

**Zeitschrift:** Bulletin der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften = Bulletin de l'Académie suisse des sciences médicales = Bollettino dell' Accademia svizzera delle scienze mediche

**Herausgeber:** Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften

**Band:** 12 (1956)

**Heft:** 5

**Artikel:** Über einige definierte Strahlenreaktionen

**Autor:** Minder, W.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-307268>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 06.02.2025

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

Röntgeninstitut der Universität Bern (Direktor: Prof. Dr. A. Zuppinger)  
und Institut der Bernischen Radium-Stiftung (Leiter: PD. Dr. W. Minder)

## Über einige definierte Strahlenreaktionen

Von W. Minder, Bern

Wohl die auffallendste Tatsache bei der quantitativen Betrachtung biologischer Strahlenreaktionen ist die scheinbar extrem hohe biologische Wirksamkeit der Strahlenenergie. Wenn man beispielsweise den Energieumsatz für eine Strahlendosis von 500 r, welche einen Menschen mit hoher Wahrscheinlichkeit letal schädigt, in geläufige Energie umrechnet, so entspricht dieselbe nur einer Wärmezufuhr von genau 0,001 cal/g. Wenn man weiter die Zahl der durch diese Dosis erzeugten möglichen Ionisationen in Betracht zieht ( $1 \text{ r} = 1,61 \cdot 10^{12}$  Ionenpaare pro g Luft) und diese mit den Molekülzahlen der bestrahlten Materie (z. B.  $\text{H}_2\text{O}$ ) vergleicht, so folgt, da 1 g Wasser  $3,3 \cdot 10^{22}$  Moleküle enthält, daß bei 500 r von ca. 20 Millionen Wassermolekülen im Mittel nur je eines hätte positiv oder negativ ionisiert werden können. Das Ergebnis der Bestrahlung scheint deshalb zunächst sehr erstaunlich.

Die genauere theoretische Untersuchung der Einzelercheinungen der Wechselwirkung zwischen ionisierenden Strahlungen und Materie hat nun gezeigt, daß man bei der Entwicklung von konkreteren Vorstellungen über die Einzelphänomene sehr vorsichtig sein muß. Unsere quantitativen Informationen stammen ja fast ausschließlich von Untersuchungen an Gasen her, von Stoffsystemen also, die mit dem Erfolgssystem, z. B. dem menschlichen Körper, zunächst höchstens bezüglich der chemischen Zusammensetzung und damit der Masseschwächung (d. h. der Energieaufnahme pro g Substanz) vergleichbar sind. Die Gleichheit der Masseschwächungskoeffizienten gleicher chemischer Stoffe, unabhängig von ihrer Phase, bzw. die sehr wahrscheinlich vorhandenen, aber quantitativ nur sehr geringen Unterschiede der Energieaufnahme pro g (z. B. von je 1 g  $\text{H}_2\text{O}$ -Dampf, Wasser oder Eis) würde offenbar eine grundsätzliche Ähnlichkeit der Einzelercheinungen des Energieumsatzes, unabhängig vom Aggregatzustand, annehmen lassen. Eine solche Annahme ist zunächst sicher mit einem hohen Wahrscheinlichkeitsgehalt berech-

tigt. Weiter deutet die Tatsache der leicht nachweisbaren Leitfähigkeitszunahme von hoch isolierenden Flüssigkeiten, wie Paraffinöl (*Jaffé, Greinacher*), Schwefelkohlenstoff (*Taylor*) und Hexan (*Stahel*) unter Bestrahlung darauf hin, daß auch in Flüssigkeiten bewegliche Ladungsträger mit endlicher Lebensdauer gebildet werden. Wie aber kürzlich von *Richards* quantitativ gezeigt worden ist, ist die Leitfähigkeitszunahme bei Bestrahlung von Hexan mit  $\alpha$ -Strahlen ausschließlich der Wirkung von  $\delta$ -Strahlen, d. h. langsamen Elektronen, zuzuschreiben, die beim Durchgang des  $\alpha$ -Teilchens durch die Flüssigkeit aus dessen Bahn nach allen Seiten (ohne Bevorzugung einer Richtung) austreten. Es gelingt also hier bei hochionisierenden Strahlungen unter praktisch realisierbaren Bedingungen nicht, alle eventuell gebildeten Ladungsträger durch ein elektrisches Feld mit beliebig hoher Feldstärke zu separieren.

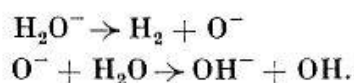
Bei der Übertragung der Vorstellungen der primären Wechselwirkungen in Gasen auf kondensierte Systeme sind ferner drei grundsätzliche Effekte in nähere Berücksichtigung zu ziehen. Zunächst verhindert das sogenannte *Franck-Condon-Prinzip*, daß ein wesentlicher Teil der von einem mehratomigen Molekül aufgenommenen Energie auf innermolekulare Schwingungsfrequenzen übertragen werden kann, und die Frage, ob ein Molekül unter Elektronenanregung oder unter eventueller Ionisation dissoziiert oder nicht, ist eine solche nach den gegenseitigen Lagen der Potentialflächen für den Grundzustand und die energetisch höher gelegenen Zustände. Aber gerade die zweite und dritte der hier anzuführenden Besonderheiten verhindern eine eventuelle primäre Dissoziation oder führen dieselbe in andere, vielleicht nicht erwartete Erscheinungen über. Der sogenannte *Käfigeffekt* umfaßt die Tatsache, daß sich ein Molekül mit erhöhtem Energieinhalt (wie z. B. eine Elektronenanregung oder eine Ionisation) in einem kondensierten System stets in engstem Kontakt mit seinen Nachbarmolekülen befindet, mit welchen es durch die sogenannten Van der Waalsschen Kräfte mehr oder weniger stark verbunden ist. Dieser Zustand wird in Systemen, die, wie alle biologischen, zu einem wesentlichen Anteil aus Wasser bestehen, noch sehr erheblich verstärkt durch die wegen des hohen Dipolcharakters (Zahlenwert = 1,87 Debye) des Wassers notwendigerweise eintretende feste Anlagerung von Wassermolekülen an alle Moleküle oder höhern Partikel mit Dipoleigenschaften. Dieser *Agglomerationseffekt* bewirkt in wässrigen Systemen die Bildung von zum mindesten bei gewöhnlicher Temperatur weitgehend stabilen Agglomerationen. Man muß deshalb in biologischen Systemen die Existenz von größeren molekularen Einheiten annehmen, denen bei Bestrahlung die Energiepartikel zugeführt werden, und innerhalb einer derartigen Reaktionseinheit kann dieselbe sicher

und zum Teil elektronisch (d. h. mit Lichtgeschwindigkeit) an jeden beliebigen Punkt hingelangen.

Eine korrekte theoretische Betrachtung der Primärvorgänge der Strahlenwirkung auf kondensierte Systeme muß diese Tatsachen mitberücksichtigen. Dadurch wird aber die Berechnung außerordentlich kompliziert, so daß zunächst nicht mehr als qualitative Ansätze möglich sind. Aus der mittleren chemischen Zusammensetzung des menschlichen Körpers (vgl. z. B. Lit. 9) kann leicht berechnet werden, daß bei dessen Bestrahlung etwa 80% der auftretenden sogenannten «physikalischen» Primäreignisse (gequantelte Energieaufnahme durch Moleküle) an Wassermolekülen stattfinden müssen. Es stellt deshalb die Kenntnis der Strahlenchemie des Wassers zweifelsohne die Grundlage jeder sinnvollen Diskussion biologischer Strahlenwirkungen dar. In den vergangenen Jahren haben sich zahlreiche Autoren (z. B. *Hart, Fricke, Magee, Allen, Miller, Wright, Frilley, Magat, Haissinsky* u. a.) um die Strahlenchemie des Wassers bemüht, und zwar sowohl unter Anwendung bester experimenteller Methoden als auch mit Hilfe höchster theoretischer Überlegungen. Das Gesamtergebnis ist aber bis jetzt komplex, z.T. widerspruchsvoll und damit für weitere Interpretationen sehr unbefriedigend. Bis vor kurzem stand die von *Risse* begründete und später von *Weiss* und *Lea* formulierte «einfache» Radikaltheorie sehr wesentlich im Vordergrund des Interesses. Nach dieser sollte durch Elektronenanregung ein Wassermolekül in ein H-Atom und ein OH-Radikal gespalten werden. Gleichermäßen sollte aus positiven Wasserionen ein  $H^+$ -Ion und ein OH-Radikal und aus negativen Wasserionen ein H-Atom und ein  $OH^-$ -Ion entstehen. Bei Gegenwart von Sauerstoff sollten sich die H-Atome mit  $O_2$  zu  $O_2H$ -Radikalen vereinigen.

Gegen diese an sich gut ausgebaute und auch teilweise wohlbegründete «einfache» Theorie sind nun aber in letzter Zeit sehr ernsthafte Einwände erhoben worden. Zunächst (*Burton* und *Magee*) ist es aus theoretischen Gründen äußerst fraglich, ob ein ionisiertes Wassermolekül überhaupt so lange existiert (ca.  $10^{-13}$  sec), daß es dissoziieren kann, bevor es das von ihm abgetrennte Elektron (dieses hat sicher eine viel längere Lebensdauer, bis es sich an ein Molekül oder Ion anlagern muß), wieder einfängt. Es ist deshalb keineswegs sicher, daß in flüssigem Wasser überhaupt Ionen durch die Strahlung gebildet werden, welche als solche eine, molekularchemisch gesprochen, sinnvolle Zeit (Frequenz der Atom-schwingungen) bestehen bleiben können. Eine Unterscheidung zwischen Ionisation und Anregung wäre damit aber grundsätzlich nicht mehr sinnvoll und beide Erscheinungen ihrem Wesen und ihrer Bedeutung nach, aber auch bezüglich ihrer weiteren Konsequenzen grundsätzlich gleich-

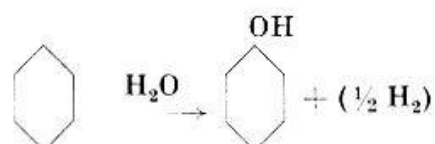
artiger Natur. Weiter ist von *Haissinsky* und *Magat* die Möglichkeit in Vorschlag gebracht worden, daß negativ ionisiertes Wasser direkt in ein  $H_2$ -Molekül und in ein O-Ion zerfallen soll:



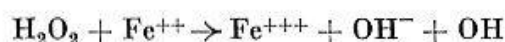
Damit wäre der Tatsache Genüge getan, daß in sauerstofffreiem Wasser praktisch nur  $H_2$  und  $H_2O_2$  gebildet werden. Sicher ist, daß in bestrahltem Wasser keine Äquivalenz zwischen freien H-Atomen und OH-Radikalen bestehen kann. Ein solches Gemisch müßte nämlich ein Redox-Potential von 0,37 V haben, gegen ca. 0,9 V, wie es bei bestrahltem Wasser vorliegt. Sind wirklich freie H-Atome vorhanden, so müßten dieselben, um den Redox-Potential-Wert befriedigen zu können, durch andere Partner (wie z. B. ca. 14%  $OH^+$  oder aber  $H_2^+$ , entstanden aus  $H + H^+ \rightarrow H_2^+$ ) kompensiert werden. Massespektroskopisch sind alle die genannten Partner in ionisiertem Wasserdampf vorhanden.

Es ist ferner durch zahlreiche Versuche gezeigt worden, daß  $O_2$ -haltiges Wasser sich wesentlich anders verhält als gasfreies. Neben der Bildung von  $H_2O_2$  entsteht daraus bei Bestrahlung auch freier Sauerstoff, wenn auch nur im Extremfall in stöchiometrischen Verhältnissen (*Fricke*). Weiter würde sich ein bei der Wasserspaltung entstandenes H-Atom mit hoher Wahrscheinlichkeit mit  $O_2$  verbinden zu dem relativ beständigen Radikal  $O_2H$ . Deshalb zeigen die strahlenchemischen Ausbeuten in sauerstoffhaltigem Wasser meist andere, und zwar höhere Werte als in gasfreiem. Es ist dies auch für biologische Strahlenreaktionen von sehr wesentlicher Bedeutung.

Trotz den vorstehend skizzierten, sehr ausgedehnten experimentellen und theoretischen Arbeiten ist man heute leider noch keineswegs in der Lage, über die Strahlenchemie des Wassers ein übersichtliches Bild zu entwickeln, und, abgesehen von den im Massenspektrometer nachgewiesenen Ionen bei Elektronenstoß in sehr verdünntem Wasserdampf ( $H_2O^+$ ,  $OH^+$ ,  $O^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H^-$  und  $O^-$ ), sind die meisten angenommenen geladenen oder neutralen Spalt- oder Reaktionsprodukte in flüssigem Wasser zunächst noch hypothetischer Natur. Eine hohe Wahrscheinlichkeit für dessen Existenz konnte bisher einzig für das OH-Radikal erwiesen werden. So ist die Umwandlung von Benzol in Phenol bei einer Ionenausbeute von  $M/N = 0,7$  offenbar nur unter Beteiligung von OH-Gruppen aus dem Dispersionsmittel Wasser möglich:

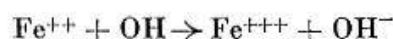


*Dainton* hat ferner gezeigt, daß die Strahlenpolymerisation von Acrylonitril höchstwahrscheinlich durch OH-Radikale (deren Existenz in Polymerisat spektroskopisch nachgewiesen wurde) vor sich geht, da dieselbe Reaktion auch bei Gegenwart von  $\text{H}_2\text{O}_2$  unter UV-Bestrahlung, welche das  $\text{H}_2\text{O}_2$  in zwei OH-Radikale spaltet, oder in  $\text{H}_2\text{O}_2$  bei Gegenwart von  $\text{Fe}^{++}$ , welches unter der Reaktion

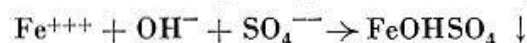


ebenfalls neutrales Hydroxyl bildet, vor sich geht.

Die bisher experimentell wohl am besten untersuchte Strahlenreaktion ist die Oxydation von Ferroion zu Ferriion. Diese ist von äußeren Bedingungen verhältnismäßig unabhängig bzw. die wichtigsten Abhängigkeiten sind vorauszusehen und deshalb zum Teil sehr gründlich untersucht worden. Zunächst ist die Gegenwart von freier Säure von wesentlichem Einfluß auf die Ausbeute. In neutraler Lösung ist der Umsatz weniger als halb so groß wie bei starkem Säuregehalt. Die genauen Zahlenverhältnisse sind noch nicht bekannt. Dagegen fällt in neutraler Lösung das Reaktionsprodukt  $\text{FeOHSO}_4$  aus. Sein Hydroxylgehalt beweist, daß am Umsatz das Dispersionsmittel beteiligt sein muß, und zwar wohl in der Art, daß nach der Reaktion

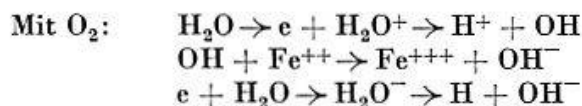
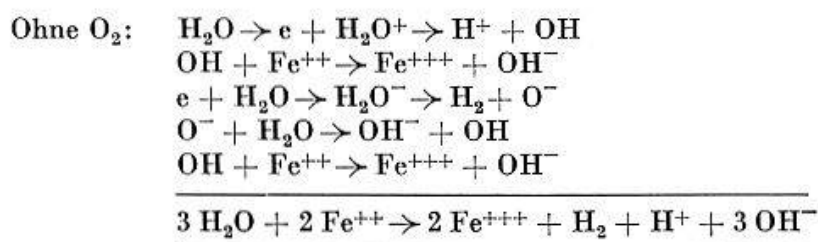


bei Abwesenheit von verfügbaren Wasserstoffionen das Hydroxylion mit dem Ferriion eine Verbindung eingeht von der grundsätzlichen Form



Bei Gegenwart von genügend freier Säure wird das OH-Ion neutralisiert und damit für die Ausfällung unwirksam.

Das Ausmaß der Strahlenoxydation von  $\text{Fe}^{++}$  ist weiter, wie Abb. 1 zeigt, vom  $\text{O}_2$ -Gehalt abhängig, und zwar bei  $\text{O}_2$ -Sättigung genau doppelt so groß wie bei  $\text{N}_2$ -Sättigung (auch die von *Ebert* angegebenen Werte ergeben bei strikter Berechnung der experimentellen Befunde dieses Verhältnis). Von den zahlreichen hypothetischen Formulierungen sollen die zwei folgenden als dafür möglich angegeben werden:



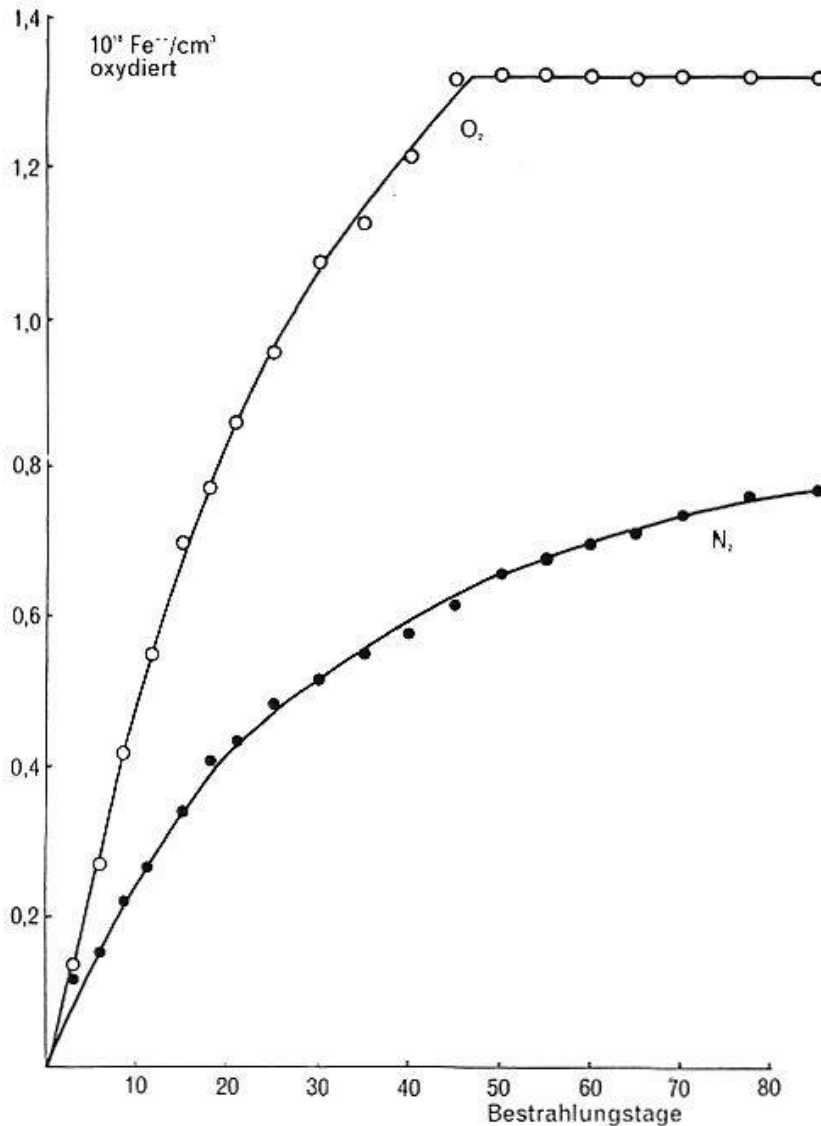
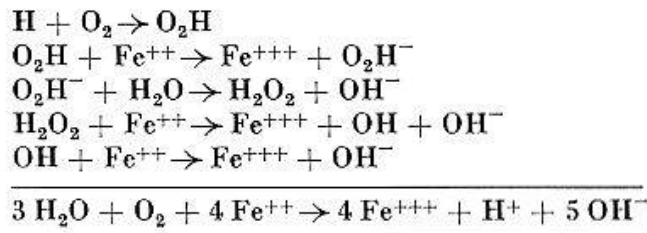


Abb. 1. Strahlenoxydation von  $n/500$   $\text{FeSO}_4$ -Lösung in  $0,8$  n  $\text{H}_2\text{SO}_4$  durch die Gesamtstrahlung von  $\text{Rb}^{86}$ . Obere Kurve:  $\text{O}_2$ -Sättigung der Lösung; untere Kurve:  $\text{N}_2$ -Sättigung.

Strahlenchemische Umsetzungen in wasserfreien Systemen sind sicher für das Verständnis biologischer Strahlenwirkung von geringerer Bedeutung, da ja molekulare Änderungen ohne Beteiligung des hier stets vorhandenen Wassers kaum denkbar sind. Trotzdem soll durch Abb. 2 ein solcher Umsatz veranschaulicht werden, weil er zeigt, daß auch in nicht-wässrigen Systemen Strahlenreaktionen mit hoher Ausbeute und grundsätzlich gleichem Verlauf wie unter Gegenwart von Wasser mög-

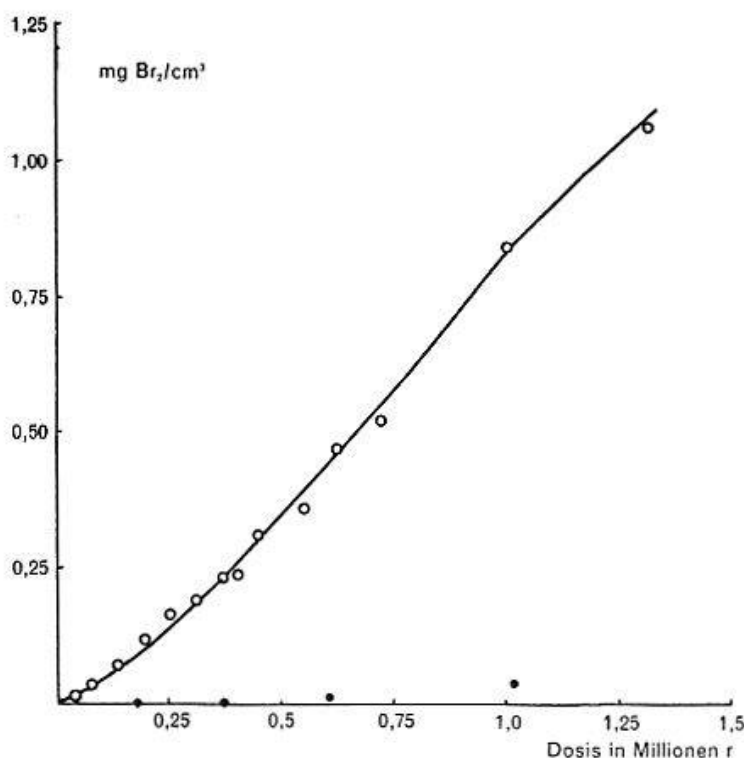


Abb. 2. Abspaltung von Brom aus Bromoform durch Röntgenstrahlen in wasserfreier Substanz. Punkte über der Abszissenachse: Bestrahlung in festem Zustand.

lich sind. Die dargestellte Abspaltung von  $\text{Br}_2$  aus wasserfreiem Bromoform verläuft mit der Strahlendosis in erster Näherung linear mit einer Ionenausbeute von 3,9 Molekülen Brom pro 32,5 eV zugeführter Energie, ein Wert, der als hoch anzusprechen ist. Neben freiem  $\text{Br}_2$  entsteht bei dieser Reaktion noch ein unlösliches Reaktionsprodukt, dessen Zusammensetzung noch nicht angegeben werden kann. Interessant ist die Tatsache, daß das Ausmaß der Reaktion auf weniger als 5% abfällt, wenn die Bestrahlung in fester Phase (Meßpunkte über der Abszissenachse) durchgeführt wird. Es sind offenbar auch in diesem System Diffusionserscheinungen die Voraussetzung zum Strahleneffekt. Das vorstehende Beispiel zeigt mit Deutlichkeit, daß selbst eine so einfach scheinende Reaktion wie  $\text{CHBr}_3 \rightarrow \text{Br}_2 + ?$  ein in seinen Einzelheiten komplexes Phänomen ist und durch elementare Darstellungen nicht befriedigend wiedergegeben werden kann.

Je einfacher aber ein bestrahltes System ist, desto größer ist die Möglichkeit, aus dessen Reaktionen allgemeinere Gesichtspunkte ableiten zu können. Es soll dies durch die Ergebnisse der Bestrahlung von Bromwasser (gesättigte wässrige  $\text{Br}_2$ -Lösung), welche in Abb. 3 wiedergegeben sind, kurz dargestellt werden. Bei dieser Strahlenreaktion wurde einerseits durch die Abnahme der Extinktion die Abnahme der  $\text{Br}_2$ -Konzentration, andererseits durch die Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit die Bildung eines eventuellen Elektrolyten kontrolliert. Es war zunächst



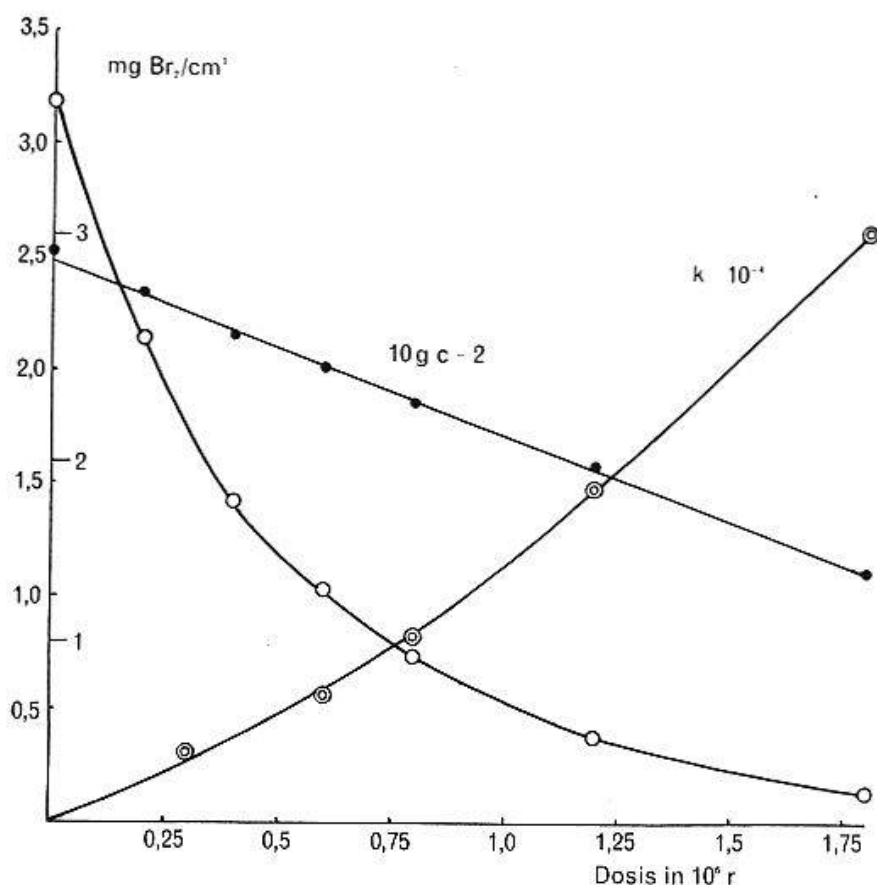
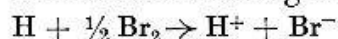


Abb. 3. Strahlenreaktion von wässriger Bromlösung. Ordinate rechts: Abfall der Bromkonzentration (Kreise) mit steigender Strahlendosis und Logarithmus dieses Abfalls (volle Kreise); Ordinate links: Zunahme der spezifischen Leitfähigkeit der bestrahlten Lösung  $k$  in  $10^{-4} \text{ Ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ .

erwartet worden, daß aus  $\text{Br}_2$  und Wasser unter Bestrahlung Bromwasserstoffsäure entstehen würde gemäß der formalen Gleichung:



Die  $\text{Br}_2$ -Konzentration nimmt, wie die logarithmische Darstellung (Gerade:  $\log C - 2$ ) sehr schön zeigt, exponentiell mit der Strahlendosis ab gemäß der Gleichung:

$$C = C_0 \cdot e^{-kD}$$

Es muß also für die Konzentrationsabnahme der Ansatz gelten

$$\frac{dC}{dD} = -kC \text{ und } k = -\frac{1}{C} \frac{dC}{dD}.$$

Die Reaktionswahrscheinlichkeit berechnet sich aus dem Kurvenverlauf zu

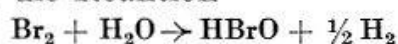
$$k = (1,73 \pm 0,08) \cdot 10^{-6} \text{ r}^{-1} = (1,07 \pm 0,05) 10^{-18} \text{ cm}^3 / 32,5 \text{ eV}$$

und die Ionenausbeute zu Beginn der Reaktion zu  $M/N = 12,0 \pm 0,5$  Moleküle  $\text{Br}_2/32,5 \text{ eV}$ : Tangente bei  $D \rightarrow 0$ . Bei der Ausgangskonzentration werden demnach durch die Einheitsenergie von  $32,5 \text{ eV}$  12 Moleküle  $\text{Br}_2$  zum Verschwinden gebracht. Diese sind im Mittel in einem Lösungsvolumen von genau  $10^{-18} \text{ cm}^3$  enthalten. Dieses stimmt bis auf den experimentellen Fehler der Bestrahlung vollkommen mit den Dimen-

sionen der obigen Reaktionswahrscheinlichkeit überein. Das heißt offenbar, daß innerhalb eines Raumes der obigen Größe die Strahlungsenergie quantitativ zum Umsatz verwertet wird und daß die Energie für einen Umsatz  $\varepsilon < 2,75$  eV je  $\text{Br}_2$ -Molekül beträgt in befriedigender Übereinstimmung mit der Dissoziationsenergie von  $\text{Br}_2$  von  $E_d = 1,99$  eV.

Aus der Leitfähigkeitszunahme, die quantitativ nur gering ist, muß zunächst geschlossen werden, daß das Reaktionsprodukt im wesentlichen *nicht* Bromwasserstoff sein kann, da diese hierfür mindestens um einen Faktor von 20 zu gering ausfällt. Es war deshalb die Bildung einer wenig dissoziierenden Sauerstoffsäure des Broms anzunehmen. Die Prüfung des vollkommen farblosen Reaktionsproduktes mit *Schiff*schem Reagens (empfindlich auf  $\text{Br}_2$  und  $\text{BrO}_2^-$ ) ergab nur eine geringe Färbung, so daß die Sauerstoffsäure  $\text{HBrO}$  sein mußte, woraus sich das Brom durch Säurezusatz freisetzen ließ.

Es ist deshalb die Reaktion



anzunehmen, als weiteres Beispiel für die Existenz der OH-Gruppe (Radikal) als reaktionsfähiges System in wässriger Lösung und die gleichzeitige Abwesenheit von freiem atomarem Wasserstoff.

Versucht man, auf die eingangs erwähnten energetischen Besonderheiten biologischer Strahlenreaktionen zurückkommend, die Ergebnisse der Strahlenchemie in die allgemeinere Betrachtung einzubeziehen, so sehen die Ergebnisse kaum mehr sehr erstaunlich aus. Die an chemischen Modellen gemessenen Ionenausbeuten, d. h. die Zahl der umgesetzten Moleküle bezogen auf die Energie von 32,5 eV, die zur Bildung eines Ionenpaares in Luft der Strahlung entzogen wird, bewegen sich etwa in den Grenzen zwischen 0,01 bis 15, mit einer deutlichen Häufung der Werte in der Umgebung der Größenordnung 1. Nimmt man als Ausbeute bei biologischen Systemen den sehr vernünftigen Mittelwert von  $\frac{M}{N} = 2$  an, so würden durch 500 r pro g der biologischen Substanz  $1,6 \cdot 10^{15}$  Moleküle irgendwelcher Reaktionsprodukte, d. h.  $2,7 \cdot 10^{-9}$  Mol pro g gebildet werden, was auf den ganzen Körper (70 kg) umgerechnet in der Größenordnung etwas über  $10^{20}$  Moleküle bedeuten würde. Diese Zahl entspricht aber bei verschiedenen Molekulargewichten den folgenden Absolutmengen eines hypothetischen Reaktionsproduktes (siehe Tab. 1).

Von den 6 letztgenannten, biologisch bedeutsamen Stoffen könnten im menschlichen Körper offenbar z. T. gar nicht so große Mengen vorhanden sein, wie sie durch die obige Strahlendosis umgewandelt werden könnten. Es besteht somit grundsätzlich die Möglichkeit, daß durch die an sich kleine Strahlendosis von 500 r die gesamte Menge eines biolo-

Tabelle 1  
Durch 500 r gebildete Mengen eines hypothetischen Reaktionsproduktes bei  $M/N = 2$

Stoff	Molekulargewicht	Menge in g
Wasser . . . . .	18	0,003
Cystein . . . . .	121	0,023
Adenylsäure . . . . .	347	0,065
Triglycerid . . . . .	836	0,157
Glykogen . . . . .	3 640	0,685
Ribonuclease . . . . .	14 000	2,635
Pepsin . . . . .	36 000	6,76
Serumalbumin . . . . .	73 000	13,72
Urease . . . . .	483 000	90,7
Hämocyamin . . . . .	6 600 000	1240
DNS (max) . . . . .	20 000 000	3760

gisch hochwertigen Stoffes chemisch verändert werden kann. Es ist dies ohne Zweifel eine Feststellung, welche zum Verständnis biologischer Strahlenwirkungen einen wesentlichen Beitrag liefern kann, und es wird die Aufgabe der weiteren verfeinerten Forschung sein, die für das Bestrahlungsergebnis wichtigsten Reaktionen aufzusuchen und aufzuklären.

#### *Zusammenfassung*

Es besteht heute kein Zweifel mehr, daß die Grundvorgänge, die die mannigfaltigen biologischen Strahlenreaktionen verursachen, solche strahlenchemischer Natur sind, bei denen das Wasser als mengenmäßig wichtigster Aufbaustoff als Energieüberträger und Reaktionspartner beteiligt ist. Es werden einige einfache strahlenchemische Reaktionen besprochen und gezeigt, daß auch in wasserfreien Systemen Strahlenreaktionen mit hoher Ausbeute vorkommen können. Für die Bedeutung des OH-Radikals als wohl wichtigsten reaktionsfähigen Spaltproduktes des Wassers wird neues experimentelles Material geliefert. Die auffallende Wirkung geringer Gesamtenergiemengen ionisierender Strahlungen auf biologische Systeme kann auf Grund strahlenchemischer Umsetzungen ohne Schwierigkeiten verstanden werden.

#### *Résumé*

Il n'y a plus de doute maintenant que les phénomènes essentiels, qui provoquent les réactions d'irradiation, biologiquement si variables, sont de nature chimique, dans lesquels l'eau, composé essentiel et volumétriquement le plus important de la matière vivante, joue le rôle de porteur d'énergie et de participant aux réactions. L'auteur présente et discute quelques réactions d'irradiation simples, et montre que celles-ci peuvent se produire aussi dans la matière dépourvue d'eau. L'importance du radical OH comme élément essentiel dans les réactions de décomposition

de l'eau est mise en évidence par de nouvelles données expérimentales. L'action frappante de petites quantités d'énergie par une irradiation ionisante livrées à un système biologique, peut facilement être mise en évidence, à la base de modifications chimico-physiques.

### *Riassunto*

Non c'è più alcun dubbio che i processi fondamentali provocati dalle multiformi azioni biologiche dei raggi sono di natura radio-chimica. L'acqua, quale più importante elemento di sintesi, dal punto di vista quantitativo, partecipa a tali processi sia come trasmettitore di energia, sia prendendo direttamente parte alla reazione. Vengono discusse alcune semplici reazioni radio-chimiche e si dimostra che anche in sistemi anidri possono verificarsi processi d'irradiazione con alto rendimento. Vien fornito nuovo materiale sperimentale illustrante il significato del radicale OH quale più importante elemento di scissione dell'acqua ancora in grado di reagire chimicamente. E possibile comprendere senza difficoltà, sulla base di trasformazioni radio-chimiche, l'azione sorprendente esercitata da piccole quantità di energia dovute a radiazioni ionizzanti su sistemi biologici.

### *Summary*

It can be assumed now that the fundamental primary processes of the different actions of ionizing radiations on biological matter are of radiation-chemical nature. Water as the most abundant compound is involved thereby as energy conducting system and as reacting material. Some simple radiation-chemical reactions are described, and it can be shown that in systems, free of water, radiation-chemical reactions with a high yield can also occur. New material for the OH-radical as the most important reacting decomposition product of water can be given. The striking biological actions of low overall energy amounts of ionizing radiations can easily be understood on the base of radiation-chemical changes of the most important biological molecules.

1. *Burton, M., and Magee, J. L.*: J. chem. Physics. **56**, 842 (1952). – 2. *Dainton, F. S., and Collinson, E.*: Ann. Rev. physical. Chem. **2**, 99 (1951). – 3. *Ebert, M., and Boag, J. W.*: Disc. Faraday Soc. **12**, 189 (1952). – 4. *Fricke, H., and Morse, S.*: Amer. J. Roentgenol. **18**, 426 u. 430 (1927). – 5. *Frilley, M.*: Brit. J. Radiol. Suppl. **1**, 50 (1947). – 6. *Haissinsky, M., and Magat, M.*: C. R. Acad. Sci. (Paris) **233**, 954 (1951). – 7. *Hart, E. J.*: Radiol. Res. **1**, 53 (1953). – 8. *Liechti, A., Minder, W., und Wegmüller, F.*: Radiol. clin. (Basel) **14**, 167 (1945). – 9. *Liechti, A., und Minder, W.*: Röntgenphysik, 2. Aufl. J. Springer, Wien 1955. – 10. *Miller, N.*: Disc. Faraday Soc. **12**, 110 (1952). – 11. *Minder, W.*: Brit. J. Radiol. **24**, 435 (1951). – 12. *Minder, W.*: Mitt. Lebensmitt. **46**, 76 (1955). – 13. *Minder, W.*: Bull. schweiz. Akad. med. Wiss. **11**, 290 (1955). – 14. *Richards, E. W. T.*: Proc. physical. Soc. A **64**, 631 (1953). – 15. *Risse, O.*: Ergebn. Physiol. **26**, 242 (1930). – 16. *Weiss, J.*: Nature **153**, 748 (1942). – 17. *Wright, J.*: Disc. Faraday Soc. **12**, 60 (1952).