

Strahlungsquellen für Forschung und Industrie

Von F. MÜNZEL

INRESOR – Internationale Forschungs-Gesellschaft, Schwerzenbach (Schweiz)

In der vorliegenden Abhandlung soll über Quellen gesprochen werden, die ionisierende Strahlung erzeugen und heute in der Forschung und Technik auf den Gebieten der Strahlungschemie, der Lebensmittelkonservierung und der Sterilisation Anwendung finden. Dabei werden einerseits radioaktive Quellen, die z. B. als Strahler Kobalt-60, Cäsium-137 oder Strontium-90 enthalten, und andererseits elektrische Anlagen zur Erzeugung energiereicher Strahlen besprochen werden. Was die letzteren anbetrifft, interessieren hier vor allem die Anlagen zur Erzeugung beschleunigter Elektronen.

Ausgefallene Quellen auf dem Gebiete der Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung sowie große, energiereichere Maschinen, die nur der Erforschung atomarer Teilchen dienen, müssen hier unerwähnt bleiben. Für Anlagen, die der industriellen Bestrahlung von Verbrauchsgütern dienen sollen, ergibt sich überdies eine natürliche Abgrenzung dadurch, daß Teilchenenergien über 7 bis 8 Millionen Elektronvolt Kernumwandlungsprozesse auslösen und unerwünschte Radioaktivität im Substrat zu erzeugen vermögen.

Die gegebene Darstellung kann im vorliegenden Umfang auch keine lückenlose Aufzählung und Beschreibung aller bekannten Quellenarten sein. Sie zielt, neben der Beschreibung der wichtigsten Quellen, vor allem darauf hin, einen Beitrag zur Beantwortung der grundlegenden Frage zu geben, inwieweit von Substrat und Zielsetzung her der Einsatz von Isotopenquellen einerseits, bzw. von elektrischen Strahlungserzeugungs- und Beschleunigungsanlagen andererseits, beeinflußt wird.

Ganz am Rande werden auch die sich heute abzeichnenden technischen Möglichkeiten und ökonomische Fragen der Strahlungsanwendung berührt werden.

1. Radioaktive Quellen

1.1. Reaktoren

Die direkte Verwendung der Strahlung eines Reaktors für Bestrahlungszwecke ist, der heterogenen Natur der im Reaktor erzeugten Strahlung wegen, wenig zweckmäßig. Neben den erwünschten Gammastrahlen treten hier außerdem stets Neutronen breiter Energieverteilung auf. Diese reagieren mit zu (n, γ) -Reaktionen befähigten Elementen im Behandlungsgut und führen so zu unerwünschter Radioaktivierung.

Dieser Schwierigkeit versucht man durch spezielle Reaktorkonstruktionen zu begegnen. Hier ist vor allem das in Amerika entwickelte Prinzip zu nennen, einen Reaktor neben der Wärme und Energieerzeugung zu einer Großbestrahlungsanlage auszubauen, indem in speziellen Umlaufsystemen aktivierbare Kühlflüssigkeiten, wie z. B. Natrium, nach der Aktivierung im Reaktor außerhalb desselben als Quelle verwendet werden. Das dieser Idee zugrundeliegende Prinzip ist aus Abb. 1 erkenntlich.

Dieses Prinzip erfordert jedoch neben der enormen Investition für den Reaktor zusätzliche und kostspielige Schutzmaßnahmen in Zusammenhang mit der umgepumpten, als Strahler verwendeten Kühlflüssigkeit. Ein weiteres Problem ist dadurch gegeben, daß hier lang-

Tabelle 1. Radioisotope, die in Strahlungsquellen Verwendung finden

Isotope	Halbwertszeit	Art und Energie hauptsächlichster Strahlen (in MeV)	Ungefähre Kosten pro Curie (in Dollar)
<i>Natürliche Isotope:</i>			
Polonium-210	138 Tage	α , 5,304 (100%) γ , 0,8 (0,0012%)	150
Radium-226	1620 Jahre	α , 4,777 (94,3%) α , 4,589 (5,7%) γ , 0,188 (4,0%)	20000
Radon-222	3,83 Tage	α , 5,49	—
<i>Künstliche Isotope:</i>			
Cäsium-137	30 Jahre	β , 1,18 (max.) (8%) β , 0,52 (max.) (92%) γ , 0,6616 (82%)	5
Kobalt-60	5,27 Jahre	β , 0,314 (max.) γ , 1,332 γ , 1,173	1–4
Wasserstoff-3 (Tritium)	12,26 Jahre	β , 0,018 (max.)	7–30
Phosphor-32	14,22 Tage	β , 1,710 (max.)	0,70
Strontium-90	28 Jahre	β , 0,544 (max.)	7,50
Yttrium-90	64 Std.	β , 2,25 (max.)	0,93
Schwefel-35	87,2 Tage	β , 0,167 (max.)	1,50

und kurzlebige Isotope entstehen und die Strahlungsintensität nur schwer in ein konstantes Gleichgewicht zu bringen ist.

Daneben sind einige spezielle Reaktor-Verwendungen zur Auslösung chemischer Reaktionen bekannt geworden. Zu nennen wäre hier der luftgekühlte Uran-235-Reaktor von HARTECK und DONDES¹ und von COEKELBERG² zur

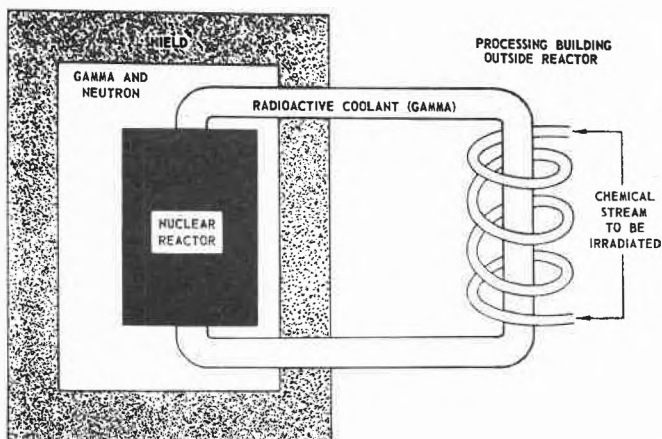


Abb. 1. Schema eines Reaktors, dessen aktivierbare Kühlflüssigkeit nach Aktivierung im Reaktor außerhalb desselben für Bestrahlung Verwendung findet (R. I. LEININGER, *Atomic Energy and Chemical Reaction*, *Battelle Techn. Rev.* 6 [1957] 3)

Herstellung von nitrosen Gasen aus Luft und der Versuch von DAWSON und MOSELEY³, Fission-Recoil-Fragment-Energie in einem mit Wassergas gekühlten Normalreaktor zur Erzeugung von Formaldehyd auszunutzen.

Nach dem heutigen Stand der Technik hat der Reaktor, neben seiner primären Bedeutung als Energiequelle, bezüglich der Bestrahlungstechnik jedoch vor allem Wichtigkeit als Hilfsmittel zur Produktion radioaktiver Isotope. Diese fallen in Form ausgekühlter Brennelemente oder mehr oder weniger reiner Isotope an, die aus Brennelementen oder Bremsmaterial isoliert werden. Die bekanntesten auf diese Weise gewonnenen Isotopenstrahler sind die bereits erwähnten Strontium-90, Cäsium-137 und Kobalt-60. In Tabelle 1 sind die wesentlichsten der bekannten natürlichen und künstlichen Radioisotope zusammengestellt.

Es ist aus dieser Zusammenstellung ersichtlich, daß die drei genannten Isotope wegen ihrer relativ langen Halbwertszeiten und ihrer günstigen Preise in erster Linie für Isotopenquellen in Frage kommen. Das billige, γ -Strahlen von 1,1/1,3 MeV liefernde Kobalt-60 wird in Form des Metalls in stahlenkapsulierten Pillen in den Handel gebracht. Es hat den Nachteil der relativ kurzen Halbwertszeit von nur 5,2 Jahren. Das gemischte β -, γ -Strahlen der Energie von 0,6 MeV abgebende Cäsium-137 wird als Sulfat oder Nitrat in Pillen oder Pulverform in Stahl eingeschlossen gehandelt. Es hat wohl einen höheren Einheitspreis als Kobalt-60, weist dafür jedoch

¹ P. HARTECK und S. DONDES, Fixation of Nitrogen by Ionizing Radiation as Nitrogen Dioxide and Nitrous Oxide, *J. Chem. Physics* 24 (1956) 619.

² A. COEKELBERG, A. CRUCQ, J. DECOT, A. FRENNET, G. LIÉNARD und L. TIMMERMANN, Catalyse sous irradiation en présence de solides non métalliques, *Proceedings of a Conference on Industrial Uses of Large Radiation Sources*, Salzburg, 27–31 May 1963, Vol. 2, International Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 3–23.

³ C. G. EDWARDS und F. MOSELEY, *The Production of Chemicals from Reactors: I. The Fixation of Atmospheric Nitrogen by Fission Fragments*, Atomic Energy Research Establishment, Harwell (Berks.), October 1958, Rep. AERE-C/R-2710.

eine rund 6 mal längere Halbwertszeit auf. Das β -Strahlen der Energie 0,6 MeV liefernde Strontium-90 kam erst neuerdings in den Handel. Es hat wohl eine relativ lange Halbwertszeit von 19 Jahren, sein Preis ist jedoch für die praktische Verwendung noch etwas zu hoch.

1.2. Isotopenquellen

Es ist unmöglich, im Rahmen dieser Zusammenfassung auf alle verfügbaren Isotopenquellen einzugehen. Es soll hier versucht werden, eine Auswahl der gebräuchlichsten Quellenkonstruktionen zu beschreiben, die heute in Forschung und Praxis Verwendung finden.

Als sehr handliches, wenn auch beschränktes Hilfsmittel für Laboratoriumsuntersuchungen haben sich die von einigen Firmen angebotenen, nicht freilegbaren Quellen bewährt. Es handelt sich hierbei im Prinzip um Quellen, in denen eine in ihren Maßen fixierte Bestrahlungskammer nach Beladung mechanisch in die Bestrahlungszone eingefahren wird. Der Isotopenstrahler ist heute noch in den meisten Fällen Kobalt-60, das in einem für den Umgebungsschutz genügenden Mantel fest montiert ist. Ein Beispiel für eine derartige Quelle stellt die «Gammacell 220» der Atomic Energy of Canada Ltd. dar, die in Abb. 2 gezeigt ist. Die Füllung derartiger Quellen ist in der Regel zwischen 1000 bis 30000 Curie.

Die Begrenzung dieser Bestrahlungsquellenart ergibt sich aus der Fixierung des Bestrahlungsraumes, die Änderungen der Intensität nur in sehr begrenztem Rahmen zuläßt. Der Preis derartiger Quellen bewegt sich zwischen 100000 bis 150000 Franken, je nach Beladung. Flexibler bezüglich der Änderung der Intensität erweisen sich freilegbare Isotopenquellen, die für Laboratoriumsver-

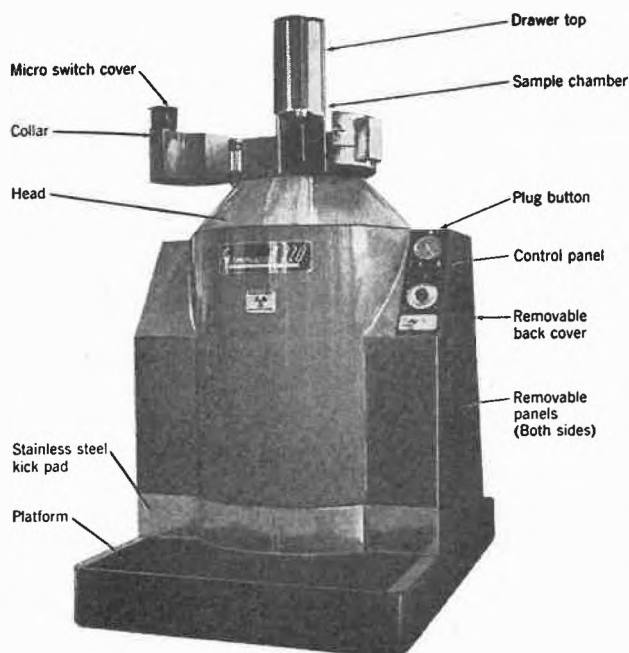


Abb. 2. Gammacell 220 der Atomic Energy of Canada Ltd.

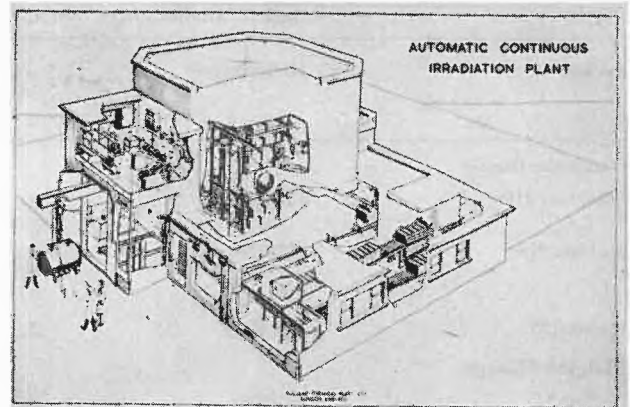


Abb. 3. Schnitt der Isotopenbestrahlungsanlage der Ethicon Ltd. in Edinburgh

wendung zum Teil von den Strahlenlaboratorien selbst gebaut bzw. von einer Anzahl Firmen kommerziell angeboten werden. Auch die heute im Betrieb stehenden kommerziellen Isotopenbestrahlungsquellen mit Beladungen bis zu 1000000 Curie sind alle freilegbare Quellen. Als Beispiel einer solchen Installation zeigen die Abbildungen 3 und 4 die stationäre Anlage, die 1963 von der Nuclear Chemical Plant Ltd. für die Ethicon Ltd. in Edinburgh aufgestellt wurde.

Die Quelle ist für eine maximale Kapazität von 150000 Curie Kobalt-60 konzipiert. Sie ist durch eine Normalbetonwand von 2,25 m abgeschirmt. Die speziellen Transporteinrichtungen, die Gesamtkonzeption und die Quellenanordnung sind aus den Darstellungen ersichtlich. Die Quelle selbst kann in Betonkammern versenkt und mit Blei abgedeckt werden, so daß der Bestrahlungsraum zu Servicearbeiten betretbar ist. Bei Quellenaustausch oder Erneuerung ist eine Versenkung der Quelle in Transportbehältern möglich. Die Anlage dient der Strahlensterilisation medizinischer Wegwerfartikel. Der Preis der Installation wird mit etwa 7000000 Franken angegeben. Die gleiche Gesellschaft betreibt daneben eine zweite 50000-Curie-Installation in Slough in Südengland.

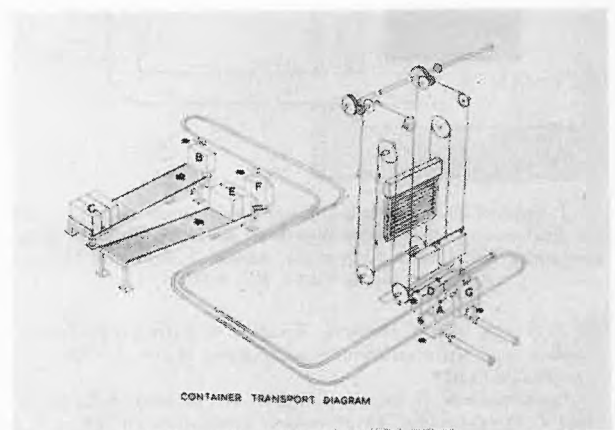


Abb. 4. Schematische Darstellung des Transportsystems der Isotopenbestrahlungsanlage der Ethicon Ltd. in Edinburgh

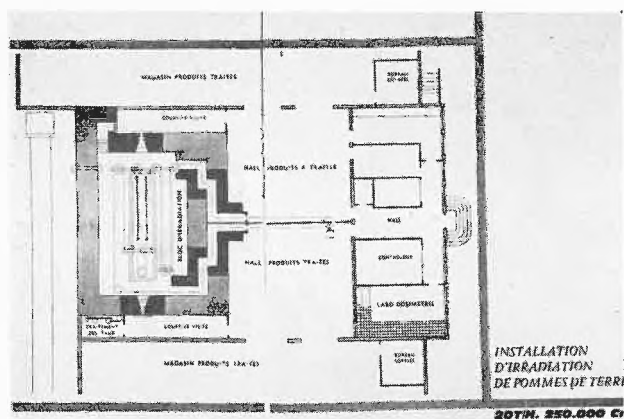


Abb. 5. Schema der Isotopenbestrahlungsanlage für Kartoffeln des Centre Lyonnais d'Applications Atomiques, Lyon

Als weiteres Beispiel einer stationären Quelle ist in Abb. 5 die Anlage des Centre Lyonnais d'Applications Atomiques gezeigt.

Sie ist für maximal 1000000 Curie Kobalt-60 geplant und operiert zurzeit mit 45000 Curie. Sie dient der Kartoffelbestrahlung zur Verminderung der Keimung während des Lagerns und erlaubt derzeit die Behandlung von etwa 3 bis 4 t/Std.

Eine interessante Entwicklung stellt die bewegliche Kartoffelbestrahlungsanlage der Atomic Energy of Canada Ltd. dar (vgl. Abb. 2 im Beitrag von H. MOHLER). Die Quelle enthält 18000 Curie Kobalt-60 und ist auf einem mit Zugmaschine beweglichen Wagen montiert. Innerhalb des feststehenden Schutzschildes aus Blei rotiert ein Innenzylinder, der total 4x2 Schachteln Kartoffeln um die stabförmige Quelle bewegt. Die Quelle vermag pro Stunde 1 t Kartoffeln zu bestrahlen. Während der ersten Kampagne im Winter 1961/62 hat die Quelle in Kanada etwa 6500 km zurückgelegt, und es wurden hierbei 350 t Kartoffeln mit Erfolg bestrahlt. Die Quelle wird samt Bedienungspersonal an Interessenten ausgeliehen.

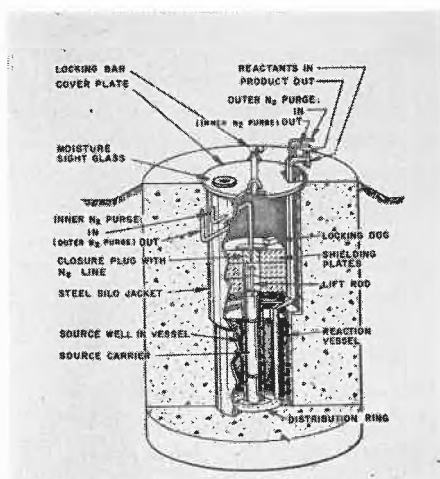


Abb. 6. Schema der Dow-Chemical-Äthylenbromidanlage

Als letztes Beispiel soll noch auf die Einrichtung der Dow Chemical Corporation zur Bromierung von Äthylen zu Äthylenbromid hingewiesen werden. Diese stellt eine erste Anwendung der Durchführung einer strahleninduzierten chemischen Reaktion dar. Der Aufbau der Anlage ist in Abb. 6 gezeigt.

Die Quelle enthält 1800 Curie Kobalt-60 und kann aus einem Betongehäuse in einen Reaktionskessel von etwa 200 l eingetaucht werden. Dabei kommt die Quelle selber nicht in Berührung mit den Reaktionsprodukten. Die Ausbeute beträgt 98 bis 100%. Die Reaktion verläuft kontinuierlich und wird bei Zimmertemperatur durchgeführt. Die Quelle benötigt jährlich einen Ersatz von Kobalt zum Preis von etwa 360 Dollar, was durchaus im Kostenbereich anderer Radikalkatalysatoren liegt. Dow erhält sehr reines Bromid, welches den Anforderungen für viele Zwecke direkt genügt. Die Herstellungskosten liegen in einem Bereich, der mit anderen Verfahren, die weniger gute Ausbeuten und weniger reine Endprodukte liefern, durchaus konkurrieren kann. Dow zeigt sich daher sehr optimistisch für direkte chemische Prozesse basierend auf Bestrahlungsinittierung.

1.3. Akzeleratoren

Die Diskussion der Teilchenbeschleuniger soll sich, wie eingangs erwähnt, auf die Elektronenakzeleratoren beschränken. Auch hier kann nicht auf alle Typen eingegangen werden. Es sollen anhand ausgewählter Beispiele die Charakteristika der wichtigsten Beschleunigerarten herausgestellt werden.

Für den industriellen Einsatz sind die gebräuchlichsten Typen: Der Van-de-Graaff-Akzelerator, der Kaskadenbeschleuniger, der Dynamitronbeschleuniger und der

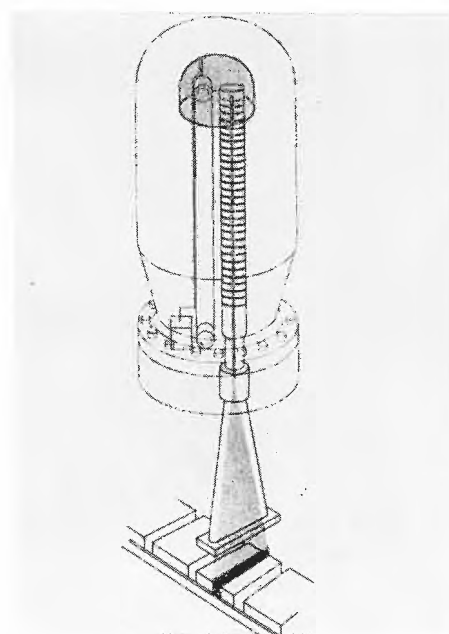


Abb. 7. Schema eines Van-de-Graaff-Akzelerators (mit angebaute Scanner)

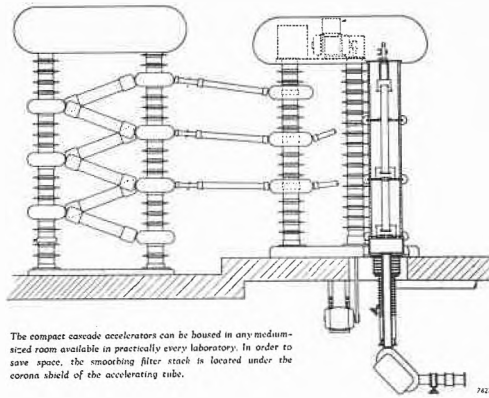


Abb. 8. Schema eines Kaskadenbeschleunigers

Insulated-Core-Transformator einerseits und die Linear-Akzeleratoren andererseits.

Die Anlagen der erstgenannten Gruppe beruhen auf dem Prinzip der Beschleunigung durch elektrostatische Felder. Die Unterschiede zwischen Van de Graaff, Kaskadenbeschleuniger, Dynamitronbeschleuniger und Insulated-Core-Transformator liegen in der Art des Aufbaues des elektrostatischen Beschleunigungsfeldes für die aus der allen gemeinsamen Elektronenkanone freigemachten Elektronen. Im Van-de-Graaff-Beschleuniger erfolgt der Aufbau des Beschleunigungsfeldes durch ein mechanisches Transportband, welches aufgespritzte Ladung auf der Oberfläche eines halbkugeligen Domes akkumuliert. Von dort fließt die Ladung über ein rohrförmiges Entladungssystem, in dessen Feld die in der Kanone freigemachten Elektronen beschleunigt werden, wie dies in Abb. 7 veranschaulicht ist.

Im Kaskadenbeschleuniger erfolgt die Beschleunigung der in der Elektronenkanone freigemachten Elektronen durch ein Hochspannungsfeld, welches mit einer Vervielfachungsschaltung nach GREINACHER aufgebaut wird, wie dies Abb. 8 zeigt.

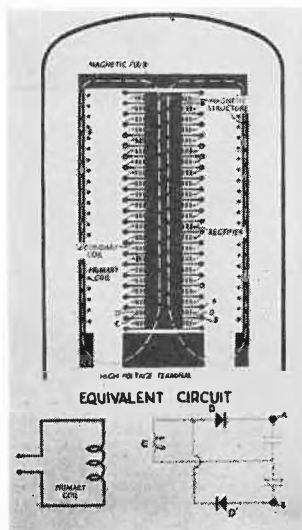


Abb. 9. Schema eines Linearakzelerators

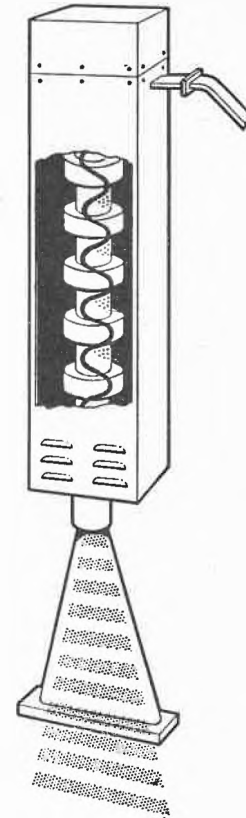


Abb. 10. Schnitt eines Insulated-Core-Transformators

Das Dynamitron stellt eine Abart des Kaskadenbeschleunigers dar. Es verwendet anstelle einer thermischen Elektronenkanone eine Hochfrequenzelektronenquelle.

Im Insulated-Core-Transformator werden die einer thermischen Elektronenkanone entnommenen Elektronen durch ein elektrostatisches Feld beschleunigt, welches durch einen Transformator aufgebaut wird, dessen Kern in voneinander isolierte Segmente aufgeteilt ist. Das Prinzip dieser Art des Aufbaues des Beschleunigungsfeldes ist in Abb. 9 gezeigt.

Für all diese Beschleunigertypen gibt es offene und in mit Kohlendioxyd, Stickstoff und Schwefelhexafluorid gefüllte Drucktanks eingebaute Ausführungen des Hochspannungssystems. Letzteren ist im praktischen Gebrauch der Vorrang zu geben, da die Drucktankauführungen raumsparender und überschlagsfrei sind.

Der Linearbeschleuniger unterscheidet sich prinzipiell dadurch von obigen Anlagen, daß die Beschleunigung der Elektronen nicht von einem elektrostatischen Feld, sondern mittels einer Radiofrequenzwelle erfolgt. Dieses Prinzip ist in Abb. 10 skizziert.

Alle diese Anlagen erzeugen einen Punktstrahl, der für technische Anwendung durch einen elektromagnetischen Wechselfeldscanner auf eine Strichfläche ausgedehnt werden muß. Der Aufbau eines Scanners ist aus der Abb. 7 ersichtlich. Die Beschleunigungsstrecke und die Scannereinrichtung müssen unter Hochvakuum von un-

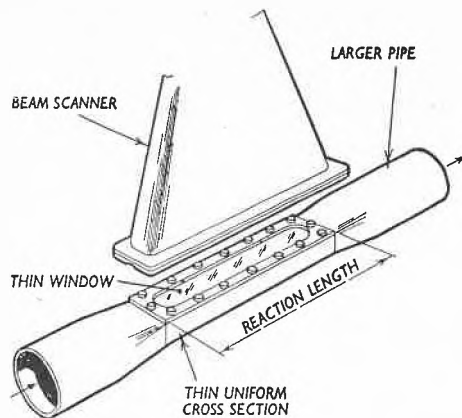


Abb. 11. Schematische Darstellung einer Flußbestrahlungsvorrichtung im Verbund mit dem Scanner eines Akzelerators

ter 10^{-6} mm stehen, um die Elektronenverluste durch Bremsung zu verringern. Zum Abschluß des Scanners ist ein gekühltes Austrittsfenster nötig. In der Regel finden heute dünne Aluminiumfolien bzw. Titanfolien als Fenstermaterialien Verwendung. Die Fensterfrage ist heute noch eines der kritischsten Probleme der Dauerbetriebsfähigkeit eines industriellen Akzelerators. Einerseits muß das Fenster des Hochvakuums wegen genügend stabil und andererseits für die Strahlung genügend durchlässig sein. Heute sind Scanner mit bis 1,20 m Breite bekannt, die den Strahl mit Frequenzen von 200 bis 3000 Hertz bewegen. Für die Durchstrahlung von Flüssigkeiten, wie Fruchtsäften, Milch oder ähnlichem, können mit dem Scannerfenster verbundene Durchlaufrohre benützt werden, wie dies Abb. 11 zeigt.

Die verschiedenen Akzeleratortypen unterscheiden sich aufgrund ihres Bauprinzips auch in der Flexibilität bezüglich der unabhängigen Änderung der Strahlintensität und Strahlenergie. Während Kaskade, Dynamitron und Insulated-Core-Transformator in den Grenzen der Anlagekonstruktion in dieser Hinsicht sehr flexibel sind, sind beim Van-de-Graaff- und Linearakzelerator Zahl der Elektronen und Beschleunigungsgrad voneinander abhängig. Der Linearakzelerator ist besonders geeignet für hohe Strahlenergie (über 4 MeV) bei relativ niedriger Intensität. Der Van de Graaff hat eine obere praktische Energiegrenze bei 4 MeV und kann bis jetzt nur für maximale Leistung von 3 kW ökonomisch gebaut werden. Kaskade, Dynamitron und Insulated-Core-Transformator eignen sich für den Energiebereich bis zu etwa 3 MeV, erlauben jedoch sehr hohe Leistung bis derzeit maximal 65 kW. Heute besteht für industrielle Anwendung eindeutig eine Tendenz in Richtung Teilchenenergie zwischen 0,5 bis 3,0 MeV und Strahlleistungen bis zu 100 kW, der die drei letztgenannten Akzeleratortypen entgegenkommen.

Beispiele für industrielle Installationen, in denen Akzeleratoren zu Bestrahlungszwecken im praktischen Einsatz stehen, sind die Einrichtungen der W. R. Grace

zur Herstellung von Polyäthylenschrumpffolien mittels Strahlenvernetzung, die heute mit Insulated-Core-Transformatoren der High Voltage Engineering Corp. ausgerüstet sein sollen. Weiter wären zu nennen die Einrichtungen der High Voltage Engineering Corp. in Burlington (Mass., USA), und bei Leybold & Co. in Köln, die Lohnbestrahlung an medizinischen Wegwerfartikeln, Polyäthylenvernetzung und anderes durchführen. Diese Installationen sind mit Van-de-Graaff- und Insulated-Core-Transformatorenanlagen ausgestattet. Einen Eindruck des Aufbaues einer Bestrahlungseinheit im Betrieb der Electronized Chemicals Corp., Burlington, in der vier derartige Anlagen nebeneinander aufgestellt sind, vermittelt Abb. 12.

Eine weitere Installation mit zwei Dynamitronanlagen ist in Paris im Adany Research Laboratory für Lohnaufträge und Forschung im Betrieb. Die Ethicon Hospital Corp. betreibt in Kalifornien eine Anlage mit Linearakzeleratoren für Sterilisation medizinischer Wegwerfartikel. Ähnliche Installationen werden in England durch Becton Dickinson Co. und Smith & Nephew Ltd. betrieben. Eine Versuchsanlage zu Polymerisationsstudien soll bei der Toyo Rayon Co. in Japan im Betrieb sein.

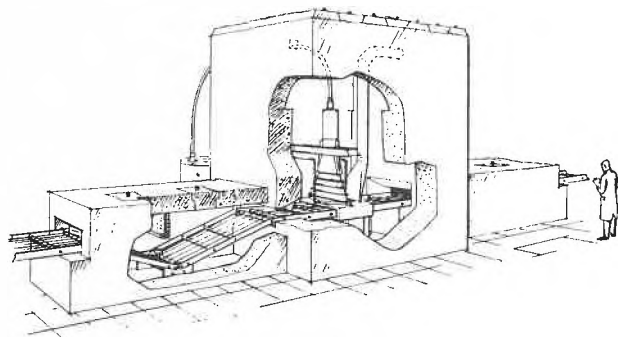


Abb. 12. Schema einer Akzelerator-Bestrahlungsanlage der Electronized Chemicals Corp. (Tochtergesellschaft der High Voltage Engineering Corp.)

2. Vergleich der Einsatzmöglichkeiten von Isotopenstrahlern und Akzeleratoren

Im praktischen Einsatz stehen heute miteinander in Konkurrenz die γ -Strahlung der Cäsium-137 und Kobalt-60-Isotopenquellen und die mittels Akzeleratoren erzeugten beschleunigten Elektronenstrahlen. Die Einsatzmöglichkeiten der beiden Strahlenarten finden ihre Begrenzung durch die verschiedene Natur der γ - und Elektronenstrahlung einerseits und deren Beziehung zu der Art des Bestrahlungsgutes bzw. der gestellten Zielsetzung.

Grundsätzlich unterscheiden sich die beiden Strahlenarten dadurch, daß die γ -Strahlung eine energiereiche Photonenstrahlung darstellt, während die Elektronen-

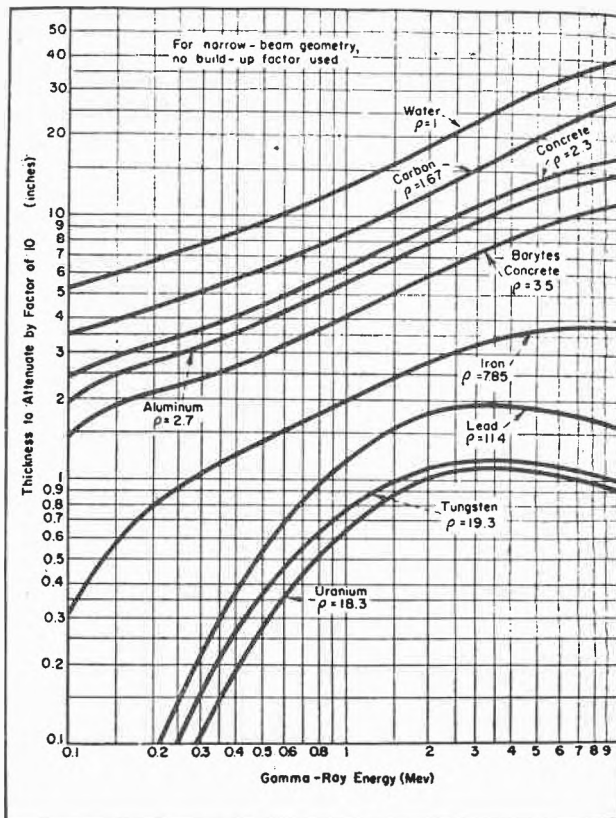


Abb. 13. Absorption von γ -Strahlung verschiedener Energie in Abhängigkeit von der Dicke verschiedener Materialien

strahlung eine beschleunigte Partikelstrahlung ist. Die erstere tritt durch den Compton-Effekt mit den Elektronen des Substrats in Interaktion und erzeugt Primärelektronen derselben Energie, die das wirksame Prinzip darstellen. Da die effektvollen Interaktionen, die zu Photonenverlust führen, relativ selten eintreten, ist die Durchdringtiefe der Strahlen sehr groß (Abb. 13). Diese Abbildung zeigt, daß bei 1 MeV Strahlenergie die γ -Strahlung bei der Durchdringung von einer Schicht von 30 cm Wasser auf $1/10$ der Intensität reduziert wird.

Andererseits jedoch ist die Wirkung von γ -Strahlung die einer schlechten Elektronenquelle. Die γ -Bestrahlung eignet sich daher vor allem für Zielsetzungen, wo große Substratmaße eine ausgedehnte Tiefenwirkung verlangen und niedrige Aktivierungsdichte genügt. Solche Verhältnisse liegen bei Kettenreaktion, wie der erwähnten Bromierung von Äthylen oder bei der Polymerisationsanregung einerseits und bei dicken Substraten wie bei Vulkanisation von Reifen oder bei der Sterilisation von Lebensmitteln, vor.

Die Elektronenstrahlung der Akzeleratoren ist als Partikelstrahlung infolge der häufigeren Interaktionen weniger durchdringend (Abb. 14). Ein Elektronenstrahl der Energie von 1 MeV wird schon beim Durchgang durch eine 0,5 cm starke Wasserschicht vollständig absorbiert.

Die Interaktionen sind hier direkte unelastische Stoßvorgänge und übertragen Energie vom Strahlungspartikel auf die getroffenen Elektronen des Substrats. Diese Vorgänge erfolgen häufiger als im Falle der γ -Strahlung und stehen in direkter Beziehung zur Strahlenintensität. Überall dort, wo der erwünschte Effekt hohe Speziendichte verlangt und begrenzte Dicke des Substrats vorliegt, ist die Elektronenbestrahlung im Vorteil. Solche Verhältnisse sind z. B. bei der vernetzenden Bestrahlung von Filmen, Folien, Textilmaterialien oder Lackschichten oder zur Erzielung von Oberflächeneffekten gegeben.

3. Die Wirtschaftlichkeit der Bestrahlung

Im allgemeinen ist die Ansicht weit verbreitet, daß Bestrahlung sehr teuer sei. Dies ist sicherlich richtig, was die Anlageinvestitionen betrifft. Eine industrielle Bestrahlungseinrichtung mit den erforderlichen Abschirmungen für die Bestrahlungsräume erfordert etwa 650 000 Franken, wofür eine γ -Bestrahlungsanlage mit etwa 60 000 Curie Kobalt-60 oder eine analoge Installation mit einem 0,5-MeV-Akzelerator mit etwa 10 kW Leistung erstellt werden kann. Mit einer Gammaquelle dieser Art lassen sich bei Durchführung eines Bestrahlungsvorgangs, der eine Dose von Mrad erfordert, in drei 8-stündigen Schichten pro Tag im Jahr etwa 150 t Material medizinische Wegwerfartikel bestrahlen. Mit der geschichteten Akzeleratoreinrichtung kann man unter Berücksichtigung der andersgearteten Operation (Artikel ausgepackt bestrahlt wegen geringerer Durchdringbarkeit nur 8 Stunden pro Tag, weil Dauerbetrieb nicht möglich) trotz rechnerisch 10mal höherer Leistung nur etwa das doppelte Gewicht an Material bestrahlen. Die Operation der Gammaquelle ist jedoch durch jährliche Nachfüllung von 12% des Kobalt-60 zusätzlich belastet.

Es dürfte interessant sein, hier einen Betriebskostenvergleich zu betrachten, den LÉVEQUE⁴ beim Study Group

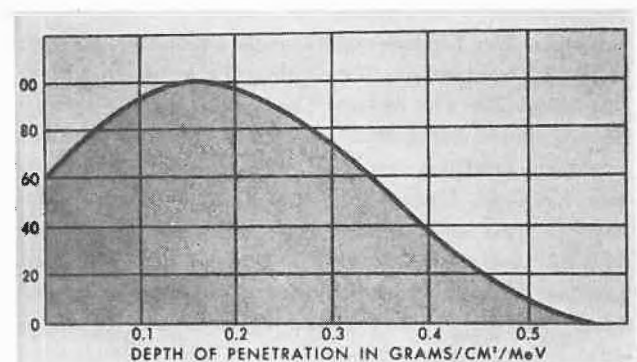


Abb. 14. Absorptionskurve von Elektronen der Energie 1 MeV in Wasser

⁴ P. LÉVEQUE, *A Study Group Meeting on Radioisotopes Economics*, Wien, März 1964.

Meeting on Radioisotope Economics 1964 in Wien gegeben hat, der in seinem Beispiel, das jedoch vor allem Unterschiede in Bestrahlungsdurchführung unberücksichtigt läßt, für den Akzelerator einen Vorteil errechnet. Dieser Vergleich ist in Tabelle 2 niedergelegt.

Es muß erwähnt werden, daß die Rentabilität und der Betriebskostenanfall sehr stark von der Leistung der Quelle abhängt. Zur Illustration dieser Tatsache ist in Tabelle 3 eine Zusammenstellung von Investitions- und Betriebskosten von γ -Quellen verschiedener Größe gegeben, die BAINES⁵ auf der Konferenz über den Einsatz großer Quellen in der Industrie 1963 in Salzburg gegeben hat.

Tabelle 2. Betriebskostenvergleich für eine Elektronenakzeleratoranlage (z. B. 5 MeV und 3 mA) und eine Kobalt-60-Isotopenanlage mit 1000 000 Curie; d. h. gleiche Leistung von 15 kW.

	Akzelerator	Quelle
Investition	1 500 000 Fr.	8 000 000 Fr.
Investition pro kW	100 000 Fr.	530 000 Fr.
Zahl der Betriebsstunden	2 000	6 000
Anzahl kWh/Jahr	30 000	90 000
Jährliche Amortisation	350 000 Fr.	2 000 000 Fr.
- Erneuerung Kobalt-60		600 000 Fr.
		2 600 000 Fr.
Jährliche Operationskosten (Personal, Unterhalt, Versicherung)	160 000 Fr.	160 000 Fr.
Jährliche Ausgaben	510 000 Fr.	2 760 000 Fr.
Preis pro kWh	17 Fr.	30 Fr.

Es zeigt sich hieraus vor allem auch, daß die Bestrahlungsbehandlung von Handelsprodukten als solche in erträglichen Grenzen bleibt. Die Bestrahlung z. B. von Polyäthylenbechern zur Erhöhung der Kochfestigkeit mit einem 3 MeV 1-mA-Akzelerator stellt sich auf etwa 10 Rappen pro Becher.

Der Autor ist der Geschäftsleitung von INRESCOR - Internationale Forschungs-Gesellschaft - für die Genehmigung zur Veröffentlichung dieser Arbeit zu Dank verpflichtet. Besonderen Dank schuldet er Herrn Dr. H. KRÄSSIG für die wertvollen Ratschläge und die Mithilfe bei der Abfassung des Manuskriptes.

⁵ B. D. BAINES, Irradiation Plant Economics. *Proceedings of a Conference on Industrial Uses of Large Radiation Sources, Salzburg, 27-31 May 1963*, Vol. 2, International Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 243-64.

Tabelle 3. Investitions- und Betriebskostenvergleich für Kobalt-60-Quellen verschiedener Größen (Angaben in US-\$, wo nicht anders angegeben)

Anlagekosten	70 000		303 000	
Maximale Kobalt-Kapazität in Curie	72 000		790 000	
Kobalt-60-Beladung in Curie	20 000	60 000	200 000	600 000
Verzinsung Anlage	1 750	1 750	7 580	7 580
Co 60	700	2 100	7 000	21 000
Amortisation 10 Jahre				
Anlage	7 000	7 000	30 000	30 300
Co 60	400	1 200	4 000	12 000
Operationskosten	5 600	5 600	11 200	11 200
Unterhalt	1 400	1 400	6 000	6 000
Co-Ersatz	2 000	8 400	20 000	84 000
Co-Transport	1 400	1 400	2 800	2 800
Total Kosten	20 250	28 850	88 880	174 880
Produktion lb/Jahr (Materialdichte 0,4)	107 500	322 500	1 650 000	4 950 000
Bestrahlungskosten \$/lb	0,198	0,090	0,054	0,035

Folgende weitere Literatur wurde verwendet

1. BOLT ROBERT O. und JAMES G. CARROLL, *Radiation effects on organic materials*, Academic Press, New York 1963.
2. CHAPIRO ADOLPHE, *Radiation Chemistry of Polymeric Systems*, High Polymers 15, Interscience Publishers, New York 1962.
3. CRAWFORD C. G., Construction and Operation of a Commercial Gamma-Ray Package-Sterilizing Plant, *Proceedings of a Conference on Industrial Uses of Large Radiation Sources, Salzburg, 27-31 May 1963*, Vol. 2., International Atomic Energy Agency, Wien 1963, S. 265-79.
4. JEFFERSON SIDNEY (Herausgeber), *Massive radiation techniques*, G. Newnes, London 1964.
5. STANLEY LIVINGSTON M. und JOHN P. BLEWETT, *Particle Accelerators*, International Series in Pure and Applied Physics, McGraw-Hill Book Company, New York/Toronto/London 1962.
6. MOHLER HERMANN und Mitarbeiter, *Chemische Reaktionen ionisierender Strahlen* (Radiation Chemistry), Verlag Sauerländer, Aarau/Frankfurt am Main 1958.
7. RATNER B. S., *Accelerators of Charged Particles*, Pergamon Press, Oxford/London/New York/Paris 1964; Translation of the original Russian *Uskoriteli Zaryazhennykh Chastits*, Fizmatgiz, Moscow 1960.
8. SPINKS J. W. T. und R. J. WOODS, *An Introduction to Radiation Chemistry*, New York 1964.
9. WALTER A. K., *Elektrostatische Generatoren*, eine Sammlung von Aufsätzen, Akademie-Verlag, Berlin 1963.