Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 22 (1949)
Heft: II

Artikel: Die Empfindlichkeit bei der quantitativen Autoradiographie
Autor: Zuber, K.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-111994

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Empfindlichkeit bei der quantitativen Autoradiographie

von **K. Zuber.**

(1. II. 1949.)

Die Verwendung der photographischen Wirkung zur Messung von Aktivitäten besitzt gegenüber andern Methoden folgende Vorzüge: 1. Eine photographische Emulsion ist imstande, über lange Zeiten zu integrieren, so dass geringe Intensitäten gemessen werden können. 2. Die Ausdehnung des zu messenden Präparats kann klein sein. Seine minimale Grösse hängt vom Bau des Schwärzungsmessers ab. Da dagegen die Emulsion gross gewählt werden kann, so ist es möglich, viele Präparate oder die Aktivitäten verschiedener Punkte des gleichen Präparats gleichzeitig auf dem gleichen Film miteinander zu vergleichen. (Diesen Fall der photographischen Methode nennt man speziell Autoradiographie.) 3. Unter Umständen kann man die Präparate direkt auf die Emulsion legen, so dass einerseits jede Absorption der Strahlung vermieden wird, andererseits nützt man so den maximal möglichen Raumwinkel aus. 4. Ist die Rückseite des Präparats auch aktiv, so kann man beidseitig Filme legen. Bei durchdringender Strahlung wird man mehrere Filme aufeinander gelegt auf das Präparat bringen. In beiden Fällen erhält man mehrere Autoradiographien, an denen Messungen ausgeführt werden können. Dadurch wird die Messgenauigkeit erhöht. 5. Der entwickelte Film stellt ein Versuchsergebnis in Form eines anschaulichen, haltbaren Dokuments dar.

Auf diese Vorteile ist kürzlich (K. Zuber 1948) hingewiesen worden. Im folgenden soll gezeigt werden, dass die Empfindlichkeit der quantitativen Autoradiographie in gewissen Fällen grösser ist als die Zählrohrmethode. Auch kann der Zeitaufwand, bei gleicher Genauigkeit, bei der Autoradiographie kleiner sein.

Die Frage, welchen Betrag eine Schwärzung haben muss, damit sie noch gemessen werden kann, hängt mit der Ausdehnung dieser Schwärzung zusammen. Besonders günstig ist der Fall, dass man den Ort der Schwärzung kennt, und dass sich in der Nähe der Schwärzung unbestrahlte Filmstellen befinden, so dass man die Schwärzung des Untergrundes direkt in der Umgebung der fraglichen Stellen bestimmen kann. Um einen Anhaltspunkt über die

Messgenauigkeit sehr geringer Schwärzungen zu erhalten, wurden folgende Versuche ausgeführt: Als Präparate wurden Goldmünzen verwendet, welche mit langsamen Neutronen aktiviert worden waren. Es entsteht dabei radioaktives Au^{198}, das β-Strahlen mit einer Halbwertszeit von 2,66 Tagen (Saxon 1948) emittiert. Die maximale Energie der β-Strahlen beträgt 0,970 MeV (Levy und Greuling, 1948). Die Goldmünzen wurden unter Verwendung von Blenden zwischen Röntgenfilme (Kodak Ultra-Speed) gelegt und im allgemeinen während fünf bis sechs Tagen dort belassen. Die Blenden bestanden aus Messingblech von 0,55 mm Dicke und gaben einen mittleren Teil der Münze von 13 mm Durchmesser frei. Die Dicke des Blechs war nicht gross genug, um die Strahlung ganz zu absorbieren. Daher entstand auf dem entwickelten Film um das stark geschwärzte Mittelfeld ein Rand von etwa 4 mm Breite, welcher bei grösserer Intensität des Strahlers gerade noch mit dem Auge sichtbar war. Diese Randschwärzung S_R, wie auch jene des Mittelfeldes S_M wurde mit einem Schwärzungsmesser gemessen, dessen Lichtfleck rund 2 mm² gross war (S_R und S_M sind die beobachteten Schwärzungen über der Untergrundschwärzung S_0). Die Versuchsergebnisse von vier verschiedenen Filmen sind in folgender Tabelle wiedergegeben. Dabei sind die Zahlen nach der Grösse von S_M geordnet und in zwei Gruppen, grösser oder kleiner 0,2 geteilt.

Tabelle 1.

Film	S_M	S_R	S_R/S_M	Film	S_M	S_R	S_R/S_M
4	0,296	0,019	0,064	3	0,190	0,009	0,047
3	0 291	0 011	0,038	2	0,187	0,006	0,032
2	0,269	0,017	0,063	1	0,169	0,005	0,030
1	0,249	0,011	0,044	4	0,119	0,007	0,054
4	0,211	0,008	0,038	3	0,112	0,006	0,053
				1	0,108	0,008	0,074
				2	0,107	0,005	0,047
	Mittel	**0,013**	**0,050**		Mittel	**0,007**	**0,048**

Es ist ersichtlich, dass für beide Gruppen die Mittelwerte von S_R/S_M gut miteinander übereinstimmen. Als Fehler einer Einzelmessung dieser Grösse ergibt sich rund 20%. Nehmen wir an, dass dieser Fehler nur von der Ungenauigkeit von S_R stammt, so erhalten wir das Resultat, dass sich mit der gegebenen Anordnung eine Schwärzung von 0,01 über dem Untergrund noch mit 20% Genauigkeit bestimmen lässt.

Leider war es nicht möglich, die Zahl der emittierten β-Strahlen auf eine genaue Weise direkt zu messen. Dagegen wurden folgende Wege eingeschlagen. Der entwickelte Film wurde mit einer Immersionsoptik mikroskopisch untersucht und die Anordnung der Ag-Körner im Untergrund und an der bestrahlten Stelle beobachtet. Es zeigt sich, dass im Untergrund die Körner vorwiegend einzeln oder zu zweit vorkommen, an der bestrahlten Stelle finden sich daneben auch häufiger im Mikroskop scheinbar zusammenhängende Gruppen. Die Tabelle 2 gibt eine rohe Statistik für die Häufigkeit von Gruppen mit n Körnern auf einer gesamten Fläche von 4200 μ^2.

Tabelle 2.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
B	53	33	16	7	10	2	4	1	1	2	1	0	0	1
U	66	33	15	7	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
D	−13	0	1	0	8	1	4	1	1	2	1	0	0	1

Dabei bedeuten B die Zahlen für die bestrahlte, U für eine unbestrahlte Stelle und D die Differenz. Nimmt man an, dass der Überschuss der Gruppen mit mehr als vier Körnern bei der bestrahlten Stelle Spuren von β-Strahlen darstellen, so erhält man das Resultat, dass mindestens 19 β-Strahlen auf die Fläche gefallen sind. Die Schwärzung der betreffenden Stelle wurde zu 0,187 gemessen. Es folgt, dass zur Erzielung einer Schwärzung von 0,01 mindestens 240 β-Strahlen pro mm^2 auffallen müssen. Da man bei der Anordnung mit einer Fläche von etwa 4 mm^2 auskommt, so müsste die Aktivität mindestens rund 1000 β-Strahlen emittieren, damit sie mit 20% gemessen werden kann.

Die vom Präparat emittierten β-Strahlen werden zahlreicher sein als die angegebene Zahl, falls nicht jeder β-Strahl eine Kornreihe mit mehr als vier Körnern erzeugt. Der Mechanismus der photographischen Wirkung geladener Teilchen ist kürzlich (Webb 1948) untersucht worden. Nach Webb soll ein AgBr-Korn der verwendeten Emulsion entwickelbar werden, wenn das Teilchen im Korn mindestens 150 Ionisierungsprozesse ausführt. Diese Zahl ist berechnet worden unter Annahme eines Ionisierungsaufwandes von 7,6 eV. Ein AgBr-Korn würde somit entwickelbar, wenn das Teilchen einen Energieverlust von mindestens 1150 eV im Korn erleidet. Nimmt man an, dass diese Zahl auch für andere Emulsionen gilt, so lässt sich die minimale Wegstrecke im Korn ausrechnen, die ein β-Strahl zu durchlaufen hat, damit er unabhängig von seiner Energie das Korn entwickelbar macht. Mit einem Wert von 2200 eV/cm Luft als Minimum des Energieverlustes und einem Bremsvermögen von

AgBr bezogen auf Luft von 3000 (WEBB 1948), erhält man als kritische Wegstrecke 1,75 μ. Die Grösse der entwickelten, meist etwas länglichen Ag-Körner schwankte zwischen 1,5 und 6 μ, die AgBr-Körner waren natürlich grösser als diese Werte. Trotzdem die Ausdehnung somit grösser als die kritische Wegstrecke ist, kann es gelegentlich vorkommen, dass der Weg eines β-Strahls in einem Korn kleiner als diese ist. Da dieser Fall doch ziemlich selten sein wird, wird dies zur Folge haben, dass in einer längeren Reihe nun ein Korn ausfällt. Dadurch entstehen zu viele Reihen mit weniger als 5 Körnern. Nimmt man an, dass in der gefundenen Statistik bei der bestrahlten Stelle bei den kleinen Reihen solche defekten längeren Reihen vorkommen, so kann ihre Zahl nicht grösser als die statistische Schwankung der gefundenen Werte der Gruppen mit $n < 5$ sein. Das würde in unserem Fall bedeuten, dass etwa 50% der auffallenden β-Strahlen defekte Kornreihen ergeben haben. Zur Erzeugung der Schwärzung von 0,01 müssten somit pro mm² rund 500 β-Strahlen auffallen.

Dass die Abschätzung der Zahl der β-Strahlen der Grössenordnung nach richtig ist, folgt, wenn man die zu erwartende Schwärzung mit dieser Zahl berechnet und mit der beobachteten Schwärzung vergleicht. Beim entwickelten Film sei auf der Fläche F_m die gesamte Fläche der Projektionen aller vorhandenen Silberkörner F. Falls dN β-Strahlen zusätzlich auf den Film gefallen wären, so möge diese Fläche um dF grösser sein. Jeder β-Strahl erzeuge im Mittel n entwickelbare Körner der Grösse f. Dann ist

$$dF = \frac{F_m - F}{F_m} \, n \cdot f \cdot dN \tag{1}$$

Es folgt, wenn man für $N = 0$ $F = F_0$ setzt

$$\ln (1 - F_0/F_m) - \ln (1 - F/F_m) = \frac{n \cdot f}{F_m} N$$

Lässt man die Lichtintensität J_e auf den entwickelten Film fallen und bedeutet J die durchgelassene Intensität, so ist $S = \log J_e/J$. Sind die Ag-Körner gross gegenüber der Lichtwellenlänge, so gilt $J_e/J = \frac{F_m}{F_m - F_0}$. Damit wird, wenn $S_0 = \log \frac{F_m}{F_m - F_0}$ die Schwärzung des Untergrundes bedeutet,

$$S - S_0 = \frac{n \cdot f}{F_m} \cdot N \cdot \log e \tag{2}$$

Als mittlere Grösse von f wurde 7 μ^2 gefunden, die einzelnen Werte schwankten von 3—14 μ^2. Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass im

Mittel 7 Körner der Emulsion von einem β-Strahl entwickelbar gemacht werden. Da der Röntgenfilm beidseitig mit einer Emulsion belegt ist, so werden auch in der rückseitigen Emulsion entwickelbare Körner entstehen. Aus der bekannten Absorption der β-Strahlen von Au^{198} (Zuber 1948) hat man pro β-Strahl im Mittel 4 Körner auf der Rückseite zu erwarten. Es ist somit $n = 11$. Mit $F_m = 4$ mm², $N = 1000$ berechnet sich $S - S_0 = 0{,}0084$ in guter Übereinstimmung mit dem Wert 0,01.

Es sei auch erwähnt, dass eine Zählrohrmessung ein Resultat ergab, welches nicht im Widerspruch mit den angegebenen Zahlen ist. Da es nicht möglich war, die Anordnung mit einem Normalpräparat zu kontrollieren, sei kein zu grosser Wert auf diese Messung gelegt.

Das hier mitgeteilte Ergebnis lässt sich bis zu einem gewissen Grad vergleichen mit Zahlen, welche für C^{14} (Cobb und Solomon 1948) gefunden wurden. Sie finden, dass $1{,}6 \cdot 10^5$ β-Strahlen/mm² eines Röntgenfilms auffallen müssen, um eine Schwärzung von 0,6 zu erzielen. Nimmt man an, dass bis zu dieser hohen Schwärzung Proportionalität zwischen Schwärzung und Anzahl der β-Strahlen gilt, so findet sich, dass zur Erzielung der Schwärzung 0,01 pro mm² 2600 β-Strahlen auffallen müssen. Diese Zahl ist rund fünfmal grösser als unsere obere Grenze. Dazu ist zu bemerken, dass die kinetische Energie der β-Strahlen von C^{14} nur 0,15 MeV beträgt. Dies hat zunächst zur Folge, dass die β-Strahlen von C^{14} nicht zur rückseitigen Emulsion gelangen. Andererseits besitzen die im Maximum des kontinuierlichen β-Strahlspektrums emittierten Elektronen nur eine Reichweite von etwa 7—8 μ in AgBr. Ein β-Strahl dieser Energie wird somit aus Reichweitegründen nur 2—3 Körner entwickelbar machen können. Es ist daher verständlich, dass zur Erzielung der gleichen Schwärzung wesentlich mehr β-Strahlen von C^{14} notwendig sind als von Au^{198}.

Die Empfindlichkeitsgrenze der quantitativen Autoradiographie ist zuguterletzt durch die statistische Schwankung ΔS_0 der Untergrundsschwärzung S_0 gegeben. Sie kommt zustande, weil die Fläche $F_0 = \nu_0 \cdot f \cdot F_m$ einerseits wegen den statistischen Schwankungen der Körnerzahl ν_0 pro Flächeneinheit schwankt und andererseits, weil die Kornflächen verschieden gross sind. Es ergibt sich, wenn Δf die letztere Schwankung ist, $\Delta F_0 = f \cdot \sqrt{\nu_0 \cdot F_m} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}$. Damit eine Aktivität noch gemessen werden kann, müssen die von ihr stammenden Ag-Körner eine Fläche $\Delta F_{\min}$ besitzen, welche grösser als ΔF_0 ist. Bedeutet a eine Zahl, welche umso grösser als 1

sein wird, je höher die verlangte Genauigkeit ist, so wird mit Formel (1)

$$\Delta F_{\min} = \frac{F_m - F_0}{F_m} \cdot n \cdot f \cdot N_{\min} = a \cdot \Delta F_0$$
$$= a \cdot f \cdot \sqrt{\nu_0 \cdot F_m} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}$$

Die Schwärzung S_0 der verwendeten Röntgenfilme variierte je nach dem Alter der Filme zwischen 0,2 und 0,4. Mit einem mittleren Wert von 0,3 wird $F_0 = 0{,}5\, F_m$ und $\nu_0 = \frac{1}{2} f$. Setzen wir in Hinblick auf die grosse Schwankung der Korngrössen $\Delta f = f$, so wird mit $n = 11$ und $f = 7\ \mu^2$

$$N_{\min} = 138\, a$$

Rührt der Fehler einer Messung nur von der statistischen Schwankung des Untergrundes her, so müssten, damit ein Wert mit 20% Genauigkeit folgen würde, die Zahl der auffallenden β-Strahlen grösser als 700 sein. Im zitierten Versuch ist aber sicherlich der Fehler auch noch durch den Ablesefehler vergrössert. Daher muss der Fehler, herrührend aus der statistischen Schwankung von S_0 wesentlich kleiner, d. h. a wesentlich grösser gewesen sein. Mit $a = 10$, d. h. es soll rund die Hälfte des Fehlers von S_0 herrühren, erhalten wir für die Abschätzung der β-Strahlen einen Wert, welcher innerhalb den früher angegebenen Grenzen liegt.

Alle diese Überlegungen zeigen, dass es vernünftig ist, anzunehmen, dass zwischen 1000–2000 β-Strahlen, herrührend von Au^{198} auf eine Fläche von 4 mm^2 des Films fallen müssen, damit nachher eine Schwärzung von 0,01 über der Untergrundschwärzung entsteht. Diese Schwärzung lässt sich mit einer Genauigkeit von noch 20% bestimmen.

Die Zahl von 2000 β-Strahlen lässt sich mit einem Zählrohr leicht messen, wenn sie während einer nicht zu langen Zeit emittiert werden. In unserem Falle betrug sie aber rund 150 Stunden, was rund 0,2 β-Strahlen pro Minute im Mittel entspricht. Um mit einer Zählanordnung eine derartig kleine Stosszahl zu registrieren, müsste der Nulleffekt oder wenigstens dessen Gang wesentlich kleiner als diese Zahl sein. Solomon und Mitarbeiter (Solomon 1947) haben zur Messung von Aktivitäten von C^{14} ein Zählrohr mit 4,3–5,3 Nullstössen pro Minute verwendet, was relativ günstig ist. Der Gang des Nulleffektes ist aber immer noch fünfmal grösser als die angegebene Zahl. Wollte man mit der Anordnung eine Aktivität mit 20% Genauigkeit messen, so dürfte diese umgekehrt nicht weniger als 5 Stösse pro Minute ergeben. Es müsste etwa eine Stunde lang die Stosszahl mit und ebensolang ohne die Aktivität gemessen werden.

Mit 10 zu vergleichenden Aktivitäten würde mindestens 20 Stunden registriert werden müssen. Mit der Autoradiographie dagegen erhalten wir in 6 Stunden eine Schwärzung von 0,01, welche sich bequem in 2 Stunden mit 20% Genauigkeit bestimmen lässt.

Der Film ist daher der Zählrohranordnung immer dann vorzuziehen, wenn es sich um den Vergleich vieler Aktivitäten kleiner Ausdehnung handelt, welche pro Minute wenige Elektronen emittieren. Die Lebensdauer muss so gross sein, dass mindestens 500 β-Strahlen pro mm^2 des Films fallen. Dies gilt für den Fall, dass die Grenze des kontinuierlichen β-Strahlspektrums bei 1 MeV liegt. Für weichere β-Strahlen, wie sie z. B. von C^{14} emittiert werden, ist die Zahl rund fünfmal höher.

Istanbul, Institut für Experimentalphysik.

Literaturverzeichnis.

[1]) J. Cobb u. A. K. Solomon, Rev. Sci. Instr. **19**, 441 (1948).
[2]) P. W. Levy u. E. Greuling, Phys. Rev. **73**, 83 (1948).
[3]) D. Saxon, Phys. Rev. **73**, 811 (1948).
[4]) A. K. Solomon et al. Phys. Rev. **72**, 1097 (1947).
[5]) J. H. Webb, Phys. Rev. **74**, 511 (1948).
[6]) K. Zuber, H. P. A. **21**, 365 (1948).