

**Über den Massenschwächungskoeffizienten des Wassers
und wäßriger Lösungen von Verbindungen der Elemente
Se, Br, Cd, J, Ba, Ce und Tl**

Von Irmentraut Müller

(Aus dem Laboratorium für Medizinische Physik an der Universität Göttingen)

(Mit 3 Abbildungen)

I.

Um den Schwächungskoeffizienten monochromatischer Röntgenstrahlen an Elementen zu bestimmen, sind bereits von anderer Seite¹⁻³⁾ Lösungen der Verbindungen solcher Elemente herangezogen worden. Grundsätzlich gilt für solche Untersuchungen folgendes:

Je stärker sich der Schwächungseffekt für ein Element von der Schwächung seiner Verbindungskomponenten und der Schwächung des Lösungsmittels abhebt, desto genauer wird das Ergebnis der Untersuchung sein. Da die Photoabsorption etwa mit der dritten Potenz der Atomnummer ansteigt, so wird man, je leichtatomiger das zu untersuchende Element ist, bestrebt sein, die Atomnummer sowohl seiner Verbindungskomponenten als auch des Lösungsmittels so niedrig wie möglich zu halten. In der vorliegenden Arbeit wird als Lösungsmittel stets H_2O verwandt. Weiterhin muß die Löslichkeit der zu wählenden Verbindung um so größer sein, je leichtatomiger das Element ist, da der Schwächungseffekt des Elements um so deutlicher vor der Schwächung des Lösungsmittels hervortreten wird, je konzentrierter die Lösung ist. Da außerdem jede Umsetzung zwischen der Lösung und dem Material der Küvette ausgeschlossen werden muß, so ist aus den dargelegten Gründen die Zahl der Elemente, die für eine Untersuchung in Form gelöster Verbindungen zur Verfügung stehen, von vornherein einer gewissen Einschränkung unterworfen, sofern man erhöhte Anforderungen an die Genauigkeit des Ergebnisses stellt.

Im gleichen Sinn wie das Lösungsmittel und die leichtatomigen Komponenten der Verbindung wirkt sich auch das Fenstermaterial der Küvette aus, die die Lösung aufnehmen soll. Es muß also ebenfalls so leichtatomig wie möglich sein, um möglichst wenig zu absorbieren; weiterhin muß es die Lösung vollkommen abdichten, und schließlich muß es so widerstandsfähig sein, daß auch bei geringen

Schichtdicken der Lösung die Durchbiegung der Fenster klein gegen die Schichtdicke und quantitativ genau meßbar ist. Diese Forderungen erfüllten am besten Kohlemembranen von Mix & Genest von etwa 0,5 mm Dicke und 50 mm Durchmesser. Diese wurden mit Hilfe von Benzin von ihrer Lackschicht befreit und im Vakuum mit Zaponlack durchtränkt, wie dies Trübestein⁴⁾ beschrieben hat. Die verhältnismäßig geringe Absorption dieser Kohlemembranen hätte an sich die Untersuchung bis zu ziemlich langen Wellenlängen ermöglicht. Da aber auf die Genauigkeit der Schichtdickenmessung besonders großer Wert gelegt wurde, wurden keine geringeren Dicken als knapp 5 mm verwandt. So konnten die Messungen nicht auf längere Wellen als 0,78 Å ausgedehnt werden, da sonst die Intensität der Röntgenstrahlen schon allein durch das Wasser der Lösung zu weit herabgedrückt wurde.

II. Die Küvetten

Zur Aufnahme der Lösungen dienten Küvetten, deren Prinzip Voges⁵⁾ und deren genaue Daten Trübestein⁴⁾ beschrieben haben. Es wurden acht Küvetten verschiedener Länge benutzt, die zwischen 0,4962 cm und 5,5024 cm lagen.

Zur Messung von J_0 wurde eine mit destilliertem Wasser gefüllte Küvette in den Weg der Röntgenstrahlen gebracht, deren Wasserschichtdicke gerade derjenigen des Lösungswassers zuzüglich des Kristallwassers in der Lösungsküvette gleichen sollte. Zu diesem Zweck war es erforderlich, die Länge dieser Vergleichsküvette beliebig justierbar verändern zu können. Dies wurde so erreicht: während die eine Kohlemembran feststand, ließ sich die andere verschieben, wobei ihre Fassung den Kolben eines Zylinders bildete. Die Verschiebung erfolgte durch Drehen einer Überwurfmutter mit Feinteilung. Zur Abdichtung diente ein metallisches Tombakrohr von 62 mm lichter Weite und einer mittleren Länge von 55 mm.

Die erforderliche Dicke der Vergleichsküvette berechnet sich dabei folgendermaßen:

Es sei

D_L die Schichtdicke der Lösung in Zentimeter, aus der Dickenmessung der Lösungsküvette bekannt;

ferner seien

m das Gewicht der chemischen Verbindung einschließlich Kristallwasser, und

m_L das Gewicht der Lösung, durch Wägung bekannt, in Gramm,

V_L das Volumen der Lösung, gemessen in Kubikzentimeter; und schließlich seien

M das Molekulargewicht der chemischen Verbindung einschließlich Kristallwasser und

M_0 das Molekulargewicht der chemischen Verbindung ohne Kristallwasser, aus der chemischen Formel bekannt.

Dann besteht der Bruchteil

$$\frac{M_0}{M} \cdot \frac{m}{m_L}$$

der Lösung aus kristallwasserfreier Substanz und der restliche Bruchteil

$$1 - \frac{M_0}{M} \cdot \frac{m}{m_L}$$

aus Kristallwasser und Lösungswasser. Da die Dichte der Lösung aus den Messungen zu m_L/V_L folgt, so wiegt die auf jeden Quadratcentimeter Oberfläche der Schicht entfallende Lösungsmenge

$$\frac{m_L}{V_L} \cdot D_L \text{ Gramm,}$$

das in ihr enthaltene Lösungs- und Kristallwasser zusammen also

$$\frac{m_L}{V_L} \cdot D_L \cdot \left[1 - \frac{M_0}{M} \cdot \frac{m}{m_L} \right] \text{ Gramm.}$$

Ist ϱ_w die Dichte des Wassers bei Zimmertemperatur, und d_w die Schichtdicke der mit destilliertem Wasser gefüllten Vergleichsküvette, so wiegt das auf jeden Quadratcentimeter Oberfläche derselben entfallende Wasser

$$\varrho_w \cdot d_w \text{ Gramm.}$$

Da die Wassermassen pro Flächeneinheit in beiden Küvetten gleich sein sollen, so folgt aus der Gleichheit der beiden letzten Ausdrücke für die Dicke der Vergleichsküvette in Zentimeter:

$$(1) \quad d_w = \frac{m_L}{V_L} \frac{D_L}{\varrho_w} \left[1 - \frac{M_0}{M} \frac{m}{m_L} \right].$$

Es wurde stets ein für mehrere Küvettenfüllungen ausreichender Vorrat von 100 ccm Lösung bestimmter Konzentration hergestellt. Hierzu wurde m abgewogen, dann wurde mit Hilfe der Bürette destilliertes Wasser zunächst bis auf etwa 98 ccm zugegeben und erst nach mehrstündigem Warten, bis sich der Bodenkörper m völlig gelöst hatte und Temperatenausgleich eingetreten war, wurde das Eichgefäß bis zu seiner für 100 ccm gültigen Marke aufgefüllt. Die Masse des Lösungswassers wurde dabei einerseits durch das der Bürette entnommene Wasservolumen V_w zu $V_w \cdot \varrho_w$, andererseits durch Wägung des die Substanz enthaltenden Eichgefäßes vor und nach dem Einfüllen des Lösungswassers zu $m_w = (m_L - m)$ bestimmt. Die Übereinstimmung war stets besser als 1^o/₁₀₀.

III. Der Dickenmesser

Mit Hilfe des Dickenmessers sollte sowohl die Dicke der Membranen als auch die der Küvetten an verschiedenen Stellen derselben mit einer Genauigkeit von einigen μ festgelegt werden können. Sein Meßbereich mußte sich also von mindestens 0,5 mm (Membrandicke) bis 5 cm (größte Küvettendicke) erstrecken. Diese Aufgabe wurde folgendermaßen gelöst:

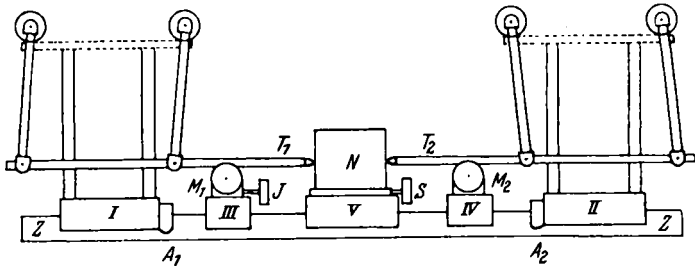
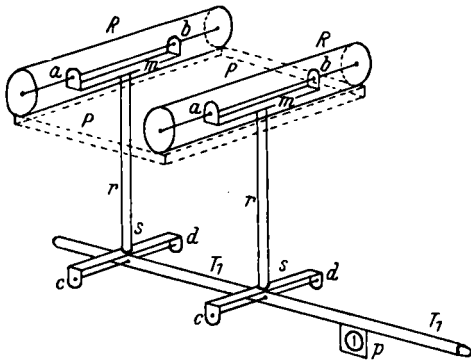


Abb. 1. Der Dickenmesser

Zwei Taster T_1 und T_2 (Abb. 1) aus dünnem Messingrohr, die an den einander zugekehrten Seiten durch etwa parabelförmige Endstücke verschlossen waren, dienten dazu, die zu messende Membran oder Küvette K mit einem Normalmaß N geeigneter Länge zu vergleichen. Die Aufhängung des linken Tasters T_1 zeigt Abb. 2 (die

Abb. 2. Aufhängung des linken Tasters T_1 beim Dickenmesser

des rechten T_2 war spiegelbildlich die gleiche). Die gestrichelt gezeichnete eiserne Platte P trägt an ihren Enden zwei parallele Messingröhren R . Durch jede derselben ist axial ein dünner Stahl draht ausgespannt, dessen Spannung durch nicht mitgezeichnete Schrauben an den Enden der Röhren R eingestellt werden kann. Die dünnen Messingröhren r tragen an ihren

oberen Enden Messingstreifen m , deren umgebogene Enden bei a und b an die Stahl drähte angelötet sind. An ihren unteren Enden tragen die Röhren r Messingstreifen s . Zwischen deren umgebogenen Enden bei c und d sind wiederum Stahl drähte ausgespannt, an deren Mitte der Taster T_1 angelötet ist. Durch diese Aufhängung wird erreicht, daß

sich der Taster T_1 reibungslos parallel zu sich selbst verschieben läßt, ohne aus der durch die Messingröhren r definierten Ebene seitwärts abzuweichen. Die Metallplatte P wird von vier Säulen getragen, die unterhalb des Tasters auf einem schweren Reiter I (Abb. 1) befestigt sind. Der Taster T_1 kann mit Hilfe eines feinen Fadens um etwa 1 cm nach links zurückgezogen und dadurch arretiert werden. Schließlich trägt der Taster einige Zentimeter vor seinem parabelförmigen Endstück eine kleine Glasplatte p (Abb. 2); diese ist bei dem linken Taster mit einer Mikrometerskala, bei dem rechten Taster mit einem senkrechten Strich als Nullmarke versehen. Die beiden Taster lassen sich mit ihrer gesamten soeben geschilderten Trägervorrichtung auf eine 1 m lange Zeisschiene Z setzen und auf dieser frei verschieben.

Auf die Schiene Z lassen sich mit Hilfe zweier weiterer Reiter III und IV zwei Mikroskope M_1 und M_2 aufstellen und zwischen diese kann ein dritter Reiter V gebracht werden. Dieser trägt auf seiner oberen Fläche eine Schlittenführung, auf die der zu messende Gegenstand aufgeschraubt werden kann. Durch Drehen der Justierschraube S läßt sich der zu messende Gegenstand parallel zur Zeisschiene Z verschieben.

Es werde nun zunächst ein Normalmaß N auf dem Reiter V befestigt, der an die Zeisschiene Z festgeklemmt wird. Dann wird Reiter II dem Reiter V genähert, und zwar um etwa $\frac{1}{2}$ cm mehr, als der Berührung zwischen dem Taster T_2 und dem Normalmaß N entspricht. Durch Drehen der Justierschraube S läßt sich dann erreichen, daß die Nullmarke von T_2 mit derjenigen des Mikroskops M_2 zur Deckung kommt, das ebenfalls an einer geeigneten Stelle auf der Zeisschiene Z festgeklemmt wird. In gleicher Weise wird dann der Reiter I dem Normalmaß von links genähert. Durch Anschläge A_1 und A_2 , die auf der Zeisschiene Z festgeklemmt werden können, läßt sich die Aufstellung der Reiter I und II jederzeit reproduzieren. Zuletzt wird das Mikroskop M_1 mit Hilfe des Reiters III so auf die Schiene Z geklemmt, daß sich die Nullmarke der am Taster T_1 befindlichen Strichplatte p mit der Nullmarke der Okularteilung im Mikroskop M_1 so gut wie möglich deckt; mit Hilfe der Justierschraube J wird dies vollkommen erreicht.

Das Wesentliche der so durchgeführten Einstellung ist das, daß auch nach Wegziehen der Reiter I und II und ihrer Taster T_1 , T_2 und nach Wiederrückbringen an die Anschläge A_1 und A_2 die Marken der Taster mit denen der Mikroskope mit völliger Genauigkeit wieder einspielen. Dies ist zu erwarten, solange nichts an der Stellung der Mikroskope und des Normalmaßes geändert wird, durch die allein

die Einstellung der Taster und damit die Abbildung der Marken bedingt wird. Bestätigt wurde es durch zahlreiche Versuche, ja es ergab sich, daß sich sogar nach 3 Tagen bei Wiederanschieben von Reiter *I* und *II* die Marken mit voller Präzision deckten.

Sollte nun beispielsweise die Dicke einer Küvette einschließlich ihrer Kohlemembranen gemessen werden, so wurde zunächst die Einstellung in der geschilderten Weise für ein Normalmaß *N* durchgeführt, dessen Länge der zu messenden Küvette möglichst nahe kam. Alsdann wurden die Reiter *I* und *II* auseinandergezogen, die Küvette an Stelle des Normalmaßes *N* auf Reiter *V* geschraubt, Reiter *II* bis zum Anschlag *A*₂ gebracht und an der Schraube *S* so lange gedreht, bis sich die Marken von *T*₂ und *M*₂ deckten. Dann wurde Reiter *I* bis zum Anschlag *A*₁ gebracht, und die Verschiebung von *T*₁ im Mikroskop abgelesen. Da der Abstand zweier Teilstriche auf der Strichplatte von *T*₁ genau 0,1 mm beträgt, und da vier solcher Teilstriche genau 21 Teilstrichen der Okularplatte in *M*₁ entsprechen, so entspricht die Verschiebung von *T*₁ um einen seiner Teilstriche $\frac{0,4}{21} = 0,01905$ mm. Da sich leicht auf ein Zehntel Teilstrich interpolieren läßt, konnte man Längenunterschiede von etwa $2\ \mu$ noch mit hinreichender Genauigkeit feststellen.

Die geschilderte Vorrichtung hat sich außerordentlich bewährt. Sie verdankt ihre Genauigkeit der reibungslosen Torsionsaufhängung und den geringen Kräften, die zum Abtasten erforderlich sind, und die die zu messenden Objekte unter keinen Umständen deformieren können. Die Endmaße wurden in der Werkstatt des Laboratoriums hergestellt und nach den Endmaßen der Fachschule für Feinmechanik geeicht. Dieser sei für ihre liebenswürdige Hilfe mein herzlichster Dank zum Ausdruck gebracht.

IV. Die Dickenmessungen

1. Um einen Anhalt für die Meßgenauigkeit zu gewinnen, wurden die nach den Endmaßen der Fachschule geeichten Endmaße des Laboratoriums miteinander verglichen. Das Ergebnis zeigt Tab. 1. In der ersten Spalte steht das Eichergebnis nach der Fachschule. Mit Hilfe dieses Maßes wurde für ein anderes die Länge bestimmt, und das Ergebnis in Spalte zwei ist dem Eichergebnis durch das Normal der Fachschule in Spalte drei gegenübergestellt. Wie Spalte fünf lehrt, liegen die Abweichungen alle innerhalb $\pm 1,7\%$.

2. Um die Schichtdicke einer Lösung zu bestimmen, wurde zunächst die Dicke der einen Membran, dann die der anderen und schließlich die Dicke der ganzen gefüllten Küvette einschließlich der

Tabelle 1
Die Meßgenauigkeit bei Vergleich von Eichmaßen

Geeicht nach	Ergebnis	Soll	Δ	$\Delta\%$
4,007	6,010	6,007	- 0,003	- 0,5
6,007	8,007	8,003	- 0,004	- 0,5
8,003	9,998	10,002	+ 0,004	+ 0,4
20,521	21,018	21,025	+ 0,007	+ 0,3
21,025	21,520	21,505	- 0,015	- 0,7
21,505	25,025	24,987	- 0,038	- 1,5
24,987	20,999	21,025	+ 0,026	+ 1,2
21,505	20,989	21,025	+ 0,036	+ 1,7
4,007	3,013	3,017	+ 0,004	+ 1,3
3,017	4,010	4,007	- 0,003	- 0,8

Membranen durchgemessen. An sich wäre daher in ungünstigen Fällen mit einem 3mal so großen Fehler wie in Tab. 1, also mit $\pm 0,5\%$, für die Schichtdicke der Lösung zu rechnen. Nun wurde aber die Dicke jeder Membran und die Dicke jeder Küvette je 3mal an 21 Punkten bestimmt, die gleichmäßig über deren Oberfläche verteilt waren. Ein Anhalt dafür, daß sich die Membranen unter dem Druck der Lösung durchgebogen hätten, fand sich nirgends. Es konnte daher mit dem Mittelwert aus allen 63 Messungen gerechnet werden, und dieser dürfte noch genauer als $\pm 1,7\%$ gewesen sein.

3. Für die Vergleichsküvette war die erforderliche Schichtdicke d_w des destillierten Wassers nach Formel (1) vorausberechnet worden. Die Dickenmessung lehrte aber, daß die wahre Dicke d'_w etwas von jener abwich, so daß ein Dickenfehler Δd bestand. Infolgedessen wurde in Wirklichkeit beobachtet:

$$(2) \quad \begin{cases} \frac{J}{J_0} = e^{-\mu(D_L - d_w)} \frac{e^{-\mu_w \cdot d_w}}{e^{-\mu_w \cdot d'_w}} \\ \frac{J}{J_0} = e^{-\mu(D_L - d_w)} \cdot e^{\pm \mu_w \cdot \Delta d}, \end{cases}$$

wobei μ für die kristallwasserfreie Substanz gilt. Das Meßergebnis wurde daher noch mit dem Korrekturfaktor $e^{\pm \mu_w \Delta d}$ multipliziert, wobei das obere Vorzeichen gilt, wenn $d'_w > d_w$ ist und umgekehrt. Dieser wich äußerstenfalls um $\pm 0,55\%$ vom Werte 1 ab.

V. Die Meßanordnung

Die Meßanordnung war die gleiche, wie sie Großkurth⁶⁾ gebraucht und beschrieben hat. Die nach dem Filterdifferenzverfahren von Küstner⁷⁾ erzeugten monochromatischen K-Strahlen wurden in bekannter Weise selektiv gefiltert. Die restliche $\beta\gamma$ -Strahlung wurde in der von Küstner⁸⁾ angegebenen Weise durch Korrektur aus-

geschaltet, so daß die wirksame Strahlung als reine $K_{\alpha\alpha}$ -Strahlung angesprochen werden darf. Als Maß für die Ionisation diente die an einem Präzisionsvoltmeter abgelesene Spannung, die, an den Mittelbelag eines Harmskondensators gelegt, die Aufladung des Elektrometers durch Ionisation gerade reproduzierte. Die Wirkung der Höhenstrahlung wurde durch ein regulierbares Uranstromnormal kompensiert. Als Ionisationskammern dienten für $\lambda \geq 0,5 \text{ \AA}$ eine Luftkammer mit Cellophanfenstern, für $0,5 > \lambda > 0,3 \text{ \AA}$ auch eine Luftkammer, die zur Verstärkung der Ionisation auf das 1,5fache Kupferfolien als Fenster besitzt, und für $\lambda < 0,3 \text{ \AA}$ die von Großkurth⁶⁾ beschriebene Kondensatorkammer aus Zinnfolien. Um jeden Einfluß des Comptoneffektes in dem bereits von Küstner⁷⁾ erwähnten Sinne auszuschalten, wurden die Differenzfilter *A* und *B* besonders abgeglichen. Hierdurch wurde möglicherweise sogar noch eine geringe Steigerung der Meßgenauigkeit erzielt.

Besonders sorgfältig wurde untersucht, ob nicht etwa von den Küvettenwandungen ausgehende Sekundärstrahlung die Meßergebnisse fälschen könnte. Da der Durchmesser der Küvetten etwa 39 mm betrug, wäre eine solche Störung denkbar gewesen, wenn eine Blende von 40 mm Durchmesser vor der Küvette stand, während aus geometrischen Gründen bei Verwendung einer Blende von 36 oder 30 mm Durchmesser die Bestrahlung der Küvettenwandungen ausgeschlossen war. Auch hätte ein solcher Effekt bei Verwendung einer ungefüllten Küvette am deutlichsten hervortreten müssen. Unter Verwendung eines Zinnstrahlers (mit Silber als Selektivfilter vor der Küvette) wurde die reine monochromatische *K*-Strahlung (*A—B*)⁷⁾ für verschiedene Blenden und Küvetten ohne und mit Küvette verglichen. Wie die in Tab. 2 nebeneinander gestellten Ergebnisse lehren, läßt sich ein Unterschied mit und ohne Küvette nicht nachweisen.

Tabelle 2

Die Küvette sendet keine nachweisbare Sekundärstrahlung aus

Ohne Küvette	Mit Küvette	Blendendurchmesser mm	Länge der Küvette mm
39,0	39,1	40	70
37,9	37,9	36	70
38,2	38,1	30	50

VI. Die Absorbenten

Das Wasser wurde destilliert bezogen. Es erwies sich aber als erforderlich, die Destillation noch mehrfach, meist 3mal, zu wiederholen. Die übrigen Absorbenten wurden in Form wasserlöslicher

Verbindungen von Kahlbaum geliefert. Sie sind unter Angabe ihres Kristallwassers in Tab. 3 zusammengestellt.

Tabelle 3
Die untersuchten Verbindungen

Absorbens	Verbindung	Reinheitsgrad	Wellenlängenbereich in Å
Se ₍₃₄₎	SeO ₂	reinst	0,786—0,162
Br ₍₃₅₎	NH ₄ Br	D. A. B. 6	0,786—0,162
Cd ₍₄₈₎	3 CdSO ₄ + 8 H ₂ O	pro anal.	0,434—0,162
J ₍₅₃₎	HJO ₃	pro anal.	0,786—0,162
Ba ₍₅₆₎	Ba(NO ₃) ₂ · H ₂ O	krist.	0,786—0,162
Ce ₍₅₈₎	Ce(NO ₃) ₃ · 6 H ₂ O	reinst f. wiss. Zwecke	0,786—0,162
Tl ₍₆₁₎	TlNO ₃	rein	0,786—0,162
H ₂ O	H ₂ O	selbst mehrfach destilliert	2,099—0,162

Um Reaktionen der Lösung mit der vernickelten Messingküvette zu vermeiden, wurde das Innere der Küvette mit Zaponlack ausgestrichen und mit einer hauchdünnen Schicht von Vaseline bedeckt. Trotzdem wurden vorsichtshalber bei den am stärksten reagierenden Verbindungen SeO₂, NH₄Br und HJO₃ die Lösungen nur höchstens 2 Std. benutzt und dann durch neue aus einem Vorrat derselben Konzentration ersetzt, um mit Sicherheit auszuschließen, daß mit der Zeit Teile des Küvettenmaterials in Lösung gingen.

VII. Die Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Tab. 4 und Abb. 3 zusammengestellt. Alle in Abb. 3 eingetragenen Kanten sind *K*-Kanten; nur bei Tl ist die *L_I*-Kante eingezeichnet. Tab. 5 zeigt die für die verschiedenen Wellenlängen benutzten Schichtdicken der Lösungen und ihre Dichten.

Küstner und Trübstein⁹⁾ hatten aus Messungen von van Look an Wasser die Schwächungsformel

$$(3) \quad \frac{\mu}{\rho} = 2,500 \cdot \lambda^{3,200} + 0,2200 \cdot f(\lambda)$$

gefunden, wobei

$$f(\lambda) = \frac{1}{1 + \frac{0,0484}{\lambda}} = \frac{\sigma_c}{\sigma_0}$$

den bekannten Ausdruck für die Comptonstreuung darstellt. Dabei zeigte sich ein mittlerer Beobachtungsfehler von $\pm 4,6\%$, wobei allerdings die hiernach berechnete Kurve in der Umgebung von 0,3 Å um einen kleinen Betrag über den Meßpunkten, in der Umgebung von 1 Å etwas unter den Meßpunkten verläuft. Aus diesen

Tabelle 4
Die für die Elemente ermittelten μ/ϱ -Werte

$K_{aa'}$ von	$\lambda_{aa'}$ in Å	Se (34)	Br (35)	Cd (48)	J (53)	Ba (56)	Ce (58)	Tl (81)	H ₂ O	$\Delta\%$ gegen H ₂ O theor.
Mn	2,0988								26,28	-5,7
Co	1,7866								17,54	+5,4
Ni	1,6558								14,09	+7,5
Cu	1,5386								10,04	-3,3
Ga	1,337								6,555	-2,0
As	1,1747								4,401	-1,6
Br	1,0389								3,194	+3,3
Rb	0,9250								2,210	+1,1
Sr	0,8758								1,886	+1,0
Zr	0,7857	94,47	102,8		48,64	56,53	—	154,6	1,395	+1,4
Mo	0,7092	72,88	75,70		36,16	43,44	51,86	122,7	1,090	+3,5
Rh	0,6135	48,17	52,07		24,75	27,85	33,63	84,63	0,7540	+3,1
Pd	0,5857	44,10	45,85		21,74	24,87	29,78	72,40	0,6850	+3,6
Cd	0,5354	34,58	36,12		17,20	19,91	23,51	57,09	0,5417	-0,03
Sn	0,4911	27,76	27,96		13,54	15,91	18,65	47,44	0,4525	-1,0
Te	0,4519	21,76	22,61		10,55	13,16	15,35	37,17	0,4058	+2,2
J	0,4340	—	—	44,22	—	—	—	—	—	—
Cs	0,4011	14,94	17,07	35,57	7,550	9,767	10,86	28,44	0,3422	+3,5
Ce	0,3580	11,27	12,10	26,78	32,54	—	8,030	20,76	0,2914	+1,6
Nd	0,3329	9,577	9,825	21,98	26,08	5,715	6,422	—	0,2683	+1,0
Sm	0,3100	7,720	8,177	18,40	22,19	24,57	5,297	13,94	—	—
Yb	0,2373	3,732	—	9,144	10,99	12,63	14,44	6,945	0,2102	+1,1
Ta	0,2162	2,729	3,066	7,198	8,969	9,964	11,28	5,554	0,1976	-0,06
Re	0,2045	2,301	2,600	—	7,512	8,240	9,607	4,676	0,1969	+1,9
Pt	0,1868	1,879	2,057	4,710	5,899	6,851	7,570	3,598	0,1840	-0,9
Hg	0,1765	1,596	1,782	4,038	5,209	5,455	6,525	3,203	0,1818	-0,00
Pb	0,1668	—	—	—	—	—	—	2,706	—	—
Bi	0,1623	1,305	1,390	3,403	4,287	4,602	5,307	2,530	0,1776	+0,6
Mittlere Fehler in %		$\pm 1,07$	$\pm 0,90$	$\pm 0,75$	$l: \pm 0,88$ $k: \pm 0,95$	$l: \pm 1,04$ $k: \pm 1,14$	$l: \pm 0,88$ $k: \pm 0,41$	$\pm 1,22$	$\pm 3,3$	

l = langwelliger Ast; k = kurzwelliger Ast

Gründen wurde das Ergebnis einer späteren Nachprüfung vorbehalten⁴⁾.

Das gleiche Auswertungsverfahren, wie es Küstner und Trübe-stein⁹⁾ ausgearbeitet haben, liefert für die Meßwerte der Verfasserin die Beziehung

$$(4) \quad \frac{\mu}{\varrho} = 2,5404 \cdot \lambda^{3,210} + 0,21944 f(\lambda),$$

wobei der mittlere Beobachtungsfehler auf $\pm 3,3\%$ herabgesetzt ist und die Vorzeichen der Unterschiede zwischen beobachteten Punkten und berechneter Kurve nunmehr längs der ganzen Kurve unregelmäßig streuen, wie man aus der letzten Spalte der Tab. 4 und aus

Abb. 3 erkennt. Es ist auffällig, daß allein für die drei größten Wellenlängen Unsicherheiten von $\pm 5,4$ bis $\pm 7,5\%$ auftreten. Die einfache Erklärung ist die, daß hier die Dicke der Wasserschicht der starken Schwächung wegen nicht größer sein dürfte als 0,438 mm. Dann ist die Schichtdickenbestimmung offenbar doch nicht mehr so

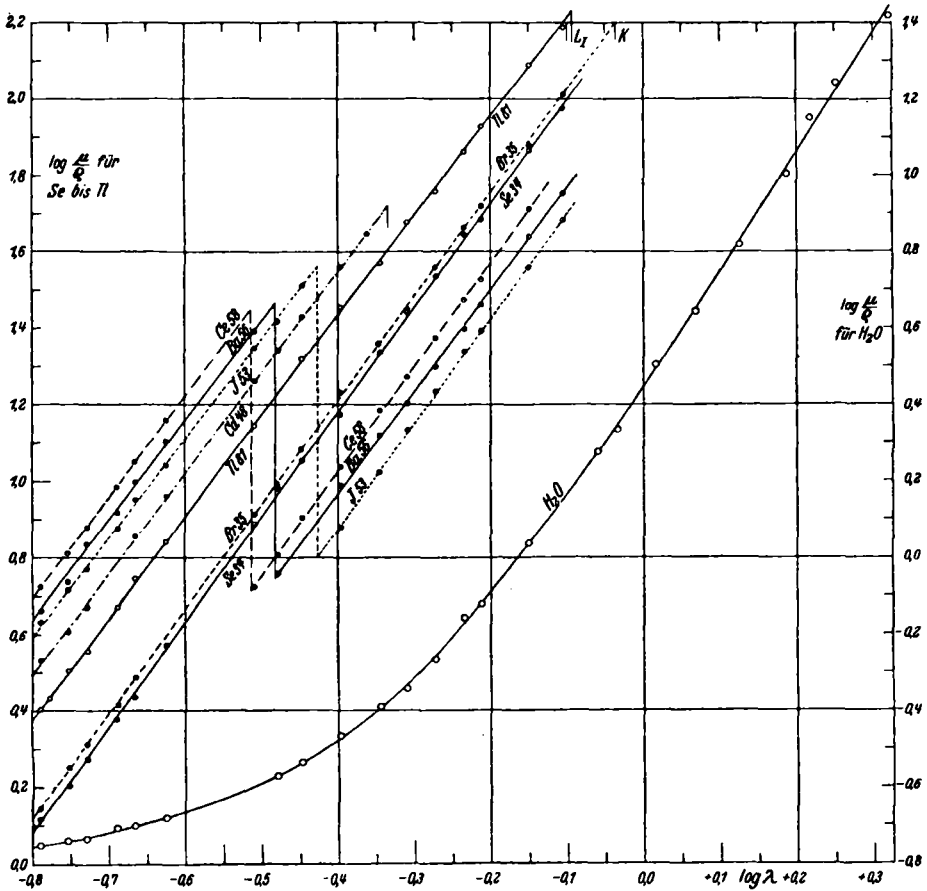


Abb. 3. $\log_{10} \frac{\mu}{q}$ in Abhängigkeit von $\log_{10} \lambda$

zuverlässig wie bei größeren Dicken. Hiermit bestätigt sich der Befund von Rindfleisch¹⁰⁾, daß die Unsicherheit der Ergebnisse der Schwächungsmessungen, wo sie sich überhaupt zeigt, nicht auf der monochromatischen Meßmethode, sondern auf Unsicherheiten des Filtermaterials beruht. Vergleicht man die Meßwerte der Verfasserin mit obiger Formel (3) von Küstner und Trübstein⁹⁾, so liegt der mittlere Beobachtungsfehler bei $\pm 4,0\%$. Die beiden obigen

Ta-

Die für verschiedene Wellenlängenbereiche

$K_{\alpha\alpha'}$ von	Se (34)		Br (35)		Cd (48)		J (53)		
	Schicht- dicke in cm	Dichte	Schicht- dicke in cm	Dichte	Schicht- dicke in cm	Dichte	Schicht- dicke in cm	Dichte	
Mn—Cu	—	—	—	—	—	—	—	—	
Cu—Br	—	—	—	—	—	—	—	—	
Br—Zr	—	—	—	—	—	—	—	—	
Zr—Mo	0,4982	0,049343	0,4982	0,049349	—	—	0,4982	0,101599	
Rh—Pd					—	—			
Pd—Sn		0,235998		0,191528	—	—			
Sn—Te					—	—			
Te—J	2,9937		2,9937	0,191879	—	—			
J—Cs					0,4962	0,167688			
Cs—Sm					—				
Sm—Yb	2,9937	0,235998	2,9937	0,191879	2,9937	0,167688	2,9937	0,101568	
Yb—Ta									
Re—Bi									

Formeln stimmen in ihren Zahlenwerten bereits so weitgehend überein und geben die Einzelbeobachtungen der Verfasserin so gut wieder, daß ihnen nahezu die gleiche Berechtigung zukommt.

Für die anderen untersuchten Stoffe gilt folgendes: Die μ/ρ -Werte für die leichtatomigen Komponenten der Verbindungen wurden nach der bekannten Formel:

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_V = P_E \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_E + P_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + P_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + \dots$$

ausgeschaltet, wobei sich die Indizes V auf die kristallwasserfreie Verbindung, E auf das untersuchte Element und 1, 2... auf die leichtatomigen Komponenten beziehen und P die Prozentgehalte bedeuten. Hierbei wurde nach Küstner und Trübestein⁹⁾ gesetzt für:

$$H: \frac{\mu}{\rho} = 0,00210 \cdot \lambda^{3,205} + 0,3931 f(\lambda),$$

$$N: \frac{\mu}{\rho} = 1,7632 \cdot \lambda^{3,205} + 0,200 f(\lambda),$$

$$O: \frac{\mu}{\rho} = 2,7983 \cdot \lambda^{3,205} + 0,200 f(\lambda),$$

während für

$$S: \frac{\mu}{\rho} = 27,51 \cdot \lambda^{3,05} + 0,14 f(\lambda)$$

nach Großkurth⁶⁾ benutzt wurde.

belle 5

benutzten Dichten und Schichtdicken der Lösungen

Ba (56)		Ce (58)		Tl (81)		H ₂ O	
Schicht- dicke in cm	Dichte	Schicht- dicke in cm	Dichte	Schicht- dicke in cm	Dichte	Schicht- dicke in cm	Dichte
—	—	—	—	—	—	0,0438	0,99823
—	—	—	—	—	—	0,1685	
—	—	—	—	—	—	0,4077	
0,4982	0,098399	0,4962	0,151579	0,4962	0,025379	0,6470	
0,7087		—			0,056243	1,4857	
		—				2,9937	
		1,4857				2,9937	
2,9937							

Im übrigen haben die Schwächungsformeln der leichten Komponenten nur verhältnismäßig geringen Einfluß auf das Ergebnis, da im ungünstigsten Falle die Schwächung durch die leichtatomigen Komponenten nur 6% der Gesamtschwächung durch die Verbindung ausmacht.

Abgesehen von Wasser zeigen alle Schwächungsäste im doppelt-logarithmischen Maßstabe vollkommen geradlinigen Verlauf, so daß unter Vernachlässigung der Streuung überall mit der Formel

$$\frac{\mu}{\rho} \sim \frac{\tau}{\rho} = C \cdot \lambda^n$$

gerechnet werden kann. Nach der Methode der kleinsten Quadrate ergeben sich dann die in Tab. 6 zusammengestellten Konstanten für C und n . Die der Atomnummer der Elemente entsprechende Reihenfolge der Absorptionsäste kommt in Abb. 3 sogar quantitativ hinsichtlich der Einzelabstände der Äste sehr schön zum Ausdruck. Ob die Äste in Wirklichkeit verschiedene Neigung aufweisen, sei dahingestellt.

Hinsichtlich der K -Sprünge μ_k/μ , konnte Rindfleisch¹⁰⁾ zeigen, daß das Ergebnis dann ganz wesentlich genauer wird, wenn man nur solche Meßpunkte verwendet, die beiderseits der K -Kante mit demselben Absorberexemplar erhalten wurden. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, muß man dann möglichst viele Wellenlängen in beiderseitiger Nachbarschaft der K -Kante für denselben Absor-

Tabelle 6
Die Konstanten C und n

Absorber	Kurzwellige Seite		Langwellige Seite	
	C	n	C	n
Tl ₍₈₁₎	—	—	304,04	2,6253
Ce ₍₅₈₎	639,53	2,6406	123,21	2,6662
Ba ₍₅₆₎	535,25	2,6180	104,59	2,6333
J ₍₅₃₎	444,38	2,5646	94,687	2,7491
Cd ₍₄₈₎	397,72	2,6307	—	—
Br ₍₈₅₎	196,73	2,7214	—	—
Se ₍₃₄₎	189,49	2,7510	—	—

benten zur Beobachtung heranziehen. Die vorliegende Untersuchung legte ihr Hauptaugenmerk auf den Verlauf der Schwächungsäste längs eines großen Wellenlängenbereichs. An demselben Absorber wurden beiderseits der K -Kante daher nur verhältnismäßig wenig Wellenlängen untersucht. Entsprechend der geringeren Anzahl Meßpunkte werden daher auch die Ergebnisse für den Sprung weniger genau sein. Diese sind in Tab. 7 zusammengestellt.

Tabelle 7
Die beobachteten K -Sprünge, verglichen mit Rindfleischs Formel

Element	Ganze Äste	Teiläste	Rindfleisch	Δ %
J ₍₅₃₎	5,62	5,65	5,44	+ 3,9
Ba ₍₅₆₎	5,20	5,11	5,25	— 2,7
Ce ₍₅₈₎	5,35	(5,48)	5,14	+ 4,1

Dabei beziehen sich die Teiläste auf denselben Absorbenten beiderseits der K -Kante, während die Ergebnisse für die ganzen Äste nach Tab. 6 berechnet wurden. Vergleicht man die Ergebnisse für die Teiläste mit der von Rindfleisch¹⁰⁾ aufgestellten Formel

$$\frac{\mu_k}{\mu_l} = 63,868 \cdot Z^{-0,6207},$$

so erhält man für Jod und Barium Abweichungen Δ von + 3,9 % bzw. — 2,7 %. Für Cer standen auf dem Teilstast zu wenig Punkte zur Verfügung. Hier liefern die ganzen Äste + 4,1 % Abweichung von Rindfleisch. Das Ergebnis ist recht befriedigend, da damit alle Sprünge innerhalb ± 5 % mit Rindfleisch übereinstimmen.

Zusammenfassung

1. Mit Hilfe monochromatischer Röntgenstrahlen ($K_{\alpha\alpha'}$ -Linien) werden nach dem Filterdifferenzverfahren von Küstner Schwächungsmessungen an Wasser und an wäßrigen Lösungen von Verbindungen der Elemente Se, Br, Cd, J, Ba, Ce und Tl untersucht.

2. Zur Kompensation der Schwächung des Lösungswassers und des Kristallwassers wird bei Messung von J_0 eine Küvette mit destilliertem Wasser von entsprechender Schichtdicke in den Weg der Röntgenstrahlen gebracht, so daß nur die Schwächung der kristallwasserfreien Substanz beobachtet wird.

3. Es wird ein Dickenmesser beschrieben, der es erlaubt, die Dicke der Küvettenfenster und der Flüssigkeitsschichten mit großer Genauigkeit zu bestimmen.

4. Für Wasser wird eine Schwächungsformel gefunden, die fast genau mit der von Küstner und Trübestein übereinstimmt.

5. Für die anderen Elemente zeigt der geradlinige Verlauf der Schwächungsäste in doppeltlogarithmischem Maßstab, daß das $C \cdot \lambda^n$ -Gesetz erfüllt ist.

6. Die Sprünge an den K -Kanten streuen innerhalb $\pm 4,1\%$ um die von Rindfleisch angegebenen Werte.

Die Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Prof. Küstner durchgeführt. Ich danke ihm für die unermüdliche Förderung der Untersuchung, der deutschen Forschungsgemeinschaft für die Überlassung der Röntgenröhre sowie der Dämpfungswaage.

Literaturverzeichnis

- 1) K. A. Wingårdh, Ztschr. f. Phys. 8. S. 363. 1922.
- 2) R. J. Stephenson, Phys. Rev. 43. S. 527. 1933.
- 3) L. Carr, Phys. Rev. 46. S. 92. 1934.
- 4) H. Trübestein, Strahlentherapie 60. S. 335. 1937.
- 5) F. Voges, Ztschr. f. Phys. 80. S. 548. 1933.
- 6) K. Großkurth, Ann. d. Phys. [5] 20. S. 198. 1934.
- 7) H. Küstner, Ztschr. f. Phys. 70. S. 324. 1931.
- 8) H. Küstner, Ztschr. f. Phys. 77. S. 57. 1932.
- 9) H. Küstner u. H. Trübestein, Ann. d. Phys. [5] 28. S. 394. 1937.
- 10) H. Rindfleisch, Ann. d. Phys. [5] 28. S. 432. 1937.

Göttingen.

(Eingegangen 11. Mai 1938)
