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: 11 (1955)

Heft: 4-5

Artikel: Bemerkungen zu den Primäreffekten biologischer Strahlenwirkungen

Autor: Minder, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-307223

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: 07.12.2025

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

D. K. 615.849:57

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

Bemerkungen zu den Primäreffekten biologischer Strahlenwirkungen

Von W. Minder

Biologische Wirkungen ionisierender Strahlungen sind außerordentlich zahlreich und vielgestaltig. Man darf auf Grund des überaus großen experimentellen Materials ohne Vorbehalte die Behauptung aufstellen, daß wohl alle durch Maß und Zahl ausdrückbaren Zustände irgendwelcher biologischer Systeme durch ionisierende Strahlungen Veränderungen erleiden, wobei das Ausmaß solcher Veränderungen in den meisten Fällen stetig mit der Strahlendosis, d. h. der vom System aufgenommenen Energiemenge, ansteigt.

Alle solchen Reaktionen werden aber durch ein und dieselbe Ursache bewirkt, nämlich durch den dem System einverleibten Energiebetrag und die bei dieser Einverleibung auftretenden Einzelvorgänge quantenhafter, atomarer und molekularer Natur. Man bezeichnet dieselben meist als «Primäreffekte». Seit mehr als 10 Jahren versuchen wir, uns über dieselben ein genaueres Bild zu machen. Zweckmäßigerweise trennt man sie dabei in die «physikalischen Primäreffekte», welche die Einzelheiten der Schwächungsvorgänge der Strahlung in Materie umfassen, und in die «biologischen Primärvorgänge», welche auf die Strahlungsschwächung unmittelbar folgen und durch Natur, Zusammensetzung, Reaktionsfähigkeit, thermodynamische Zustände und Umweltfaktoren des biologischen Systems wesentlich mitbedingt sind. Wenn über die ersteren teilweise recht genaue Informationen zugänglich sind, so sind die Kenntnisse über die biologischen Primäreffekte noch recht dürftig, und eine Vertiefung derselben kann nur auf dem Wege über exakt prüfbare, chemisch definierte Modell-Systeme gewonnen werden.

Die Dosismessung ionisierender Strahlungen geschieht bekanntlich durch die Messung der durch dieselben in Luft verursachten Ionen. Aber schon hier zeigt sich die grundlegende Diskrepanz, daß die der Strahlung pro Ionenpaar in Luft entzogene Energie von $W = 32{,}5$ eV sehr wesentlich höher ist als die I. Ionisationspotentiale aller gasförmigen Stoffe

von etwelcher biologischer Bedeutung. In Tabelle 1 sind einige Ionisationspotentiale wiedergegeben:

Tabelle 1
Ionisationspotentiale in eV einiger einfacher Stoffe

Substanz	Formel	Ionisationspotentiale in eV
Helium	He	24,46
Argon	A	15,68
Wasserstoff. . .	H_2	15,6
Stickstoff . . .	N_2	15,51
Sauerstoff . . .	O_2	12,5
Jod	J_2	9,7
Wasser.	H_2O	12,56
Ammoniak . . .	NH_3	11,2
Methan	CH_4	14,5
Äthen	C_2H_6	12,8
Alkohol	C_2H_5OH	11,3

Neben der Ionisation sind somit noch andere primäre Phänomene an der Strahlenschwächung in Gasen beteiligt, deren Gesamtenergie-Entzug ebenso groß oder größer ist als derjenige durch die Ionisation. Ein sehr wesentlicher Anteil der aufgenommenen Energie wird für Elektronen-Anregungen verwendet, also für die «Hebung» von Elektronen in Atomen oder Molekülen auf höhere Energiestufen. Diese Umsätze können sich durch Fluoreszenz, eine bei Bestrahlung sehr häufige Erscheinung, manifestieren. Schließlich wird ein ohne Zweifel recht beträchtlicher Teil der aufgenommenen Strahlenenergie in innermolekulare Schwingungen (Rotations- und Rotationsschwingungsspektren) umgewandelt. Wegen der relativen Langsamkeit der letzteren kann die bei Ionisationen oder Elektronen-Anregungen dem Molekül zugeführte Energie nicht, oder nur in geringem Maße, den innermolekularen Schwingungen übermittelt werden (*Franck-Condon-Prinzip*). Je nach den Potentialverhältnissen der betroffenen Moleküle führen Ionisationen und Anregungen zu Moleküldissoziationen. Die Massenspektroskopie erlaubt es, längerlebige Produkte (Lebensdauer größer als ca. 10^{-6} sec.) quantitativ nachzuweisen. Tabelle 2 soll einen Einblick in die komplizierten Dissoziationsverhältnisse vermitteln, wie sie nach Elektronenstoß (72 eV) aus Benzol, nach *Hustrulid*, *Kusch* und *Tate*, im Massenspektrometer erhalten werden können (8).

In Abb. 1 sind die relativen Häufigkeiten der ionisierten Spaltprodukte des Benzols zur Darstellung gebracht worden. Selbst bei einem so symmetrisch und so fest gebauten Molekül wie Benzol führt fast in der Hälfte der Fälle eine Ionisation zu einer Depolymerisation, und in etwa

Tabelle 2
Relative Verteilung der positiven Ionen, entstanden aus Benzol nach Stoß mit 72-eV-Elektronen

Masse-zahl	Ion	Relative Häufigkeit in %	Masse-zahl	Ion	Relative Häufigkeit in %
78	$C_6H_6^+$	100	39	$C_3H_3^+$	0,6
77	$C_6H_5^+$	15,2	38	$C_3H_2^+$	3,6
76	$C_6H_4^+$	4,6	37	C_3H^+	2,5
75	$C_6H_3^+$	1,7	36	C_3^+	0,3
74	$C_6H_2^+$	4,0	28	$C_2H_4^+$	0,2
73	C_6H^+	1,0	27	$C_2H_3^+$	1,3
72	C_6^+	0,2	26	$C_2H_2^+$	1,1
63	$C_5H_3^+$	2,6	25	C_2H^+	0,14
62	$C_5H_2^+$	0,6	24	C_2^+	0,03
61	C_5H^+	0,5	15	CH_3^+	0,01
60	C_5^+	0,2	14	CH_2^+	0,02
52	$C_4H_4^+$	13,5	13	CH^+	0,03
51	$C_4H_3^+$	15,7	12	C^+	0,05
50	$C_4H_2^+$	13,4	78	$C_6H_6^{++}$	1,8
49	C_4H^+	2,1	77	$C_6H_5^{++}$	0,15
48	C_4^+	0,3	75	$C_6H_3^{++}$	0,42
			73	C_6H^{++}	0,015

einem Drittel besteht dieselbe in einem Ringbruch, wobei das Übrigbleiben eines Restes mit 4 C-Atomen ca. 6mal wahrscheinlicher ist als der Bruch in der Mitte des Benzolkerns, und dieser wieder etwa doppelt so wahrscheinlich wie das Herausbrechen nur eines C-Atoms. Weiter – und dies erscheint für allgemeine strahlenbiologische Betrachtungen ebenfalls bedeutungsvoll – sind Dehydrierungen neben oder mit Ringbrüchen möglich, wobei dieselben bis zur Abspaltung sämtlicher H-Atome gehen können.

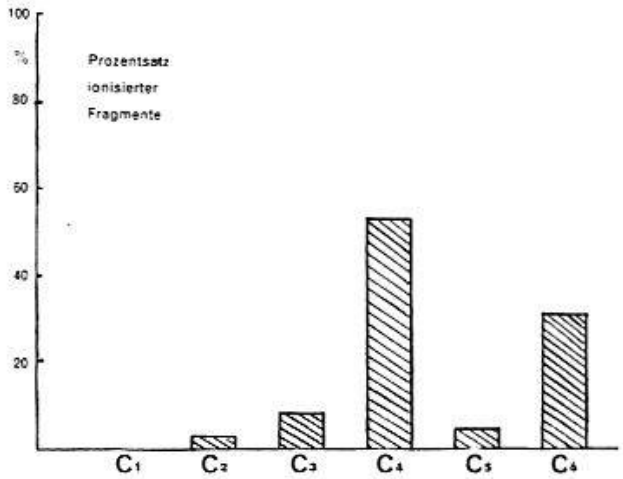


Abb. 1. Relative Häufigkeit der ionisierten Molekularfragmente aus Benzol nach Stoß durch 72 eV-Elektronen.

Zusammen mit den schon früher besprochenen Verhältnissen (13, 14) verschiedener Isomeren des Oktans und den Spaltprodukten des Butans ergibt sich aus diesen Versuchen mit aller wünschbaren Deutlichkeit, daß die primären Folgen einer Ionisation durch Elektronenstoß schon bei einfachen Molekülen äußerst vielseitig sind, und die hierbei auftretenden Dissoziationsprodukte überhaupt alle möglichen Spaltprodukte umfassen, wobei naturgemäß einzelne bedeutend wahrscheinlicher sind als andere.

Von allen chemisch einfachen Stoffen nimmt das Wasser in allen biologischen Systemen eine ausgesprochene Vorzugsstellung ein. Es ist zum mindesten der Menge nach der weitaus wichtigste biologische Aufbaustoff. Seine Bedeutung für das tiefere Verständnis der biologischen Strahlenwirkungen geht aber schon aus der Tatsache hervor, daß etwa $^4/_5$ aller physikalischen Primärereignisse der Strahlenschwächung bei Wirbeltieren und beim Menschen an Wassermolekülen stattfinden müssen. Es kommt deshalb ohne Zweifel auch den primären Reaktionsprodukten des Wassers für alle biologischen Strahlenwirkungen eine fundamentale Bedeutung zu.

Tabelle 3
Ionisierte Spaltprodukte des Wassers bei Elektronenstoß

Ionenart	Wahrscheinlicher Prozeß	eV Appearence-Potential
H_2O^+	$H_2O \rightarrow H_2O^+ + e$	$13{,}0 \pm 0{,}2$
OH^+	$H_2O \rightarrow H + OH^+ + e$	$18{,}7 \pm 0{,}2$
O^+	$H_2O \rightarrow H_2 + O^+ + e$	$18{,}8 \pm 0{,}5$
	$H_2O \rightarrow 2H + O^+ + e$	$28{,}1 \pm 0{,}1$
H_3O^+	$(H_2O + H^+ \rightarrow H_3O^+)$?	$13{,}8 \pm 0{,}5$
H^+	$H_2O \rightarrow OH + H^+ + e$	$19{,}5 \pm 0{,}2$
H_2^+	$H_2O \rightarrow O + H_2^+ + e$	$23{,}0 \pm 2{,}0$
H^-	$H_2O \rightarrow OH + H^-$	$5{,}6 \pm 0{,}5$
	$H_2O \rightarrow O + H + H^-$	$8{,}5 \pm 1{,}0$
O^-	$H_2O \rightarrow 2H + O^-$	$7{,}5 \pm 0{,}3$
	$H_2O \rightarrow H + H^+ + O^- + e$	$23{,}7 \pm 0{,}5$
	$H_2O \rightarrow H^+ + H^+ + O^- + 2e$	$36{,}0 \pm 3{,}0$

Tabelle 3 zeigt die bei Elektronenstoß im Massespektrometer nachweisbaren ionisierten Produkte des Wassers mit den wahrscheinlichsten Reaktionsverläufen und den entsprechenden Appearence-Potentialen nach *Mann*, *Hustrulid* und *Tate* (10).

In kondensierten Systemen sind die Schwächungsvorgänge ionisierender Strahlungen zunächst gewiß nicht grundsätzlich anderer Natur als in Gasen, wie die Unabhängigkeit der Masseschwächungskoeffizienten

vom Aggregatzustand und die elektrischen Leitfähigkeitsverhältnisse bestrahlter fester oder flüssiger Isolatoren beweisen (9). Demgegenüber werden aber die primären Reaktionsprodukte, welche auf die Ionisations- und Anregungsakte unmittelbar folgen, mit Gewißheit durch die viel höhere Stoffdichte und die unmittelbare Umgebung und die parakristalline Anordnung der Moleküle in einer Flüssigkeit oder einem Gel vorgeschrieben. Die Folgereaktionen betreffen nicht mehr Einzelmoleküle oder Einzelatome, sondern in jedem Fall größere Stoffaggregationen von der Größenordnung von 10–100 Atom-Durchmesser Ausdehnung (12). Innerhalb solcher Teilräume wird die Energie demjenigen Teilsystem zugeleitet (teilweise sicher elektronisch, Fluoreszenz), welches für ihre Aufnahme die günstigsten Verhältnisse (Resonanz) aufweist, und welches bezüglich seiner Häufigkeit auch entsprechend bevorzugt sein muß. Man bedenke, daß im Mittel von 1000 Atomen des menschlichen Körpers, deren 630 auf Wasserstoff, 255 auf Sauerstoff, 95 auf Kohlenstoff, noch 14 auf Stickstoff und schließlich nur noch etwa 6 auf alle übrigen Elemente entfallen. Dabei sind weitaus die meisten Sauerstoffatome mit Wasserstoff verbunden, und deshalb kommt den Reaktionsprodukten des Wassers auch schon rein zahlenmäßig eine weit überwiegende Bedeutung zu.

Aus der vorstehenden Tabelle 3 ergeben sich als neutrale Reaktionsprodukte mit größerer Lebensdauer ($\tau > 10^{-6}$ sec.) freie H-Atome und OH-Radikale, resp. bei Gegenwart von Sauerstoff H und O_2H. Diese führen über exotherme Rekombinationen unter sich zu stabilen Endprodukten:

$$2H \rightarrow H_2 + 4{,}48 \text{ eV}$$
$$2OH \rightarrow H_2O_2 + 2{,}6 \text{ eV}$$
$$2OH \rightarrow H_2O + \tfrac{1}{2}O_2 + 0{,}78 \text{ eV}$$
$$H + OH \rightarrow H_2O + 5{,}13 \text{ eV}$$
$$2O_2H \rightarrow H_2O_2 + O_2 + ?$$

In der Intermediärzeit bis zur eventuellen Rekombination und bei Gegenwart eines veränderbaren Systems sind die obgenannten langlebigen Produkte sehr kräftige Reduktions- resp. Oxydationsmittel, wie z. B. die bekannten Strahlenaktionen,

$$Ce^{++++} + H \rightarrow Ce^{+++} + H^{+} \quad \textit{Reduktion}$$
$$Fe^{++} + OH \rightarrow Fe^{+++} + OH^{-} \quad \textit{Oxydation}$$

zeigen.

Mit dieser «Radikaltheorie» (*Weiss* [1944]) stehen die wichtigsten experimentellen Befunde an definierten, wässerigen Systemen nirgends im Widerspruch. Diese sind:

1. *Der Konzentrationseffekt* (*Fricke*, *Risse*), d. h. die weitgehende Unabhängigkeit der absoluten Ausbeute der Strahlenreaktion von der

Konzentration der reagierenden Substanz (z. B.: $Fe^{++} \longrightarrow Fe^{+++}$ zwischen n/5 und n/25 000).

2. Der *Schutzeffekt* (*Dale, Minder, Hart*), d. h. die mitunter sehr starke Änderung der Ausbeute einer bestimmten Reaktion bei Gegenwart von Lösungsgenossen, die an der beobachteten Reaktion nicht unmittelbar beteiligt sind (z. B. $C_6H_4Cl_2 \longrightarrow HCl$ bei Gegenwart von Äther).

3. Der *Phaseneffekt* (*Duane, Günther, Minder*), d. h. das völlige oder fast völlige Ausbleiben der in einem flüssigen System beobachteten Reaktion beim Übergang in die feste Phase (z. B. $Fe^{++} \longrightarrow Fe^{+++}$ in H_2O, $CHBr_3 \longrightarrow Br$).

Die quantitative Ausbeute strahlenchemischer Reaktionen kann ausgedrückt werden in der sogenannten *Ionenausbeute*

$$\frac{M}{N} = \frac{\text{Moleküle}}{32{,}5\ \text{eV}},$$

oder durch den G-Wert (*Burton*), bei dem die Zahl der umgesetzten Moleküle auf 100 eV aufgenommene Strahlenenergie bezogen wird. Diese Zahlengrößen sind bei verschiedenen bekannten Strahlenreaktionen sehr unterschiedlich, wie Tabelle 4 zeigt:

Tabelle 4
Ionenausbeuten einiger gutbekannter Strahlenreaktionen

Reaktion	M/N	Energie pro Umsatz eV
a) wässerige Systeme		
$Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++}$	5	6,5
$MnO_4 \rightarrow MnO_2$	3	10,8
$Ce^{++++} \rightarrow Ce^{+++}$	2	16,2
$H_2O + O \rightarrow H_2O_2$	0,56	58,0
$CHCl_3 \rightarrow Cl^-$	12,2	2,7
$CCl_4 \rightarrow Cl^-$	1,1	29,5
$C_6H_5Cl \rightarrow Cl^-$	0,18	180
$p-C_6H_4Cl_2 \rightarrow Cl^-$	0,27	120
$C_6Cl_6 \rightarrow Cl^-$	0,015	2165
$NH_2(CH_2)_2SH \rightarrow H_2S$	2,5	13,0
$CH_2SHCHNH_2COOH \rightarrow H_2S$	1,2	27,1
$CH_2NH_2COOH \rightarrow NH_3$	0,7	46,4
Methylenblau → Entf.	0,041	793
Eosin → Entf.	0,14	232
b) nicht-wässerige Systeme		
$C_6H_6 + Br \rightarrow C_6H_5Br$	7,8	4,2
$CHBr_3 \rightarrow Br$	$<0{,}01$	>3250
$C_6H_6 \rightarrow H_2$	0,035	1077
DDT in Alk. $\rightarrow Cl^-$	1,3	25,0
C_2Cl_6 in Alk. $\rightarrow Cl^-$	1,0	32,5
$C_6H_6Cl_6$ in Alk. $\rightarrow Cl^-$	0,475	68,5

Es lassen sich in dieser keineswegs vollständigen Tabelle ohne besondere Willkür deutlich 3 Gruppen von strahlenchemischen Reaktionen unterscheiden, nämlich eine solche mit einer Ionenausbeute bis zu etwa der Hälfte der Ionisationsarbeit der Luft W = 32,5 eV, ferner eine Gruppe, bei der die zur Reaktion notwendige Energie annähernd der Größe W entspricht, und schließlich eine Gruppe mit viel größerem Energieaufwand pro Einzelreaktion.

Die erste Gruppe umfaßt offenbar Reaktionen, bei denen auch schon Anregungen des Systems (Dispersionsmittel und Reagens) zur Reaktion Anlaß geben, während in der zweiten Gruppe höchstwahrscheinlich die Ionisationen allein für den Umsatz maßgeblich sind. In der dritten Gruppe sind endlich diejenigen Reaktionen enthalten, bei denen das beobachtete Reaktionsprodukt das Ergebnis eines komplizierteren Umsatzes ist, und wobei andere, von der Beobachtung nicht erfaßte Vorgänge ebenso wahrscheinlich, oder wahrscheinlicher sind, als der beobachtete. Zwei Beispiele mögen diese mehrfach möglichen Reaktionen erläutern: die Aminosäure Tyrosin spaltet bei Bestrahlung NH_3 ab. Die Ionenausbeute dieser Reaktion ist etwa $\frac{M}{N} = 0{,}2$ (*Barron*). An-

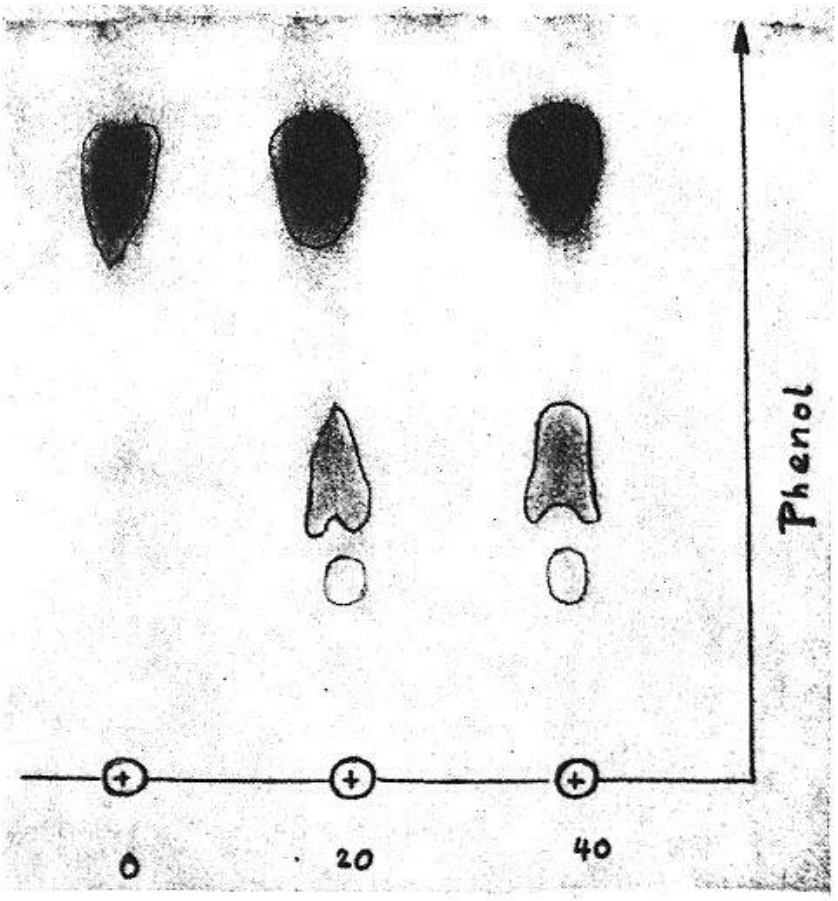


Abb. 2. Bildung von Abbauprodukten aus Dijodtyrosin nach Bestrahlung mit Röntgenstrahlen. 0 = unbestrahlte Kontrolle; 20, 40 = 20 bzw. 40 Minuten Bestrahlungszeit mit einer Dosisleistung von ca. 50 000 r/min.

dere Reaktionen sind bisher nicht bekannt geworden. Iodiert man die Verbindung mit J^{131}, so läßt sich die Jodspaltung resp. der Anteil der jodhaltigen Abbauprodukte nachweisen. Abb. 2 zeigt das Chromatogramm nach Bestrahlung. Es ist ziemlich eindrucksvoll, daß neben der NH_3-Bildung noch mindestens 2 Produkte entstehen, von denen das eine als niederpolymere Verbindung und das andere wahrscheinlich als Jodkresol anzusprechen ist.

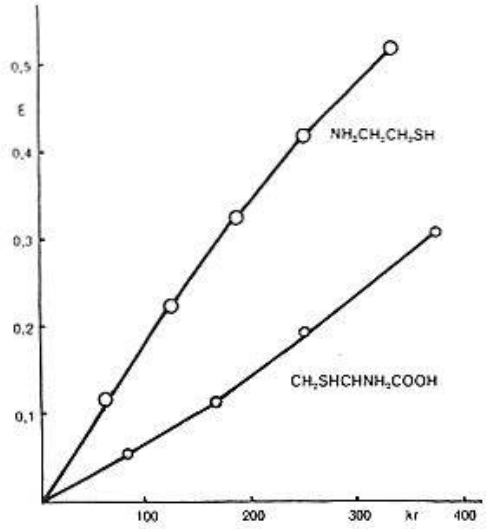


Abb. 3. Bildung von H_2S aus β-Merkaptoäthyamin und Cystein nach Röntgenbestrahlung.

Das andere Beispiel soll durch die Abb. 3 veranschaulicht werden. Cystein ist die bekannteste SH-haltige Substanz, welche im Tierversuch vor der Bestrahlung dem Objekt zugeführt, einen teilweisen Schutz gegen die letalen Einflüsse (Verlängerung der Überlebenszeit) bewirkt. Diese Schutzwirkung ist auf die Oxydation der SH-Gruppe durch die OH-Radikale und damit auf eine Verminderung der Zahl derselben zurückgeführt worden.

$$2R-SH+2OH \rightarrow R-S-S-R+2H_2O$$

Dale und andere haben aber nachgewiesen, daß Cystein[1] und Glutathion in wässeriger Lösung nicht in erster Linie in obigem Sinne durch Strahlen oxydiert werden, sondern daß besonders eine H_2S-Abspaltung, also eine Reduktion der Verbindungen stattfindet. Eine Schutzwirkung auf obgenanntem Mechanismus beruhend, ist also recht unwahrscheinlich.

Unsere eigenen Versuche an Cystein und β-Merkaptoäthylamin

[1] Nach unsern neuesten Versuchen spaltet sehr reines Cystein wahrscheinlich keinen H_2S ab.

(vgl. Tab. 4) sind in Abb. 3 wiedergegeben. Offenbar verläuft die Reduktion grundsätzlich nach dem Schema

$$R-SH+H \rightarrow -R+H_2S$$

Es ist nun sehr auffallend, daß die Ionenausbeuten der beiden Stoffe sich annähernd wie 2:1 verhalten, d. h. daß die H_2S-Menge, welche durch Röntgenstrahlen aus $NH_2(CH_2)_2SH$ freigesetzt wird, ziemlich genau doppelt so groß ist wie diejenige bei Cystein. Eine Erklärung dieser Tatsache kann auf Grund des Vorstehenden relativ leicht gefunden werden.

Die H_2S-Bildung erfordert die Abspaltung der ganzen Sulfhydrilgruppe aus der Verbindung. Diese Reaktion ist offenbar im β-Merkaptoäthylamin-Molekül die wahrscheinlichste Dissoziation bei Energiezufuhr, während bei Cystein eine Abtrennung der Carboxylgruppe ebenso wahrscheinlich ist (3gliedrige Kohlenstoffkette, bei welcher eine Bruchstelle nicht zu einem SH-haltigen Bruchstück führt, während bei der 2gliedrigen Kette jeder Bruch zur Bildung eines SH-haltigen Fragmentes Anlaß gibt).

Derartige oder ähnliche Beispiele könnten beliebig vermehrt werden. In den weitaus meisten Fällen sind die primären Reaktionsprodukte der Bestrahlung von Systemen mit komplizierterer chemischer Zusammensetzung Abbauprodukte, die Bestrahlung äußert sich in erster Linie in Molekülspaltungen, in Depolymerisationen also, wobei die stabilen Endprodukte meist relativ einfacher Natur sind. Dies gilt sowohl für relativ kleine, als ganz besonders für große Moleküle, wie sie in den Stoffumsätzen der lebenden Substanz von grundsätzlicher Bedeutung sind. Einige der niederpolymeren Endprodukte der Strahlenreaktionen organischer Moleküle sind ausgesprochene Gifte, wie z. B. H_2O_2, C_2H_2, CH_4, NH_3, SO_2, H_2S, H_2CO. Je größer ein Molekül aber ist, desto «unspezi-

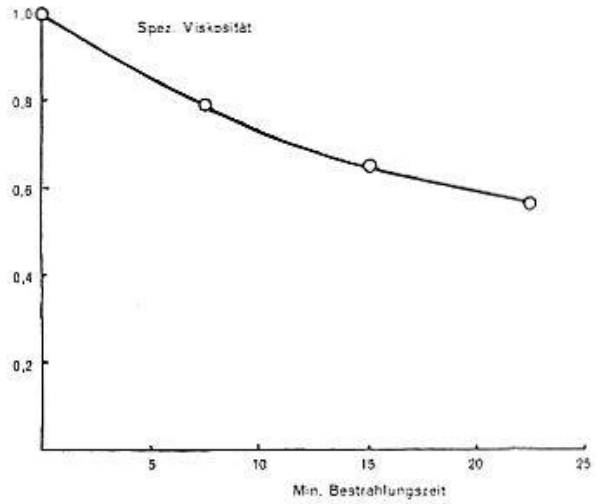
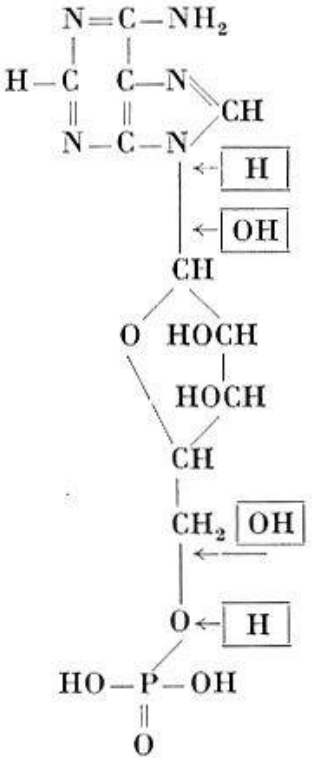


Abb. 4. Abnahme der spez. Viskosität wässeriger Lösungen von Desoxyribonucleinsäure bei Röntgenbestrahlung. Dosisleistung ca. 2000 r/min.

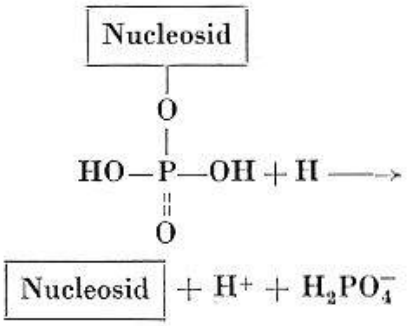
fischer» wird der Strahleneinfluß, d. h. desto mehr Möglichkeiten bestehen für Reaktionen verschiedenster Art, und desto unwahrscheinlicher wird auch eine bestimmte Strahlenaktion.

Schließlich soll in diesem Zusammenhang auch noch eine Versuchsreihe Erwähnung finden, die die Möglichkeit von tieferen Einblicken in den Mechanismus der Strahlenwirkung auf biologische Systeme erlaubt. Abb. 4 zeigt die Abnahme der spez. Viskosität von Lösungen von Desoxyribose-Nucleinsäure (Na-Salz) bei Röntgenbestrahlung nach *Wegmüller* (17). Dieselbe sinkt nach ca. 50 000 r auf etwa die Hälfte ab. Es findet demnach schon bei relativ geringen Strahlendosen eine weitgehende Depolymerisation dieses biologisch eminent wichtigen Makro-Moleküls in wässeriger Lösung statt, und gerade an diesem Beispiel kann die Wirkung der Strahlenprodukte des Wassers sehr schön demonstriert werden:



Adenylsäure

zum Beispiel:



Neben freier Säure entstehen aber bei Bestrahlung von Nucleinsäuren auch NH_3 und wahrscheinlich in geringer Menge CO, als Beweis dafür, daß sowohl der stickstoffhaltige Kern als auch der Zuckeranteil zusätzlich innere Depolymerisationen erleiden.

Die «biologischen» Primäreffekte bei Strahlenreaktionen biologischer Systeme können zurzeit in ihren Einzelheiten noch nicht überblickt werden, trotzdem die Einsicht in dieselben heute eine viel tiefere ist, als noch vor wenigen Jahren. Es darf aber jetzt schon als sicher ange-

nommen werden, daß dieselben wesentlich relativ einfacher chemischer Natur sind und ohne Zweifel zum überwiegenden Teil im Abbau hochpolymerer Stoffe bestehen. Dieser Abbau erfolgt zu einem geringen Teil durch die Strahlenenergie direkt, zum überwiegenden Teil aber durch chemisch hoch reaktionsfähige, niederatomige Reaktionsprodukte vorwiegend des Wassers. Es gibt keine spezifischen Strahlenreaktionen, sondern die besondern Reaktionen einer besondern biologisch bedeutsamen Verbindung erfolgen nach den Gesetzmäßigkeiten der Struktur und der Verteilung der aufgenommenen Energie im betroffenen Molekül und auf chemisch prädestinierten Wegen. Die Zahl der bei hochpolymeren Substanzen möglichen Reaktionen und Reaktionsprodukte ist Legion. Welcher Reaktionsverlauf und welches Produkt im Einzelfall für das *Endergebnis* am wichtigsten ist, hängt von den besonderen morphologischen, physiologischen und strukturellen Verhältnissen ab, und das Endergebnis selbst ist das Resultat einer langen Kette von Reaktionen (Gegenwirkungen) des Objekts auf den durch die Strahlung molekular veränderten Zustand, Reaktionen, die meist in ihrer Form, ihrem Ausmaß und ihrer allgemeinen Bedeutung für das Gesamtobjekt durch das besondere betroffene System selbst weitgehend determiniert sind. Deshalb gibt es auch keine morphologischen oder physiologischen spezifischen Strahlenreaktionen und deshalb sind die Einblicke in die tieferen Zusammenhänge trotz dem äußerst umfangreichen Erfahrungsmaterial auch so schwierig.

Résumé

Quoique nos connaissances soient aujourd'hui beaucoup plus avancées qu'il y a quelques années, nous ne pouvons pas encore expliquer par le détail les réactions primaires «biologiques» de systèmes biologiques soumis à des irradiations. On peut toutefois considérer comme à peu près sûr, que ces réactions biologiques sont pour la plupart des réactions chimiques de nature assez simple, et qu'elles consistent surtout en désintégrations de substances hautement polymérisées. Ces désintégrations se font pour une petite partie sous l'action directe de l'énergie d'irradiation, pour la plus grande partie cependant sous l'action de produits à petit nombre d'atomes, mais chimiquement à fort potentiel réactif, surtout à partir d'eau. Il n'y a pas de réactions spécifiques d'irradiation, mais les réactions propres d'une molécule biologiquement importante se font selon des règles déterminées, en relation directe avec la forme, l'intensité et la quantité d'énergie reçue par irradiation. Le nombre des combinaisons possibles avec des substances hautement polymérisées est énorme. Cependant la marche de la réaction et la nature du produit ter-

minal prévu dans un cas particulier, dépendent des conditions morphologiques, physiologiques et structurelles particulières, et le *résultat final* est l'aboutissement d'une longue série de réactions (et de répercussions) de l'objet considéré vis-à-vis de l'état structurel modifié de ses molécules par l'irradiation; ces réactions sont toutefois caractéristiques dans leur forme, leur importance et leur rapidité pour un système donné. C'est pour cela que l'on ne peut parler de réaction spécifique morphologique ou physiologique des irradiations et c'est pour cela encore que les explications des modifications intimes de la matière vivante sont si difficiles, malgré l'immense matériel d'expérimentation dont on dispose.

Riassunto

Gli effetti primari «biologici» delle reazioni di sistemi biologici alle irradiazioni non sono ancora noti per il momento nei loro particolari, quantunque le nostre conoscenze in merito siano oggi ben più profonde che alcuni anni fa. Già fin d'ora è però praticamente sicuro che questi effetti siano di natura chimica relativamente semplice e consistano per lo più nella disgregazione di sostanze altamente polimeriche. Questa disgregazione avviene solo per una piccola parte direttamente mediante l'energia dei raggi, in gran parte invece grazie a prodotti di reazione, specialmente dell'acqua, a piccoli atomi e chimicamente molto attivi. Non esistono reazioni specifiche alle irradiazioni, ma le reazioni caratteristiche di una data sostanza biologicamente importante si sviluppano chimicamente in modo predestinato e secondo regole definite, dovute alla sua struttura e alla distribuzione dell'energia assorbita nella molecola. Le reazioni e i prodotti di reazione possibili con sostanze altamente polimeriche sono innumerevoli. Quale decorso della reazione e quale prodotto nel caso particolare sia più importante per il *risultato finale*, dipende dalle speciali condizioni morfologiche, fisiologiche e strutturali, e il risultato finale stesso è la conseguenza di una lunga catena di reazioni dell'oggetto al nuovo stato molecolare, formatosi in seguito alla irradiazione. In generale queste reazioni sono in gran parte determinate dalle caratteristiche del sistema medesimo, per quanto riguarda la forma, le proporzioni e l'importanza generale per la totalità dell'oggetto. Perciò non esistono reazioni alle irradiazioni morfologiche o fisiologiche specifiche, e, nonostante la già enorme esperienza accumulata, lo studio di questi meccanismi nei loro particolari è talmente difficile.

Summary

The «biological» primary effects of radiation reactions of biological systems can not as yet be surveyed in all details, although our insight

into these phenomena is much deeper than it was a few years ago. It can, however, now be assumed with a high degree of certainty that they are of relatively simple chemical nature, and doubtless to the greater part consist of the destruction of highly polymerised substances. These destructions result to a small part directly from radiation energy and to a greater part from chemically highly reactive reaction products mostly of water of small atomic composition. There are no specific radiation reactions, but the special reaction of a biologically important compound depends upon the laws of the structure and the distribution of the energy taken up by the molecules involved and upon chemically predestined ways. The number of possible reactions and reaction products is enormous. Which reaction occurs in each case and which products are most important for the *endresult* depend upon the particular morphological, physiological and structural conditions, and the endresult itself is the result of long chain of reactions (counterreactions) of the object on the molecular conditions, which have been changed by the radiation. These reactions are largely determined in form, extent and general significance for the whole object, by the particular system involved. Thus, there are also no morphological or physiological specific radiation reactions, and thus the insight in the deeper correlations is so difficult inspite of the extremely wide material available.

1. *Barron, E. S.:* Rad. Res. **1,** 109 (1954). – 2. *Burton, J.:* Disc. Faraday Soc. Leeds (1953). – 3. *Dale, W. M.:* Brit. J. Rad. Suppl. 1 (1947). – 4. *Duane, W.*, und *Scheurer, O.:* Le Radium **10,** 33 (1913). – 5. *Fricke, H.*, und *Morse, S.:* Americ. J. Röntg. **18,** 426 (1927). – 6. *Günther, P.*, und *Holzapfel, E.:* Z. phys. Chem. B. **42,** 346 (1939). – 7. *Hart: F.:* Disc. Faraday Soc. Leeds (1953). – 8. *Hustrulid, A., Kusch, J.*, und *Tate, J. T.:* Phys. Rev. **54,** 1037 (1938). – 9. *Liechti, A.*, und *Minder, W.:* Röntgenphysik, 2. Aufl. Springer 1955. – 10. *Mann, A. K., Hustrulid, A.*, und *Tate, J. T.:* Phys. Rev. **58,** 340 (1940). – 11. *Minder, W.*, und *Liechti, A.:* Exper. 2; **2,** 410 (1946). – 12. *Minder, W.*, Brit. J. Rad. **26,** 146 (1951). – 13. *Minder, W.:* Schweiz. ApothZtg. **93,** 204 (1955). – 14. *Minder, W.:* Mitt. Lebensmitt. **46,** 76 (1955). – 15. *Mullis, A., Minder, W.*, und *Liechti, A.:* Radiol. clin. (Basel) **15,** 295 (1946). – 16. *Risse, O.:* Ergebn. Physiol. **43,** 242 (1928). – 17. *Wegmüller, F.:* Diss. phil. II, Bern (1942). – 18. *Weiss, J.:* Nature **153,** 748 (1944).