleichen Spektrums bestimmen. Gibt man aber die Energien in keV an, so müssen verschiedene Umrechnungsfaktoren benutzt werden, deren Fehler vergleichbar mit den reinen Meßfehlern sind. Für die Erfüllung der Kombinationsgleichungen und für andere relative Energiebeziehungen (z. B. Vergleich verschiedener Meßdaten) sind die Fehler dieser Umrechnungsfaktoren jedoch nicht von Interesse. Der Meßfehler und der Fehler der Linien in keV wird deshalb von uns getrennt angegeben.

3.2.1. Relative Energien

Den Meßfehler erhalten wir aus den Abweichungen der einzelnen Messungen von dem gemittelten Winkel. Bei einer Linienbreite von 8'' erreichen wir eine Genauigkeit zwischen 0,1'' und 0,3''. Nur sehr

schwache Linien wurden aus der automatischen Aufzeichnung mit einem Fehler von etwa $\pm 1''$ entnommen, wenn eine dicht benachbarte Bezugslinie gemessen worden war. Der Fehler, der sich aus der statistischen Schwankung der Zählraten ergibt²⁵,

$$\Delta\varphi \approx 0,3 W/\sqrt{Z}$$

(Z = Zählrate unter dem Reflex, W = Linienhalbwertsbreite), ist meist vernachlässigbar klein und muß nur für sehr schwache Linien berücksichtigt werden.

Die Winkelskala des Theodoliten ist auf $\pm 0,1''$ linear. Deshalb wurde ein Fehler von 0,1'' zu den Meßfehlern addiert. Da man einen Winkelbereich von $\pm 20'$ gleichzeitig im Theodoliten übersieht, kann dieser Fehler bei der relativen Energieangabe benachbarter Linien unberücksichtigt bleiben.

3.2.2. Absolute Energien

Der Fehler, der sich bei der Umrechnung von relativen auf absolute Energien ergibt, ist derselbe für alle Linien und wurde quadratisch zu dem Meßfehler addiert. Er setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen:

1. Eine Bezugslinie muß gemessen werden. Der Fehler bei deren Winkelbestimmung entspricht dem Meßfehler, der in dem vorigen Abschnitt diskutiert wurde.

Die am genauesten gemessenen Wellenlängen sind RÖNTGEN- $K\alpha$ -Linien^{26, 27}. Deshalb ist es üblich, sich auf diese Linien zu beziehen, obwohl sie einen großen Nachteil gegenüber γ -Übergängen aufweisen. Ihre natürliche Halbwertsbreite beträgt mehrere eV (etwa 60 eV für die $W-K\alpha$ -Linien) und ist daher leicht mit einem Kristallspektrometer zu beobachten. Die Linienbreite der $W-K\alpha$ -Linie beträgt beispielsweise 30'' in der 4. Ordnung der Reflexe (Abb. 1 b), während keine Verbreiterung bei γ -Linien auftritt. Wenn man den Reflexionswinkel auf 1/30 der Halbwertsbreite bestimmt, bedeutet dies eine erreichbare Genauigkeit von $6 \cdot 10^{-6}$ für eine γ -Linie bei 8 Grad, aber nur von $3,6 \cdot 10^{-5}$ für eine RÖNTGEN-Linie.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß RÖNTGEN-Linien, die bei der Anregung der von uns häufig angewandten stark angereicherten Isotope ausgesandt werden, auf Grund der Isotopieverschiebung andere Wellenlängen haben als die Standard-RÖNT-

²⁵ J. W. KNOWLES, ANL 6797, 156 [1963].

²⁶ P. BERGVALL, Arkiv Fysik 16, 57 [1959].

²⁷ J. A. BEARDEN, NYO-10586 [1964].

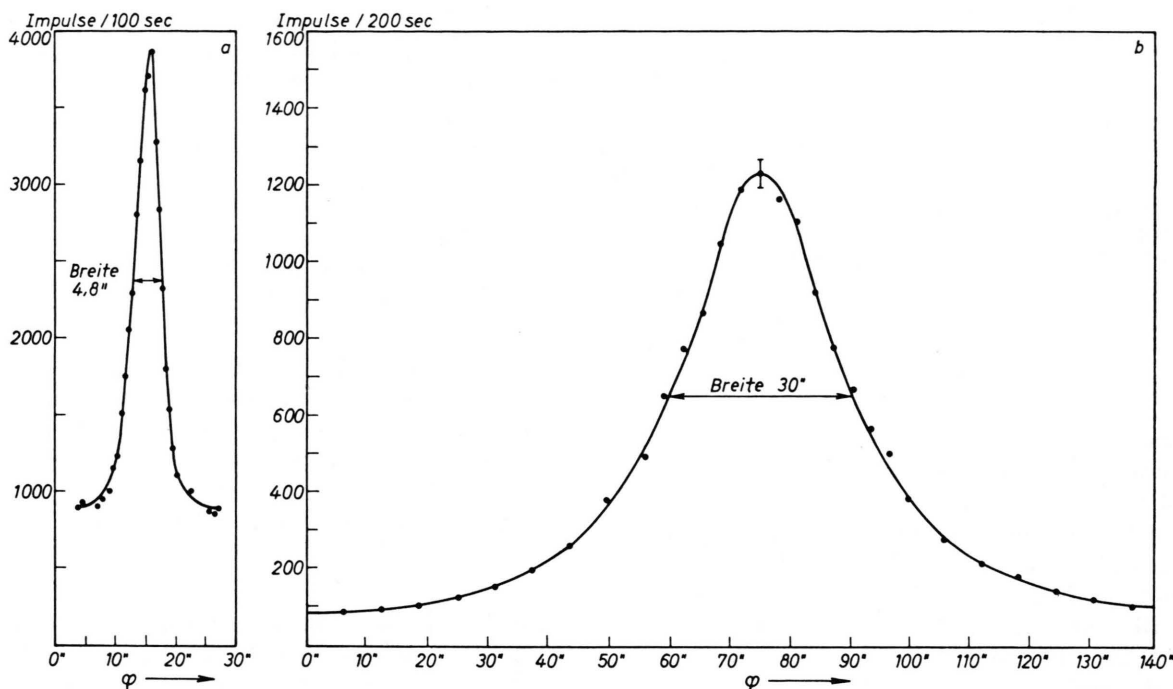


Abb. 1. a) Linienform eines γ -Übergangs. b) Linienform einer Röntgen- K_α -Linie in der 4. Ordnung.

GEN-Linien, die mit natürlichen Elementen gemessen wurden. Damit tritt eine zusätzliche Unsicherheit bei der Energieeichung mit diesen Linien auf.

2. Die Wellenlängen, die relativ zu einer Röntgen-Strahlung gemessen wurden, müssen in X-Einheiten umgerechnet werden. Viel Verwirrung entsteht aus der Tatsache, daß verschiedene X-Einheiten gebräuchlich sind:

a) Die X-Einheit wurde von SIEGBAHN eingeführt, der sie durch die Gitterkonstante eines idealen Kalkspats $d = 3029,04$ XE festlegte²⁸.

b) Die X-Einheit ist definiert als 1000 XE = $1,00202$ Å!²⁹

c) Die Wellenlänge der Mo- $K_{\alpha 1}$ -Strahlung ist definiert zu $707,8310$ XE³⁰.

d) BEARDEN legte bei der Bestimmung des Umrechnungsfaktors von XE/Å eine Wellenlänge von $\lambda(K_{\alpha 1} - \text{Cu}) = 1537,400$ XE zugrunde, was einer vierten Definition der X-Einheit entspricht³¹.

Nur die letzten beiden Einheiten sind für uns brauchbar, da wir Wellenlängen miteinander ver-

gleichen müssen. Die Schwierigkeit besteht darin, daß durch diese beiden Angaben verschiedene X-Einheiten gegeben sind, wie eine genaue Bestimmung des Verhältnisses

$$\frac{\lambda(K_{\alpha 1} - \text{Cu})}{\lambda(K_{\alpha 1} - \text{Mo})} = \frac{7078310}{1537370 \pm 2} \text{ zeigte }^{32}.$$

In dieser Arbeit wurden die Energien auf die W- $K_{\alpha 1}$ -Strahlung als Referenzlinie bezogen. Ihre Wellenlänge wurde am genauesten von BEARDEN als $(208,5770 \pm 0,0003)$ XE relativ zur Mo- $K_{\alpha 1}$ -Linie bestimmt³².

3. Die Wellenlängen in X-Einheiten müssen in Ångström-Einheiten umgerechnet werden. Der genaueste Konversionsfaktor wurde von BEARDEN als 1000 XE = $(1,002057 \pm 5 \cdot 10^{-6})$ Å angegeben³¹.

Zur Bestimmung dieses Wertes wurde die Cu- $K_{\alpha 1}$ -Linie zu $(1537,400 \pm 0,2002)$ XE angenommen, ein Wert also, der nicht in Übereinstimmung mit der „Molybdän X-Einheit“ ist, wie vorher gezeigt wurde.

²⁸ M. SIEGBAHN, Phil. Mag. 37, 601 [1919].

²⁹ A. E. SANDSTRÖM, Handbuch der Physik, Bd. 30, S. 93, 1957.

³⁰ P. BERGVALL, O. HÖRNFELDT u. C. NORDLING, Arkiv Fysik 17, 113 [1960].

³¹ I. HENINS u. J. A. BEARDEN, Phys. Rev. 135, 890 [1964].

³² J. A. BEARDEN, A. HENINS, J. G. MARZOLF, W. C. SAUDER u. J. S. THOMSEN, Phys. Rev. 135, A 899 [1964].

Mit dem genau gemessenen Verhältnis³² $Mo - K_{\alpha 1}/Cu - K_{\alpha 1}$ wurde der Konversionsfaktor zu $1000\text{ XE} = (1,002077 \pm 5 \cdot 10^{-6}) \text{ \AA}$ berechnet³³.

4. Die absoluten Energien in keV wurden aus den Wellenlängen durch Anwendung des Konversionsfaktors³⁴

$$E\lambda = 12398,10 \cdot 10^{-8} \text{ eV} \cdot \text{cm}$$

erhalten.

Die Umrechnungsfaktoren, die in dieser Arbeit benutzt wurden, sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Wellenlänge der Wolfram- $K_{\alpha 1}$ -Linie: $\lambda = (208,5770 \pm 0,0003) \text{ XE},$ $1000 \text{ XE} = (1,002077 \pm 0,000005) \text{ \AA},$ $E\lambda = (12398,10 \pm 0,13) \text{ eV} \cdot \text{cm},$
--

Tab. 2. Eichlinie und Umrechnungsfaktoren.

3.2.3. Winkelpositionen der 107 keV-, 246 keV- und 354 keV-Linien

Besondere Sorgfalt wurde darauf verwandt, die Energien der 107 keV-, 246 keV- und 354 keV-Übergänge zu bestimmen. Diese Messungen dienten zwei Zielen. Erstens sollte gezeigt und an Hand der Energiegleichung $107 + 246 = 354 \text{ keV}$ überprüft werden, wie genau am Risö-Spektrometer Energien gemessen werden können. Zweitens sollte eine Nicht-linearität, wie sie bei unserer Anordnung auftritt³⁵, genauer bestimmt werden.

Die oben genannten drei Linien wurden von jedem Autor in verschiedenen Ordnungen gemessen; der 107 keV-Übergang in der 1., 2., 3., 4. und 5. Ordnung, die 246 keV- und 354 keV-Linien in 3., 4., 5. und 7. Ordnung.

Die Reflexe der 107 keV-Linie in 2. Ordnung, der Reflex der 246 keV-Linie in 5. Ordnung und der Reflex der 354 keV-Linie in 7. Ordnung liegen nur $15'$ voneinander getrennt. Bei der Berechnung der Energien aus diesen Winkelpositionen brauchte deshalb hier der Teilkreisfehler des Theodoliten nicht berücksichtigt zu werden.

Aus den Reflexen in den übrigen Ordnungen wurde eine Korrektur von $k = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ Grad}^{-1}$ für einen Reflexionswinkel von mehr als $2^\circ 50'$ gefunden. Bei kleineren Winkeln war keine Korrektur nötig.

³³ J. A. BEARDEN gibt in einer neuen Arbeit (Phys. Rev. Letters 13, A 6 [1964]) einen Konversionsfaktor von $1000 \text{ XE} = (1,002076 \pm 9 \cdot 10^{-6}) \text{ \AA}$ an.

³⁴ E. R. COHEN u. J. W. M. DUMOND, Proc. Intern. Conf. on Nuclidic Masses and Atomic Constants, Vienna 1963.

3.2.4. Energien der Zerfallslinien

Die γ -Linien, die bei dem Zerfall von Ta^{183} ausgesandt werden, sind in Tab. 3 aufgeführt. In der 2. Spalte werden relative Energien angegeben. Diese Werte wurden durch einen Anschluß nach der Methode der kleinsten Quadrate an die Energien 107 keV, 246 keV und 354 keV von SEPP¹⁸ erhalten und gestatten somit einen Vergleich mit dessen Resultaten. Ein direkter Vergleich der Energien war nicht möglich, da SEPP nicht die Wellenlängen seiner Referenzlinie und die Konversionsfaktoren veröffentlichte. Die Fehler ΔE_m enthalten nur den Meßfehler und sind somit den Fehlern, die von SEPP angegeben werden, vergleichbar³⁶.

Die relativen Energien der Zerfallslinien von Ta^{182} , Tab. 4, Spalte 2, ergaben sich durch Anschluß an SEPP's 18 100 keV-Linie.

84 keV-Linien

Wie bereits erwähnt, wird sowohl beim Zerfall des Ta^{183} als auch beim Zerfall des Ta^{182} eine 84 keV-Linie emittiert. Ihre Energien sind nahezu gleich, so daß sie bisher nicht getrennt beobachtet werden konnten.

Aus den bekannten Intensitäten schätzten wir den Zeitpunkt ab, an dem beide Linien gleich intensiv sein sollten. (Linien gleicher Intensität lassen sich am besten auflösen.) Die automatische Aufzeichnung der Linien in 5. Ordnung ergab zwei Linien, die nur $10''$ bei $8^\circ 30'$ voneinander entfernt lagen, was einer Energiedifferenz von $3 \cdot 10^{-4}$ entspricht (Abb. 2 a).

In einer Aufzeichnung, die 13 Tage später vorgenommen wurde, war die Linie, die zum Zerfall des Ta^{183} gehört, hinreichend abgeklungen, während die andere Linie in der früheren Winkelposition erschien (Abb. 2 b).

313 keV-Linien

Bei der Messung der 313 keV-Linie in der 5. Ordnung wurde eine ungewöhnlich große Linienbreite von $11''$ beobachtet. Die Energie, die sich aus dem Schwerpunkt der Linie berechnen ließ, paßte nicht in das Niveauschema, so daß ein Dublett vermutet wurde, obwohl das Auflösungsvermögen bei diesem Winkel 10^{-3} betrug.

³⁵ O. W. B. SCHULT, B. P. MAIER, U. GRUBER u. R. KOCH, ANL 6797, 111 [1963].

³⁶ Private Mitteilung von F. BOEHM, wonach die Fehler der Konversionsfaktoren nicht enthalten sind.

Nr.	Energie rel. Wert E_r	Meßfehler ΔE_m	Energie SEPPI E_s	Meßfehler SEPPI ΔE_s	$E_r - E_s$	Energie absol. Wert [keV]	Gesamtfehler [eV]
					$\sqrt{\Delta E_m^2 + \Delta E_s^2}$		
1	40,9762	0,0005	52,598	0,001	-2,2	40,9758	1
2	46,4841	0,001				46,4837	1
3	52,5938	0,0015				52,5933	2
4	82,9183	0,0012				82,9175	2
5	84,7117	0,0017				84,7109	2
6	99,0798	0,0016				99,0788	2
7	101,9352	0,0014				101,9342	2
8	102,4823	0,0018	107,933	0,001	-0,8	102,4813	3
9	103,1484	0,005				103,1474	5
10	107,9321	0,0007				107,9311	2
11	109,7271	0,0018				109,7260	3
12	120,3737	0,0028				120,3725	3
13	142,2712	0,0055				142,2698	6
14	144,1259	0,0023				144,1245	3
15	160,5289	0,0024	162,323	0,002	-0,7	160,5273	4
16	161,3441	0,004				161,3425	5
17	162,3207	0,0025				162,3191	4
18	192,6450	0,005				192,6431	6
19	203,2863	0,007				203,2843	8
20	205,0865	0,006				205,0845	7
21	208,8125	0,009	208,814	0,007	-0,1	208,8104	7
22	209,8663	0,007	209,860	0,005	+0,7	209,8642	8
23	244,2648	0,004	244,264	0,006	0	244,2624	6
24	245,2375	0,005	245,237	0,008	0	245,2351	6
25	246,0631	0,002	246,056	0,002	+2,5	246,0607	5
26	291,7221	0,006	354,004	0,010	-0,7	291,7192	8
27	313,0079	0,03				313,0048	30
28	313,2789	0,03				313,2758	30
29	353,9965	0,004				353,9930	8
30	365,6471	0,03				365,6435	30
31	406,6160	0,023				406,6120	23

Tab. 3. Energien der Linien vom W^{183} . Die in diesem Experiment gewonnenen relativen Energien E_r sind numerisch an die 107,246 keV- und 345 keV-Linien von SEPPI angeschlossen worden, weil diese Übergänge in der Arbeit von SEPPI mit der größten relativen Genauigkeit angegeben worden sind. Ein Vergleich ist somit nur zwischen den Werten E_s und E_r möglich, nicht aber zwischen E_s und den in der vorletzten Spalte angegebenen absoluten Energien.

Nr.	Energie rel. Wert E_r	Meßfehler ΔE_m	Energie SEPPI E_s	Meßfehler SEPPI ΔE_s	$E_r - E_s$	Energie absol. Wert [keV]	Gesamtfehler [eV]
					$\sqrt{\Delta E_r^2 + \Delta E_s^2}$		
1	31,7368	0,0008	65,723	0,001	0,9	31,7351	1
2	42,7164	0,0016				42,7141	2
3	65,7243	0,001				65,7207	2
4	67,7516	0,0014				67,7479	2
5	84,6830	0,0017				84,6783	3
6	100,1070	0,0015				100,1015	2
7	113,6775	0,002				113,6713	3
8	116,4203	0,003	116,421	0,003	0,2	116,4139	4
9	152,4369	0,002	152,441	0,003	1,1	152,4286	3
10	156,3973	0,003	156,386	0,003	2,7	156,3887	4
11	179,4017	0,0036	179,394	0,004	1,3	179,3918	5
12	198,3686	0,0075	198,356	0,005	1,3	198,3577	8
13	222,1158	0,0045	222,114	0,004	0,3	222,1036	5
14	229,3297	0,007	229,327	0,013	0,2	229,3171	8
15	264,0824	0,008	264,075	0,009	0,6	264,0679	9
16	1121,265	0,30	1188,695	0,14		1121,203	300
17	1188,695	0,14				1188,630	140

Tab. 4. Energien der Linien vom W^{182} . Die in diesem Experiment gewonnenen relativen Energien sind numerisch an die 100,1 keV-Linie von SEPPI angeschlossen worden, weil dieser Übergang in der Arbeit von SEPPI mit der größten relativen Genauigkeit angegeben worden ist. Darum sind nur die Werte E_r und E_s miteinander vergleichbar, nicht aber E_s und die in der vorletzten Spalte angegebenen absoluten Energien. Ein Vergleich der Energiewerte E_s mit unseren absoluten Energien zeigt zwar gute Übereinstimmung im Fall der 156 keV-Linie, jedoch erhebliche Unterschiede bei den Linien mit 222, 152, 116 keV und besonders bei den Übergängen mit 100 und 84 keV.

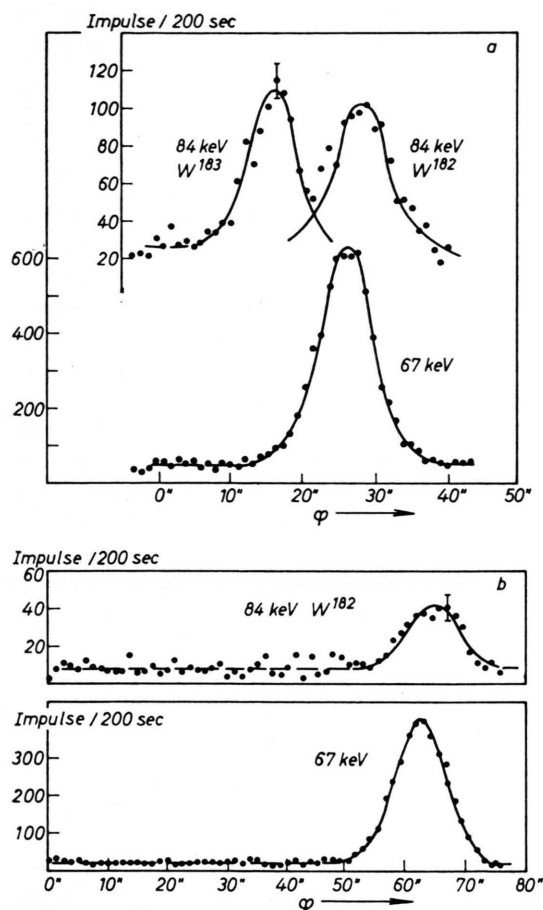


Abb. 2. a) Die zwei 84 keV-Linien des W^{182} und W^{183} in 5. Ordnung und die 67 keV-Linie, die zu nahezu demselben Winkel in 4. Ordnung reflektiert wird. b) Aufnahme desselben Winkelbereichs wie unter a), nachdem die 84 keV-Linie des W^{183} abgeklungen ist.

Die automatische Aufnahme des Spektrums in 7. Ordnung ergab tatsächlich zwei Linien, die $10''$ getrennt lagen. Die Wiederholung dieses Experiments eine Woche darauf zeigte, daß beide Linien mit der gleichen Halbwertszeit abklingen, was die Zugehörigkeit dieser Übergänge zum Ta^{183} beweist (Abb. 3).

Die niederenergetische 313 keV-Linie fügt sich ausgezeichnet in das Zerfallsschema vom Ta^{183} , Tab. 8, während die Position der anderen Linie im Niveauschema noch unsicher ist. Da die Vermutung nahelag, daß diese Linie zusammen mit anderen Übergängen von einem unbekannten Niveau ausgeht, wurde in dem automatisch registrierten Spektrum sorgfältig nach neuen Linien gesucht. Ein eventueller Übergang hat in dem untersuchten Be-

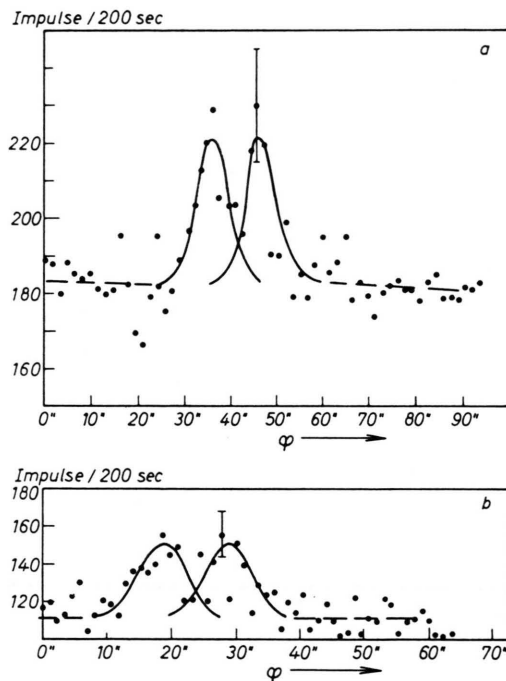


Abb. 3. a) 313 keV-Dublett in 7. Ordnung. b) Die Aufnahme des 313 keV-Dubletts zu einem späteren Zeitpunkt zeigt, daß beide Linien mit der gleichen Halbwertszeit abklingen.

Energie in keV	400	200	100	40
Grenzintensität	0,2	0,1	0,3	0,5

Tab. 5. Obere Grenze für die relative γ -Intensität unbekannter Linien im Zerfall des Ta^{183} .

reich eine γ -Intensität, die kleiner ist als die in Tab. 5 angegebenen Grenzintensitäten.

Die Depopulation des 412 keV-Niveaus wird wesentlich durch das Auftreten des 313 keV-Dubletts geändert, da nun die stärkste Linie, die von diesem Niveau ausgeht, nur noch die Hälfte der Intensität hat. Unter Berücksichtigung der von MURRAY angegebenen Konversionskoeffizienten wurde die Intensitätsbilanz für alle Niveaus aufgestellt (Tab. 6). Sie ist innerhalb der Fehlergrenzen erfüllt, so daß man auch hieraus keinen Hinweis erhält, wo die neue 313 keV-Linie eingeordnet werden kann.

31 keV-Linie

In der Arbeit von MURRAY¹ wurde eine Linie mit 33,67 keV aufgeführt, die zu dem Zerfall von Ta^{182} gehören sollte. Bei früheren Intensitätsmessungen war von uns in einem kleinen Winkelbereich nach dieser Strahlung erfolglos gesucht worden. Kürzlich

Niveau (keV)	Gesamtintensität, die zu dem Niveau führt	Gesamtintensität, die von dem Ni- veau fortführt
0	100*	
46	54	58
99	81	74
207	57	60
208	14	15
291	20	15
308	8	8
412	9	8
453		94

Tab. 6. Intensitätsbilanz für die Niveaus im W^{183} . * Die Intensität, die in den Grundzustand führt, wurde auf 100 normiert. Der Fehler der Konversionskoeffizienten¹ beträgt für Linien über 50 keV etwa 10%. Die γ -Intensitäten wurden aus den Arbeiten von EDWARDS⁸ und DANIEL¹⁹ gemittelt. Ihre Fehler sind $< 10\%$.

beobachtete MOLL²² einen Übergang mit $(31,75 \pm 0,03)$ keV. Unsere jetzige Messung lieferte eine Energie, die mit der von MOLL erhaltenen gut übereinstimmt. Diese Linie bildet einen Übergang zwi-

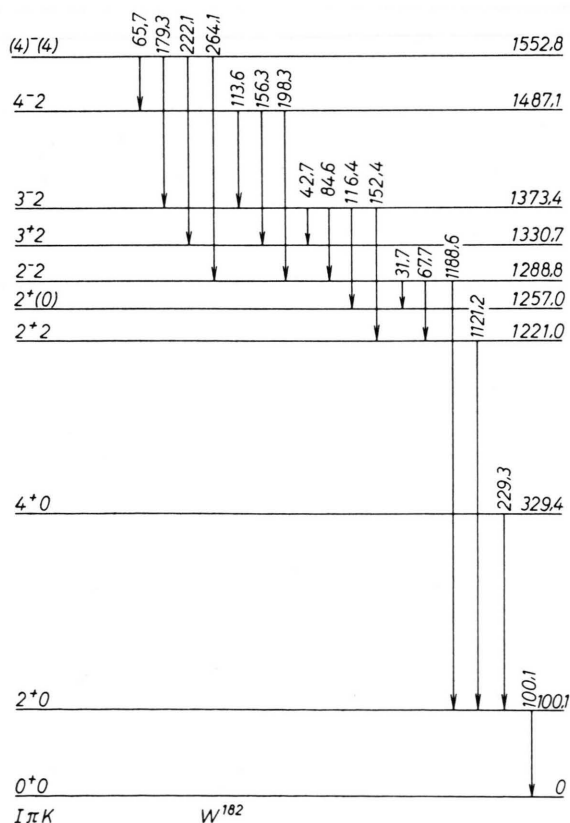


Abb. 4. Niveauschema des W^{182} . Es wurden nur die in dieser Arbeit beobachteten Niveaus eingezeichnet.

schen dem 1290 keV- und dem 1258 keV-Niveau, wie die Überprüfung mit dem Kombinationsprinzip zeigt.

3.3. Test der Genauigkeit mit Hilfe des Kombinationsprinzips

Mit Hilfe der Energiebeziehungen, die sich aus den Niveauschemata, Abb. 4 und 5, ergeben, lassen sich zahlreiche Kombinationsgleichungen der Form $A + B = C$ aufstellen (A , B , C sind Energien der Linien). Diese Energiegleichungen bieten eine ausgezeichnete Möglichkeit zu überprüfen, ob unsere angegebene Meßgenauigkeit über einen großen Energiebereich tatsächlich erreicht wird. Bei einem statistischen Standard-Fehler erwartet man, daß 68% der 38 Gleichungen innerhalb des einfachen Fehlers erfüllt sind. Tatsächlich gehorchen 34 der Gleichungen, das sind 89%, dieser Forderung, während in 4 Fällen die Abweichung $D = A - B - C$ wenig größer ist als der Meßfehler $\sqrt{\sum \Delta E_m^2}$ (Tab. 7, 8).

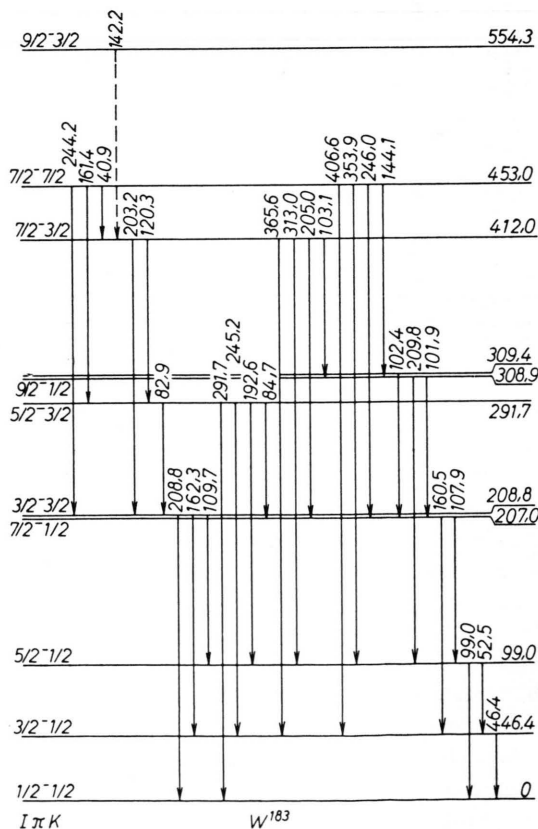


Abb. 5. Niveauschema des W^{183} .

Diese gute statistische Übereinstimmung zeigt, daß unsere Fehler eher zu groß angegeben wurden. Dies ist aber verständlich, wenn man berücksichtigt, daß ein maximaler Fehler von 0,1'' für die Nichtlinearität der Winkelskala zu den Meßfehlern linear addiert wurde.

Kombinations- gleichung $A \quad B$	Wert für Spalte A	Wert für Spalte B	$\frac{E_A - E_B}{\sqrt{\sum \Delta E_m^2}}$
16+ 4 = 17	1188,951	1188,630	1
5+ 4 = 9	152,4262	152,4286	0,8
5+ 1 = 8	116,4134	116,4139	0,1
5+11 = 15	264,0701	264,0679	0,2
3+12 = 15	264,0784	264,0679	1
3+10 = 13	222,1094	222,1036	1
3+ 7 = 11	179,3920	179,3918	0
2+11 = 13	222,1059	222,1036	0,4
2+ 7 = 10	156,3854	156,3887	0,8

Tab. 7. Erfüllung des Kombinationsprinzips bei W^{182} . Die in Spalte 1 stehenden Zahlen entsprechen den Nummern der in Tab. 4 aufgeführten Linien. So bedeutet z. B. 16+4=17 die Kombination, in der die Energiesumme A der Linien mit 1121,203 keV + 67,7479 keV = A = 1188,951 keV der Energie B = 1188,63 keV der Linie Nr. 17 entspricht.

Kombinations- gleichung* $A \quad B$	Wert für Spalte A	Wert für Spalte B	$\frac{E_A - E_B}{\sqrt{\sum \Delta E_m^2}}$
2+ 3 = 6	99,0779	99,0798	0,9
2+24 = 26	291,7216	291,7221	0,1
2+17 = 21	208,8048	208,8125	0,8
3+10 = 15	160,5259	160,5289	1,0
3+18 = 24	245,2388	245,2375	0,2
3+11 = 17	162,3209	162,3207	0
3+27 = 30	365,6017	365,6471	1,1
3+29 = 31	406,5903	406,6160	1,1
10+ 7 = 22	209,8673	209,8663	0,2
10+ 5 = 18	192,6438	192,6450	0,2
10+20 = 27	313,0186	313,0079	0,4
10+25 = 29	353,9952	353,9965	0,3
4+11 = 18	192,6454	192,6450	0,1
4+12 = 19	203,2920	203,2863	0,8
4+16 = 23	244,2624	244,2648	0,4
4+21 = 26	291,7308	291,7221	0,8
1+19 = 23	244,2625	244,2648	0,4
1+12 = 16	161,3499	161,3441	1,2
1+ 9 = 14	144,1246	144,1259	0,3
7+ 9 = 20	205,0836	205,0865	0,4
22+ 9 = 27	313,0147	313,0079	0,2
22+14 = 29	353,9922	353,9965	0,5
15+20 = 30	365,6154	365,6471	1,1
14+ 7 = 25	246,0611	246,0631	0,6
18+12 = 27	313,0187	313,0079	0,4
11+ 6 = 21	208,8069	208,8125	0,6
18+ 6 = 26	291,7248	291,7221	0,3
15+25 = 31	406,5920	406,6160	1,0
15+ 5 = 24	245,2406	245,2375	0,6

Tab. 8. Erfüllung des Kombinationsprinzips bei W^{183} . * Die Bedeutung der Zahlen in Spalte 1 und der Symbole A und B ist unter Tab. 7 erklärt.

Die am genauesten bestimmte Kombinationsgleichung besteht zwischen den 107 keV-, 246 keV- und 354 keV-Linien, wo die in Tab. 9 zusammengestellten Werte erhalten wurden.

	SEPPI	Risö
(107+246) keV	353,989	353,9918
354 keV	354,004	353,993
(354-246-107) keV	0,015	0,0012
$\sqrt{\sum \Delta E_m^2}$ keV	0,010	0,0045

Tab. 9. Kombination zwischen 3 genau gemessenen Linien.

3.4. Vergleich der Energien

Der Anschluß unserer relativen Energien an SEPPIS¹⁸ Werte ermöglichte einen Vergleich der Resultate. Dabei erhält man für die meisten Linien eine Übereinstimmung innerhalb des zweifachen Fehlers. Größere Abweichungen traten bei den 84 keV- und 156 keV-Linien des W^{182} und den 52 keV- und 246 keV-Übergängen des W^{183} auf.

Für die 84 keV- W^{182} -Linie, bei der die Differenz den fünffachen Fehler erreichte, bestand folgende Möglichkeit zu überprüfen, ob die Energie richtig bestimmt wurde.

Wie man einfach berechnen kann, wird die 67 keV-Linie in der 4. Ordnung unter einem Winkel reflektiert, bei dem eine 84,685 keV-Linie nach unseren Messungen oder eine 84,689 keV-Linie nach SEPPIS 67 keV-Wert in der 5. Ordnung erscheinen sollte. Die Aufzeichnung des Spektrums (Abb. 2) zeigt, daß die 84 keV-Linie des W^{182} bei einem etwas größeren Winkel als die 67 keV-Linie auftritt. Dies beweist, daß ihre Energie kleiner sein muß als der oben berechnete Wert, was mit unserer Energieangabe, nicht aber mit SEPPIS, übereinstimmt.

3.5. Energien der Niveaus

Die Frage nach den wahren Energien der Linien führte zu einer zweiten Frage, die damit in Zusammenhang steht:

Welches sind die besten Energien, die man den Niveaus zuordnen kann und welches sind ihre Fehler?

Offensichtlich ist ein Niveauschema, wie das des W^{183} , überbestimmt, da 9 Niveaus durch 28 Übergänge verbunden sind. Die Energien der Niveaus wurden nun so berechnet, daß die Quadratsumme der Differenzen zwischen den Niveaus und den Linien minimal wurde. Der Ausdruck

$$\sum_{ij} (N_i - N_j - E_{ij})^2 G_{ij}$$

soll also für das „beste Termschema“ ein Minimum werden (N_i , N_j Energien der Niveaus, E_{ij} Energie des Übergangs zwischen N_i und N_j , G_{ij} Gewicht $= 1/\Delta E_{mij}^2$). Differentiation nach den Unbekannten N ergibt ein System von linearen Gleichungen, das an der Rechenanlage GIER in Risö gelöst wurde.

Die Fehler der berechneten Niveaus können in einfacher Weise in einem analogen Netzwerk mit OHMSchen Widerständen gemessen werden. Die Analogie soll an einem Beispiel gezeigt werden³⁷ (Abb. 6). Der Fehler des Niveaus N_2 berechnet sich aus den Fehlern der Übergänge zu

$$\Delta N_2^2 = \frac{1}{1/\Delta E_{20}^2 + 1/(\Delta E_{21}^2 + \Delta E_{10}^2)}.$$

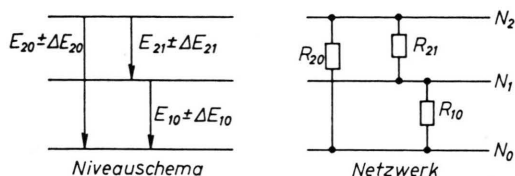


Abb. 6. Analogie zwischen einem Netzwerk und einem Niveauschema.

Der Fehler entspricht dem Widerstand R in einem Netzwerk, in dem die ΔE_{ij}^2 durch R_{ij} ersetzt wurden:

$$R = \frac{1}{1/R_{20} + 1/(R_{21} + R_{10})}.$$

Die Energien der Niveaus mit ihren Fehlern wurden in Tab. 10 und 11 zusammengestellt.

Energie [keV]	Meßfehler	Energie [keV]	Meßfehler
46,484	0,001	308,944	0,002
99,078	0,001	309,490	0,002
207,010	0,001	412,094	0,003
208,805	0,002	453,070	0,002
291,723	0,002	554,364	0,007

Tab. 10. Energien der Niveaus im W^{183} .

Energie [keV]	Meßfehler [keV]	Energie [keV]	Fehler [keV]
		relativ zum 1221 keV-Niv.	
100,102	0,002		
329,419	0,007		
1221,06	0,130	0	0
1257,06	0,130	36,013	0,002
1288,80	0,130	67,748	0,001
1330,76	0,130	109,713	0,002
1373,48	0,130	152,428	0,002
1487,15	0,130	266,100	0,002
1552,87	0,130	331,820	0,002

Tab. 11. Energien der Niveaus im W^{182} .

3.6. Berechnete Energien der 84 keV-, 156 keV-, 52 keV- und 246 keV-Linien

Eine von der direkten Messung unabhängige Möglichkeit zur Bestimmung der Energie einer Linie liefert die folgende Überlegung.

Man erhält neue Energien der Niveaus, wenn einer der Ausdrücke $(N_l - N_k - E_{lk})^2 G_{lk}$ aus dem Gleichungssystem weggelassen wird und die Berechnung der Unbekannten N erneut durchgeführt wird. Die Differenz, die dann zwischen den Niveaus N_l und N_k besteht, ergibt einen Wert für den Übergang E_{lk} , der völlig unabhängig von der gemessenen Linie E_{lk} ist. Bei korrekter Messung müssen jedoch die gemessenen und berechneten Energien übereinstimmen.

Diese Rechnung wurde für die 84 keV- und 156 keV-Linien des W^{182} und die 52 keV- und 246 keV-Übergänge des W^{183} durchgeführt, bei denen Differenzen zu SEPPIS¹⁸ Werten bestanden (Tab. 12).

Meßwert keV	Fehler	Differenz zwischen den Niveaus, die ermittelt werden			
		unter Berücksichtigung aller Linien	Fehler	bei Ausschluß der gemessenen Linie	Fehler
156,389	0,003	156,386	0,002	156,385	0,002
84,678	0,002	84,679	0,001	84,680	0,002
52,593	0,002	52,594	0,001	52,594	0,001
246,061	0,002	246,060	0,002	246,060	0,003

Tab. 12. Aus den Differenzen zwischen den Niveaus berechnete Energien.

Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen spricht für die innere Konsistenz der am Risö-Spektrometer gewonnenen Energien.

Herrn Prof. Dr. H. MAIER-LEIBNITZ, Herrn Prof. Dr. O. KOFOED-HANSEN, Herrn Prof. T. BJERGE und Herrn Dr. FL. JUUL danken wir für die stete Förderung dieser Arbeit. Aufrichtigen Dank schulden wir der Betriebsleitung des DR-3, insbesondere den Herren S. MEHLSEN, TH. FRIIS-SØRENSEN und O. WALMOD-LARSEN für ihre fortwährende Unterstützung und Herrn L. HANSSON von der GIER für die Hilfe bei der Auswertung der Daten. Ebenso herzlich danken wir allen Angehörigen der Dänischen Atomenergiekommission, die durch ihre freundliche Hilfe die Durchführung des Experiments erleichtert haben.

³⁷ Die Allgemeingültigkeit dieser Methode wurde von B. HAMERMESH, J. E. MONAHAN u. R. K. SMITHER (Ann. Phys., N.Y. 13, 284 [1961]), bewiesen.