

# Wechselwirkung von Neutronen mit Wolfram und seinen Isotopen\*

K. Knopf und W. Waschkowski

Fakultät für Physik der Technischen Universität München, Reaktorstation Garching

Z. Naturforsch. **42a**, 909–916 (1987); eingegangen am 30. Juni 1987

*Herrn Prof. Dr. L. Koester zum 65. Geburtstag gewidmet*

*Interaction of Neutrons with Tungsten and its Isotopes*

The coherent neutron scattering lengths and total cross sections of elemental and oxide samples of natural and isotopically enriched W are determined. From these results the following coherent scattering lengths,  $b$ , and absorptions at 0.0253 eV,  $\sigma_y$  were deduced:

$$\begin{aligned} b(\text{natW}) &= 4.86 \pm 0.02 \text{ fm}, & \sigma_y &= 17.3 \pm 0.5 \text{ b}, \\ b(^{182}\text{W}) &= 7.04 \pm 0.04 \text{ fm}, & \sigma_y &= 19.6 \pm 0.3 \text{ b}, \\ b(^{183}\text{W}) &= 6.59 \pm 0.04 \text{ fm}, & \sigma_y &= 10.5 \pm 0.2 \text{ b}, \\ b(^{184}\text{W}) &= 7.55 \pm 0.06 \text{ fm}, & \sigma_y &= 1.7 \pm 0.1 \text{ b}, \\ b(^{186}\text{W}) &= -0.73 \pm 0.04 \text{ fm}, & \sigma_y &= 38.5 \pm 0.8 \text{ b}. \end{aligned}$$

By comparison with the resonance parameters, the incoherence and the potential radii are derived and discussed. The bound level on W-182 must be fitted with a scattering width of  $gR_n^0 = 161 \text{ meV}$  at  $E_0 = -94 \text{ eV}$ .

## 1. Einleitung

Wir haben die kohärenten Streulängen und die totalen Wirkungsquerschnitte bei verschiedenen Energien (0,57 meV/1,26 eV/5,2 eV und 143 keV) für natürliches Wolfram sowie für die Isotope der Massenzahl 182, 183, 184 und 186 gemessen. Die hierfür am FRM (Schwimmbadreaktor mit 4 MW thermischer Leistung) eingebürgerten Meßmethoden wie das Christiansenfilter zur Streulängenbestimmung [1], die Resonanzaktivierungsdetektoren im eV-Bereich [2] sowie die Konverteranlage mit Filtern zur Erzeugung definierter schneller Neutronenspektren [3] sind von L. Koester eingeführt und maßgeblich gefördert worden. Wie bereits in zahlreichen früheren Veröffentlichungen erhielten wir auch diesmal bei der Auswertung komplett konsistente Sätze der Streuparameter für niedrige Neutronenenergie. Es stellte sich heraus, daß die Literaturwerte der Streulängen für die W-Isotope 182, 183 und 186 sowie die Resonanzparameter für W-182 und 183 korrigiert werden müssen.

Schon die Pionierarbeit zur Entwicklung der Christiansenfiltertechnik [4] am Neutronen-Schwerkraft-Refraktometer [5] ist an natürlichem Wolfram durchgeführt worden. Der frühe Streulängenwert liegt sehr dicht bei dem Meßwert dieser Arbeit; er wird in Abschnitt 3.1 diskutiert.

## 2. Experimentelles

### 2.1 Die Substanzen

Die Messungen an natürlichem Wolfram wurden an pulverförmigen und kristallinen Metallproben sowie Wolframtrioxid durchgeführt. Wie in Tab. 1 gezeigt, stellen sich je nach Trocknungstemperatur der Oxide die Kristallisationsphasen  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  ein, die sich deutlich in ihrer Dichte unterscheiden ([6], Seite 94–106]. Amorphes W-Oxid hatte sich nicht gebildet, da die Dichten stets größer als  $6,5 \text{ g/cm}^3$  waren. Die isotopenangereicherten Proben der Hauptmassen 182 und 184 lagen in metallischer Form vor und wurden nach dem ersten Meßdurchgang oxidiert und erneut gemessen. Außerdem gab es Oxidproben der Isotope 183, 184 und 186. Um sicher zu gehen, daß die oxidischen Proben kein Wasser aus der Luft aufnehmen und daß sich keine Wolframbronze  $\text{H}_x\text{WO}_3$  bildet, wurden die Proben unter Argonschutzatmosphäre gehandhabt und

\* Work partially supported by the Bundesministerium für Forschung und Technologie.

Reprint requests to Dr. W. Waschkowski, Fakultät für Physik der Technischen Universität München, Reaktorstation Garching, D-8046 Garching.

0932-0784 / 87 / 0900-909 \$ 01.30/0. – Please order a reprint rather than making your own copy.



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

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

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

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

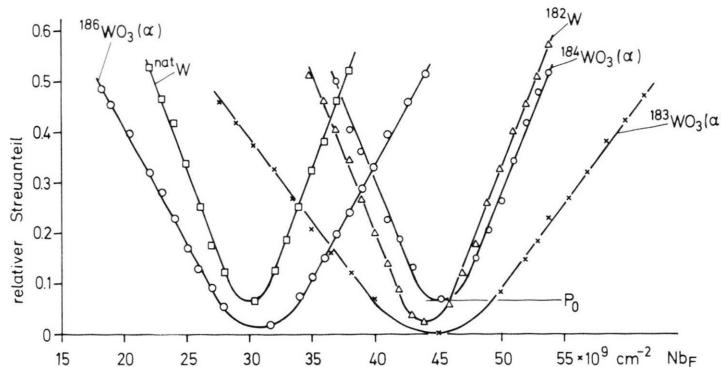


Abb. 1. Streukurven von natürlichem Wolfram und den Wolframisotopen.

gemessen. Die Dichtebestimmung erfolgte pyknometrisch in  $C_2Cl_4$  und  $C_8H_{10}$ . Die bemerkten metallischen Verunreinigungen führten zu Korrekturen von  $\Delta\sigma < 0,001 b$ .

## 2.2 Die Meßmethoden

Die *Streulängen* wurden mit der Christiansenfiltermethode [1], [7, S. 26–30] durch Kleinwinkelstreuung mit sehr langsamem Neutronen ( $\bar{E} = 0,57$  meV) bestimmt. Ein Filter besteht aus der Pulverprobe zusammen mit einem Flüssigkeitsgemisch bekannter Streulänge. Durch Variation der Flüssigkeitsmischung ( $C_6D_6/C_2Cl_4$ ;  $C_2Cl_4/C_8H_{10}$ ) sucht man den Abgleichpunkt, an dem die Kleinwinkelstreuung verschwindet, weil hier die Streudichte der Probe,  $(Nb)_p$ , der der Flüssigkeit,  $(Nb)_F$ , gleicht. Wie Abb. 1 zeigt, verbleiben bei

manchen Proben kleine Reststreuungen  $p_0$  am Gleichgewichtspunkt, was durch eine polymorphe Struktur des Pulvers erklärbar ist.

Die *totalen Wirkungsquerschnitte* wurden bei 0,57 meV, 1,26 eV, 5,19 eV und 143 keV gemessen. Bei 0,57 meV diente die „Christiansenfilter“-Apparatur ebenfalls für die Transmissionsmessung, wobei ein Beitrag kleinwinkelgestreuter Neutronen durch geschickte Anordnung von Probe und Detektor eliminiert wird. Für Details verweisen wir auf [8].

Die Neutronen im eV-Bereich stammten aus einem Cd-gefilterten Reaktorneutronenstrahl und wurden mit quasikontinuierlich arbeitenden Resonanzaktivierungsdetektoren energieselektiv registriert. Dabei wird eine rotierende Detektorscheibe aus Rhodium ( $E_{res} = 1,26$  eV) bzw. aus Silber ( $E_{res} = 5,2$  eV) an einer Randposition aktiviert und

Tab. 1. Physikalische Daten der Proben und Ergebnisse der Streulängenmessung und  $\sigma_{tot}$  bei  $\lambda = 12,0$  (1) Å,  $b_0 = 5,805$  (4) fm.

	Probe	Reinheit %	Trocknung K	Probe	$D$ g cm <sup>-3</sup>
nat. W	W	99,896	orig	W	18,99 (4)
			473	W	18,98 (3)
	$\alpha$ WO <sub>3</sub>	99,996	orig	$\alpha$ WO <sub>3</sub>	7,173 (10)
			673	$\alpha$ WO <sub>3</sub>	7,172 (12)
	$\beta$ WO <sub>3</sub>	99,994	orig	$\beta$ WO <sub>3</sub>	7,259 (9)
1	$\alpha$ WO <sub>3</sub>	99,996	993	$\beta$ WO <sub>3</sub>	7,256 (4)
			1173	$\gamma$ WO <sub>3</sub>	7,301 (3)
2	Isotop	Häufigkeit %			
2	182	99,44 (6)	W	99,51	18,45 (22)
3	183	96,31 (3)	WO <sub>3</sub>	99,86	7,150 (14)
4	184	96,3	W	99,98	7,094 (10)
		96,3	WO <sub>3</sub>	1003	7,224 (13)
5	186	99,19 (3)	WO <sub>3</sub>	orig	18,11 (18)
				1346	7,198 (17)
				833	7,027 (70)
				813	7,155 (13)

auf der diametralen Seite vermessen. Die Energie selektivität steigert man durch eine Differenzbildung zweier gleichartiger hintereinanderstehender Meßstellen. Ein Monitor gleicht langsame Änderungen der Neutronenintensität vom Reaktor heraus. In [2] und [9] sind die Methode und die Apparatur ausführlich beschrieben.

Die Quelle der schnellen Neutronen ist eine (U-235)-Konverterplatte in einem tangentialen Strahlrohr. Bei Verwendung eines Siliziumfilters (124 cm lang) interferiert die Streuung der Resonanz bei  $E_{\text{res}} = 188$  keV so stark mit der Potentialstreuung, daß bei  $143 \pm 10$  keV ein offenes Fenster entsteht. In der Probenposition erhält man eine Neutronenstromdichte von ca.  $4 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Nachgewiesen werden diese schnellen Neutronen nach ihrer Moderation in Polyäthylen mit  $\text{BF}_3$ -Zählrohren in einer speziellen Anordnung [3].

Da die Metallpulverproben nur 0,7 g bei einer Schüttichte von  $5,6 \text{ g/cm}^3$  enthielten, mußte die Kollimation bis auf 2 mm Strahldurchmesser reduziert werden. Die Strahlintensität für die eV- und keV-Neutronen reichte gerade dazu aus, um in vernünftiger Zeit eine relative Genauigkeit von  $\pm 5\%$  zu erhalten.

### 3. Messungen und Ergebnisse

#### 3.1 Streulängen

Tabelle 1 enthält die Probendaten und die gemessenen Streulängen. Metallische und oxidische

Proben liefern konsistente Streulängen, die für natürliches Wolfram in Zeile 1 den arithmetischen Mittelwert  $b = 4,86 \pm 0,02 \text{ fm}$  ergeben. Für die Isotopenmischungen erhält man als Mittelwert die in Tab. 2, Zeile 2 angegebenen Daten. Die Umrechnung auf die einzelnen Isotope ergibt folgende Streulängen:

$$\begin{aligned} b(182) &= 7,04 \pm 0,04 \text{ fm} & (8,33 \pm 0,14) \text{ fm} , \\ b(183) &= 6,59 \pm 0,04 \text{ fm} & (4,3 \pm 0,5) \text{ fm} , \\ b(184) &= 7,55 \pm 0,06 \text{ fm} & (7,59 \pm 0,09) \text{ fm} , \\ b(186) &= -0,73 \pm 0,04 \text{ fm} & (-1,19 \pm 0,05) \text{ fm} . \end{aligned}$$

In Klammern sind die Werte von Alexandrov [10] aufgeführt. Lediglich beim W-184 besteht Übereinstimmung. Mögliche Fehlerquellen in [10] sind nicht bekannt; es fällt nur auf, daß kein Meßwert für natürliches Wolfram angegeben ist.

Die Berechnung der Streulänge des natürlichen Wolframs aus den Isotopenwerten, wobei das Isotop 180 mit der Häufigkeit  $h = 0,13\%$  vernachlässigt wird, ergibt

$$\sum_i h_i b_i = 4,91 \pm 0,04 \text{ fm} .$$

Die Übereinstimmung innerhalb der Standardabweichung mit der direkten Messung ist ein Hinweis darauf, daß die Proben keine nennenswerte Feuchtigkeit enthielten und daß kein Meßfehler vorliegt.

$\text{Nb}$ $10^9 \text{ cm}^{-2}$	$b_{\text{mol}}$ fm	$\langle b \rangle_{\text{mol}}$ fm	$b_{\text{atom}}$ fm	$p_0$	$\sigma_{\text{tot}}$ $b$
29,99 (5)			4,82 (1)	0,067	115 (1)
30,09 (4)			4,84 (1)	0,076	116 (1)
41,46 (6)	22,25 (5)			0,008	116 (3)
41,53 (9)	22,29 (6)	22,27 (5)	4,86 (5)	0,005	115 (2)
42,09 (6)	22,33 (4)			0,015	114 (2)
42,01 (6)	22,29 (3)	22,31 (3)	4,89 (4)	0,015	117 (3)
42,24 (3)	22,27 (3)		4,86 (5)	0,005	117 (3)
arithmet. Mittelwert			4,86 (2)		
44,06 (6)			7,08 (4)	0,020	129 (2)
45,67 (9)	24,39 (7)		6,97 (7)	0,41	133 (3)
44,39 (9)	24,00 (6)			0,005	70,0 (1,5)
45,33 (8)	24,06 (6)	24,03 (4)	6,62 (4)	0,025	
45,37 (6)			7,29 (5)	0,095	18,1 (6)
46,38 (9)	24,82 (8)			0,35	
45,21 (7)	24,79 (25)	24,81 (12)	7,39 (12)	0,070	17,9 (1,5)
30,77 (4)	16,71 (4)		-0,71 (4)	0,010	257 (5)

### 3.2 Absorption

Der totale Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{\text{tot}}$  für sehr langsame Neutronen setzt sich aus der Absorption  $\sigma_{\gamma}$ , dem elastischen inkohärenten  $\sigma_{\text{el,inc}}$ , dem inelastischen  $\sigma_{\text{inel}}$  Wirkungsquerschnitt und gegebenenfalls einem Anteil für Verunreinigungen  $\sigma_{\text{v}}$  zusammen:

$$\sigma_{\text{tot}}(E) = \sigma_{\gamma} + \sigma_{\text{el,inc}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{v}} .$$

Der inelastische Anteil lässt sich mit der 1-Phonon-Absorptions-Näherung ([7], S. 12) für W und für  $\text{WO}_3$  mit der Debye-Temperatur  $\theta_D \approx 220$  K ([6], S. 130) zu 0,2 b abschätzen und ist damit vernachlässigbar klein.

Für den Absorptionsverlauf zwischen 0,57 meV und der thermischen Energie 25,3 meV kann das  $1/v$ -Gesetz angesetzt werden. Diese Umrechnung ist in Tab. 2 von Zeile 5 auf Zeile 6 unter der An-

Tab. 2. Mittelwerte von  $b$  und  $\sigma_{(12 \text{ \AA})}$  für die gemessenen Proben und Umrechnung auf die Isotope.

	Hauptisotop	nat	182	183	184	186
1	Häufigkeit 182	0,2641	0,9944	0,0211	0,0060	0,0004
	183	0,1440	0,0043	0,9631	0,0098	0,0004
	184	0,3064	0,0004	0,0158	0,963	0,0013
	186	0,2841	0,0004	0,00005	0,0212	0,9979
2	$b'$ [fm]		7,03 (4)	6,62 (4)	7,34 (6)	-0,71 (4)
3	$b_{\text{atom}}$ [fm]	4,86 (2)	7,04 (4)	6,59 (4)	7,55 (6)	-0,73 (4)
4	$\sigma_{(12 \text{ \AA})}$ [b]		131 (1,8)	70 (1,5)	18,0 (8)	257 (5)
5	$\sigma_{\text{atom}}$ (12 Å) [b]	115,4 (5)	131 (1,8)	70 (1,5)	11,5 (8)	257 (5)
6	$\sigma_{\gamma(0,0253 \text{ eV})}$ [b]	17,3 (5)	19,6 (3)	10,5 (2)	1,7 (1)	38,5 (8)
7	$\sigma_{\gamma}$ [b] [11]	18,3 (5)	20,7 (5)	10,0 (3)	1,7 (1)	37,8 (1,2)
8	$\sigma_{\gamma}$ Res. Par. [b] [12]	18,2 (4)	15,0 (8)	20,1 (9)	1,70 (6)	37,9 (2)

Tab. 3. Ermittlung der totalen Wirkungsquerschnitte der Isotope aus den Meßwerten an hochangereicherten Proben ( $\sigma$  in b).

Probe	$E_n = 1,26 \text{ eV}$				$E_n = 5,19 \text{ eV}$			
	182	183	184	186	182	183	184	186
1	metallisch	11,10 (25)		7,35 (33)		20,09 (37)		7,38 (23)
	oxidisch		8,12 (70)	8,2 ± 1,0	6,30 (30)		9,47 (45)	7,37 (32)
2	selber oxidiert	9,4 (9)		8,1 (6)		22 (2)		6,8 (6)
	Mittelwert $\sigma'$	10,76 (30)		7,57 (30)		20,17 (40)		7,43 (20)
3	$\sigma_{\text{Isotopen inc.}}$	0,003	0,003	0,21	0,08	0,01	0,04	0,35
	$\sigma_{\text{reines Isotop}}$	10,78 (30)	8,08 (70)	7,36 (30)	6,22 (30)	20,16 (40)	9,23 (45)	6,98 (20)

Tab. 4. Auswertung der Wirkungsquerschnittsmessungen für die Wolfram-Isotope ( $\sigma$  in [b],  $b$  in [fm]).

Isotopenmasse	$E_n = 1,26 \text{ eV}$				184
	182 nach [12]	Fit	183 nach [12]	nach [13]	
1	$\sigma_{\text{tot}}$	10,78 (30)		8,08 (70)	7,36 (30)
2	$\sigma_{\gamma}$ (Res. Par.)	-3,45 (19)	-4,07 (21)	-3,12 (15)	-0,24 (1)
3	$\sigma_{\text{s,frei}}$	7,33 (3)	6,71 (37)	4,96 (72)	7,12 (30)
4	$\sigma_{\text{s,gebunden}}$	7,41 (36)	6,78 (37)	5,01 (73)	7,20 (31)
5	$\Delta\sigma_{\text{ne}}$	-0,15 (1)		-0,14 (9)	-0,16 (1)
6	$\Delta\sigma_{\text{res}}$	-0,44 (2)	-0,59 (3)	-0,33 (2)	-0,04 (1)
7	$\sigma_0^*(E)$	6,82 (36)	6,04 (37)	4,5 (7)	7,00 (31)
$b(E) = R'_{\text{geb}} + b_{\text{res}}(E)$		6,79 (10)	6,75 (10)	6,40 (17)	7,53 (11)
$\sigma_0 = 4\pi b^2(E)$		5,79 (17)	5,72 (17)	5,15 (27)	7,12 (22)
$\sigma_{\text{Spin inc}}$				-0,7 (8)	0,9 (8)

nahme erfolgt, daß keine Verunreinigungen vorliegen. Die Wichtung der Absorption für die Isotope ergibt für das natürliche W einen Wert  $\sigma_\gamma = 18,2 \pm 0,4 \text{ b}$ , der zum direkten Meßwert  $17,3 \pm 0,5 \text{ b}$  und zur Literatur  $18,3 \pm 0,5 \text{ b}$  [11] paßt. In Zeile 7 sind zum Vergleich die Meßwerte von Friesenhahn [11] aufgeführt, die nur teilweise mit den Absorptionen in [12] übereinstimmen. Aus den Resonanzparametern aus [12] ergibt sich nämlich  $\sigma_\gamma(\text{W-182}) = 15,0 \text{ b}$  und  $\sigma_\gamma(\text{W-183}) = 20,1 \text{ b}$ . Für W-182 läßt sich die Absorption anpassen, wenn man den gebundenen Zustand bei  $E_0 = -94 \text{ eV}$  mit  $\Gamma_\gamma = 64 \text{ meV}$  und  $g\Gamma_n^0 = 161 \text{ meV}$  wählt und die restlichen Resonanzparameter als korrekt annimmt, wobei  $\sigma_\gamma = 19,3 \text{ b}$  entsteht. Dieser Fit wird in den anschließenden Abschnitten 3.3 und 3.4 bestätigt. Für das Isotop 183 sind in [12] um den Faktor 2 zu große Streubreiten  $g\Gamma_n^0$  angegeben. Mit den Streubreiten [13] ergibt sich eine Absorption  $\sigma_\gamma(\text{W-183}) = 9,8 \pm 0,8 \text{ b}$  in Übereinstimmung mit [11] und mit dieser Arbeit.

### 3.3 Epithermische Wirkungsquerschnitte

Tabelle 3 gibt die totalen Wirkungsquerschnitte, gemessen bei 1,26 eV und 5,2 eV an den isotopen angereicherten Proben. Wichtet man die in Zeile 3 stehenden Werte für die Isotope mit der zugehörigen Häufigkeit, so erhält man für das natürliche Wolfram

$$\text{bei } 1,26 \text{ eV: } \sum_i h_i \sigma_{\text{tot}i} = 8,03 \pm 0,18 \text{ b ,}$$

$$\text{und bei } 5,2 \text{ eV: } \sum_i h_i \sigma_{\text{tot}i} = 10,78 \pm 0,22 \text{ b .}$$

Die Messungen am natürlichen Wolfram ergaben

$$\text{bei } 1,26 \text{ eV: } \sigma_{\text{tot}} = 7,56 \pm 0,02 \text{ b ,}$$

$$\text{und bei } 5,2 \text{ eV: } \sigma_{\text{tot}} = 10,43 \pm 0,20 \text{ b .}$$

Es scheint, als ob die Messungen am natürlichen Wolfram einen um zwei bis drei Standardabweichungen kleineren Wirkungsquerschnitt ergeben, was sich durch eine Wasserkontamination der Größe  $7 \cdot 10^{-4} \text{ g H}_2\text{O/g}$  erklären ließe. Diese Verunreinigung wäre so klein, daß sie bei der Transmissionsmessung bei 12 Å eine Korrektur von 1,4 b verursachen und damit im Fehler untergehen würde. Da eine Zuordnung zum Isotop nicht möglich ist, wurde auf diese Korrektur verzichtet.

Da sich die Resonanzen von Wolfram mit den Nebenresonanzen des Detektormaterials Ag überdecken und in der Detektorzählrate ca. 3% Neutronen mit Nebenresonanzenergie vorkommen, erhielt man auf Grund spektraler Härtung eine schwache Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts von der Probendicke. Der bei 5,2 eV angegebene Wert ist die Extrapolation des Wirkungsquerschnitts auf die Dicke  $O$ , d. h. der aufgelistete Wirkungsquerschnitt gehört zur Schwerpunktsenergie  $\bar{E}$  des beobachteten Neutronenspektrums.

Die Berechnung des kohärenten Streuwirkungsquerschnitts aus dem totalen ist schrittweise in Tab. 4 vollzogen. Zunächst zieht man die Absorption ab, die wegen der Nachbarschaft von Detek-

$E_n = 5,19 \text{ eV}$						
186	182 nach [12]	Fit	183 nach [12]	nach [13]	184	186
6,22 (30)	20,16 (40)		9,23 (45)		6,98 (20)	6,8 (6)
-6,08 (27)	-10,1 (7)	-10,4 (7)	-4,34 (33)	-2,14 (43)	-0,12 (1)	-4,85 (2)
0,14 (40)	10,1 (8)	9,8 (8)	4,89 (56)	7,09 (62)	6,86 (20)	1,9 (6)
0,14 (41)	10,2 (8)	9,9 (8)	4,94 (56)	7,17 (63)	6,94 (20)	1,9 (6)
+0,02 (0)	-0,16 (1)		-0,15 (1)		-0,17 (1)	+0,02 (0)
+0,03 (10)	+3,5 (3)	+2,95 (30)	-1,93 (12)	-1,08 (15)	-0,17 (1)	+1,3 (6)
0,19 (41)	13,5 (9)	12,7 (9)	2,86 (57)	5,99 (64)	6,60 (20)	3,2 (9)
-1,37 (42)	8,67 (11)	7,89 (11)	5,44 (19)	6,04 (25)	7,47 (11)	-4,1 (5)
0,24 (14)	9,45 (24)	7,82 (24)	3,72 (26)	4,58 (39)	7,01 (22)	2,1 (5)
			-0,9 (6)	1,4 (8)		

torenergie und Resonanzen der Probensubstanz nicht mehr mit einem  $1/v$ -Verlauf angesetzt werden darf, sondern über die Breit-Wigner-Formel für alle  $i$  Resonanzen bei den Energien  $E_0$  ermittelt werden muß; für  $\Gamma \ll (E - E_0)$  gilt

$$\sigma_\gamma(E) = 0,6520 \left( \frac{A+1}{A} \right)^2 \times \sum_i \frac{g \Gamma_{ni}^0 [\text{meV}] \Gamma \gamma i [\text{meV}]}{(E - E_{0i})^2 \sqrt{E [\text{eV}]}}. \quad (1)$$

Hier bedeuten  $A$  die Massenzahl des Nuklids,  $g \Gamma_n^0$  die normierte Neutronenstrebreite und  $\Gamma_\gamma$  die Absorptionsbreite der jeweiligen Resonanz.

Der freie Streuwirkungsquerschnitt wird durch den Faktor  $((A+1)/A)^2$  in den gebundenen umgerechnet, von dem die Neutron-Elektron-Wechselwirkung

$$\Delta \sigma_{\text{ne}(E)} = \sigma_{\text{Atom}}(0) - \sigma_{\text{Atom}}(E) = 8\pi b_k Z (1-f) b_{\text{ne}} \quad (2)$$

abgezogen werden muß.  $Z$  ist die Ladungszahl des Kerns mit der Streulänge  $b_k$ . Der Formfaktor  $f$  berücksichtigt nach Dirac-Slater die Ladungsverteilung der Elektronenhülle, und  $b_{\text{ne}} = -1,32 \pm 0,04$  mfm [14] ist die Neutron-Elektron-Streulänge.

Weiter muß ein Resonanzstrebbeitrag korrigiert werden, der sich mit der Potentialstrebülänge  $R'$  in fm und dem statistischen Gewicht  $g$  für die Spinzustände folgendermaßen, über alle Resonanzen summiert, berechnen läßt:

$$\Delta \sigma_{\text{res}} = (\sigma - \sigma_{\text{pot}})_{(0)} - (\sigma - \sigma_{\text{pot}})_{(E)} \quad (\sigma \text{ in b}) = -0,04\pi \left( \frac{A+1}{A} \right)^2 \times \sum_i \left\{ g a_{r_0}^2 \left[ 1 - \left( \frac{E_0}{E - E_0} \right)^2 \right] + 2 g R' a_{r_0} \left( \frac{E}{E - E_0} \right) \right\}_i \quad (3)$$

mit  $a_{r_0} = -2,276 \left( \frac{A+1}{A} \right) \frac{g \Gamma_{ni}^0 [\text{meV}]}{g E_{0i} [\text{eV}]}$  [fm].

Damit erhält man  $\sigma_0^*(E)$ , dessen Wert für (g,g)-Kerne der kohärente Atomwirkungsquerschnitt bei

der Energie  $(E)$  ist; für (u,g)-Kerne ist die Inkohärenz  $\sigma_{\text{Spin, inc}}$  noch enthalten.

$\sigma_0^*(E)$  kann verglichen werden mit

$$\sigma_0 = 4\pi b^2(E) = 4\pi \left[ \frac{A+1}{A} R' + b_{\text{res}}(E) \right]^2, \quad (4)$$

wobei die Energieabhängigkeit in der Streulänge durch Resonanzen in der Nachbarschaft von  $E = 0$  bewirkt wird. Die Resonanzstreuung errechnet sich für die Spinzustände  $g_+$  und  $g_-$  zu

$$b_{\text{res}}(E)_\pm = 2,277 \left( \frac{A+1}{A} \right)^2 \times \sum_i \left\{ \frac{g_\pm \Gamma_n^0 [\text{meV}]}{g_\pm (E - E_0) [\text{eV}]} \right\}_i \text{ in fm}, \quad (5)$$

wobei für (u,g)-Kerne die Mischung

$$b_{\text{res}} = g_+ b_{\text{res}+} + g_- b_{\text{res}-} \quad (6)$$

gebildet werden muß.

Für die Wolframisotope 184 und 186 stimmen die Werte für  $\sigma_0^*$  und  $\sigma_0$  innerhalb der Fehlerangabe überein, wie aus Tab. 4 ersichtlich ist. Dies kann als ein Kriterium sowohl für eine richtige Messung als auch für die Vollständigkeit der Resonanzparameter gewertet werden.

Für das Isotop 183 ist auch die Auswertung für die Resonanzparameter von Mughabghab [12] und die Parameter aus einer Originalarbeit von Camarda [13] aufgelistet. Wir halten die Streubreiten  $\Gamma_n$  in [12] für falsch, da sie die Absorption (siehe 3.2) nicht richtig beschreiben und in Tab. 4 zu einer negativen, physikalisch unsinnigen Spininkohärenz für W-183 führen. Die Streubreiten von [13] stimmen ihrerseits mit den älteren, aber unvollständigen Daten von [15] überein.

Für W-182 sind ebenfalls 2 Auswertungen erfolgt: für die Resonanzparameter in [12] und für den Fit des in 3.2 eingeführten gebundenen Zustands. Letzterer liefert bei 1,26 eV Übereinstimmung von  $\sigma_0^*$  und  $\sigma_0$ ; bei 5,2 eV hingegen ist die Korrektur durch die Resonanz bei 4,1 eV so groß und so unsicher, daß keine Aussage möglich ist. Außerdem müßten streng genommen die Detektorresonanz bei 5,2 eV und die (W-182)-Resonanz bei 4,1 eV entfaltet werden, um den Energieschwerpunkt des Meßwertes festzulegen.

	182	183	184	186	nat.
1 $\sigma_{\text{tot}} \text{WO}_3^{\text{a}}$	19,4 (6)	19,1 (5)	18,7 (5)	19,1 (5)	–
2 $\sigma_{\text{tot}} \text{W}$	8,9 (6)	8,6 (5)	8,2 (5)	8,6 (5)	8,30 (10)
3 $\sigma_y$					← 0,10
4 $\sigma_{\text{inel}}$					← 0,10
5 $\langle \sigma_c^0 \rangle$	2,1 (3)	1,7 (3)	2,3 (2)	2,0 (3)	2,08 (14)
6 $\langle \sigma_c^1 \rangle$	0,7 (1)	0,7 (1)	0,5 (1)	0,4 (1)	0,55 (5)
7 $\sigma = 4\pi R'^2 \cdot \varrho$	5,9 (6)	6,0 (6)	5,2 (6)	6,0 (6)	5,47 (18)
8 $R'$	7,3 (5)	7,4 (5)	6,8 (5)	7,4 (5)	
9 $b_{\text{res+}} (0 \text{ eV})^{\text{b}}$	– 0,30 (– 3,76 (6))	– 2,16 (– 5,50 (14))	– 0,36 (6)	– 8,59 (28)	
10 $b_{\text{res-}} (0 \text{ eV})$	0 0	– 1,54 (– 1,52 (10))	0	0	
11 $R'$ aus $b$ u. Res. Par. <sup>b</sup>	7,3 (1) (10,68 (7))	8,5 (3) (11,04 (12))	7,9 (1)	7,82 (28)	
12 $R'$ [12]	–	7,9 (5)	–	7,64 (5)	

Tab. 5.  
Wirkungsquerschnitte  
für natürliches  
Wolfram und für die  
Isotope bei 143 keV  
( $\sigma$  in  $b/b_{\text{res}}$ ,  $R'$  in  
fm).

<sup>a</sup>  $\sigma_{03} = 10,50 (15)$  b.

<sup>b</sup> Die eingeklammerten Werte sind mit  
den Parametern von  
[12] berechnet.

Wegen der großen Standardabweichung kann über die Spininkohärenz beim W-183 keine sinnvolle Aussage gemacht werden. Aus den Resonanzparametern aus [13] errechnet man  $\sigma_{\text{Spin, inc}}(183) = 0,01 b$ .

Aus den Streulängen der Isotope ergibt sich für W-nat. eine Isotopeninkohärenz von

$$\sigma_{\text{iso, inc}} = 1,60 \pm 0,12 b \quad \text{bei } 0 \text{ eV} ,$$

$$\sigma_{\text{iso, inc}} = 1,82 \pm 0,13 b \quad \text{bei } 1,26 \text{ eV} ,$$

$$\sigma_{\text{iso, inc}} = 3,56 \pm 0,21 b \quad \text{bei } 5,2 \text{ eV} .$$

### 3.4 Die Potentialstreuulängen

Sowohl für das natürliche Wolfram wie auch für die isotopenangereicherten  $\text{WO}_3$ -Proben wurden die totalen Wirkungsquerschnitte bei 143 keV gemessen und mit der Auswertung in Tab. 5 zusammengestellt. Wichtet man die Wirkungsquerschnitte der Isotope mit deren Häufigkeit, erhält man für das natürliche W einen Wert

$$\sum_i h_i \sigma_{\text{tot}i} = 8,55 \pm 0,27 b ,$$

der mit dem Meßwert am natürlichen  $W \sigma_{\text{tot}} = 8,30 \pm 0,10 b$  innerhalb des Fehlers übereinstimmt. Vollständige Deckungsgleichheit erhielt man mit der in 3.3 erwähnten möglichen Wasserkontamination von  $7 \cdot 10^{-4} \text{ gH}_2\text{O g}^{-1}$ , die zu einer Korrektur von  $\Delta \sigma_{\text{H}_2\text{O}} = -0,22 b$  führen würde.

Für das natürliche Wolfram sind in [16] Kurven für die Absorption  $\sigma_y$  und die inelastische Streuung

$\sigma_{\text{inel}}$  für hohe Neutronenenergien angegeben. Nach Subtraktion erhält man den totalen Streuwirkungsquerschnitt, der sich aus dem Potentialanteil und den Compoundreaktionen  $\langle \sigma_c^l \rangle$  für den Drehimpulsübertrag  $l$  zusammensetzt:

$$\langle \sigma_s \rangle = 4\pi R'^2 \varrho + \langle \sigma_c^0 \rangle + \langle \sigma_c^1 \rangle + \dots . \quad (7)$$

Die „effectiv-range“-Korrektur ist

$$\varrho = 1 - \frac{(kR')^2}{3}$$

mit der Wellenzahl  $k = \left( \frac{A}{A+1} \right) (2mE/\hbar^2)^{1/2}$ .

Da die Stärkefunktionen  $S_0$  und  $S_1$  in [12] angegeben sind, konnten die Compoundanteile

$$\langle \sigma_c^0 \rangle = \frac{2\pi^2}{k^2} (E/\text{eV})^{1/2} S_0 \left[ 1 - \frac{\pi}{2} (E/\text{eV})^{1/2} S_0 \right] \quad (8)$$

und

$$\langle \sigma_c^1 \rangle = \frac{2\pi^2}{k^2} (E/\text{eV})^{1/2} \cdot S_1 3(kR)^2 / (1 + (kR)^2)$$

mit dem geometrischen Kernradius  $R = 1,35 A^{1/3}$  fm berechnet werden. Beiträge von höheren Drehimpulsen werden als vernachlässigbar klein erwartet. Die Mittelung bei den Compoundreaktionen ist zulässig, da der mittlere Resonanzabstand 87 eV beim W-186 und bei den anderen Isotopen noch kleiner ist und somit im Fensterbereich von  $\pm 10$  keV über 200 Resonanzen zu erwarten sind.

In Zeile 8 von Tab. 5 sind die aus den Messungen berechneten Potentialstreuulängen  $R'$  aufgeführt, die mit den nämlichen Werten, berechnet aus den Resonanzparametern, verglichen werden können. Die Anpassung des gebundenen Zustands für W-182 gemäß 3.2 ( $E_0 = -94$  eV,  $g\Gamma_n^0 = 161$  meV) ergibt einen Resonanzbeitrag zur Streulänge von  $b_{\text{res}} = -0,30$  fm und damit ein  $R' = 7,3$  fm, was sehr gut mit dem Wert aus Zeile 8 übereinstimmt, während  $R'$  bei Verwendung der Resonanzparameter von [12] viel zu groß wird. – Beim Isotop 183 reicht für die Anpassung die Halbierung der Streubreiten in [12] nicht ganz aus. Man müßte zusätzlich den gebundenen Zustand vergrößern, um  $R'$  weiter abzusenken. Beim Isotop 184 scheint der Meßwert zu klein oder die Compoundbeiträge etwas zu groß zu sein. Beim Isotop 186 wird volle Übereinstimmung erreicht.

## Diskussion

Beim Wolframisotop 182 läßt sich die Diskrepanz der berechneten Werte für die Absorption, die Potentialstreuulänge und den kohärenten Streuwirkungsquerschnitt auf einen Schlag lösen, wenn

man einen gebundenen Zustand bei  $E_0 = -94$  eV mit  $g\Gamma_n^0 = 161$  meV einführt. Andere Fitversuche, wie Modifizierung der  $\gamma$ -Breiten, Zuordnung der Resonanzen zu anderen Isotopen oder Verschiebung des Wertes  $E_0$  für den gebundenen Zustand waren nicht in der Lage, die Unstimmigkeiten zu beheben.

Beim Isotop 183 sind die Resonanz-Parameter in [12] überholungsbedürftig. Die gemessenen Größen an den Isotopen 184 und 186 sind mit den Resonanzdaten in [12] verträglich und sind in sich konsistent.

Die bisherigen Streulängenwerte der W-Isotope 182, 183 und 186 bedürfen einer zum Teil erheblichen Korrektur.

Damit wird ein neuer meßtechnisch abgesicherter Datensatz zur Beschreibung der Wechselwirkung von Neutronen mit Wolfram und seinen Isotopen angeboten.

Wir danken der Reaktormannschaft für die ständige Hilfsbereitschaft. – Diese Arbeit ist mit der finanziellen Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie entstanden.

- [1] L. Koester u. K. Knopf, Z. Naturforsch. **26a**, 391 (1971) und **27a**, 901 (1972).
- [2] L. Koester u. P. Schacht, Z. angew. Physik **31**, 21 (1971).
- [3] L. Koester, W. Waschkowski u. J. Meier, Z. Phys. A **326**, 185 (1987).
- [4] L. Koester u. H. Ungerer, Z. Phys. **219**, 300 (1969).
- [5] L. Koester, Z. Phys. **182**, 328 (1965).
- [6] Gmelins Handbuch der anorganischen Chemie, 8. Aufl., W-Erg. Bd (B2), Weinheim 1979.
- [7] L. Koester, Neutron Scattering Lengths and Fundamental Neutron Interactions, Springer Tracts in Mod. Phys. **1977**, p. 80.
- [8] L. Koester, K. Knopf u. W. Waschkowski, Z. Phys. A **277**, 77 (1976).
- [9] W. Waschkowski u. L. Koester, Z. Naturforsch. **31a**, 115, (1976).
- [10] Y. A. Alexandrov u. G. S. Samosvat, Yadernaya Fisika **10**, 328 (1969).
- [11] S. J. Friesenhahn, E. Haddad, F. H. Fröhner u. W. M. Lopez, Nucl. Sci. Eng. **26**, 487 (1966).
- [12] S. F. Mughabghab, Neutron Cross Section Vol. 1, Part B, Academic Press, New York 1984.
- [13] H. S. Camarda, H. I. Liou, G. Hacken, F. Rahn, W. Makofske, M. Slagowitz, S. Wynchank u. J. Rainwater, Phys. Rev. C **8**, 5, 1813 (1973).
- [14] L. Koester, W. Waschkowski u. A. Klüver, Physica **137B**, 282 (1986).
- [15] J. R. Waters, J. E. Evans, B. B. Kinsey u. G. H. Williams, Nucl. Phys. **12**, 563 (1959).
- [16] D. I. Garber u. R. R. Kinsey, Neutron Cross Sections Vol. II, Curves BNL 325, 3rd ed. Brookhaven Natl. Lab., Upton, New York 1976.