Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 1

Artikel: Anwendungsmöglichkeiten eines Teilchenbeschleunigers in der Materialprüfung und Materialbehandlung

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916444

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: 06.01.2026

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

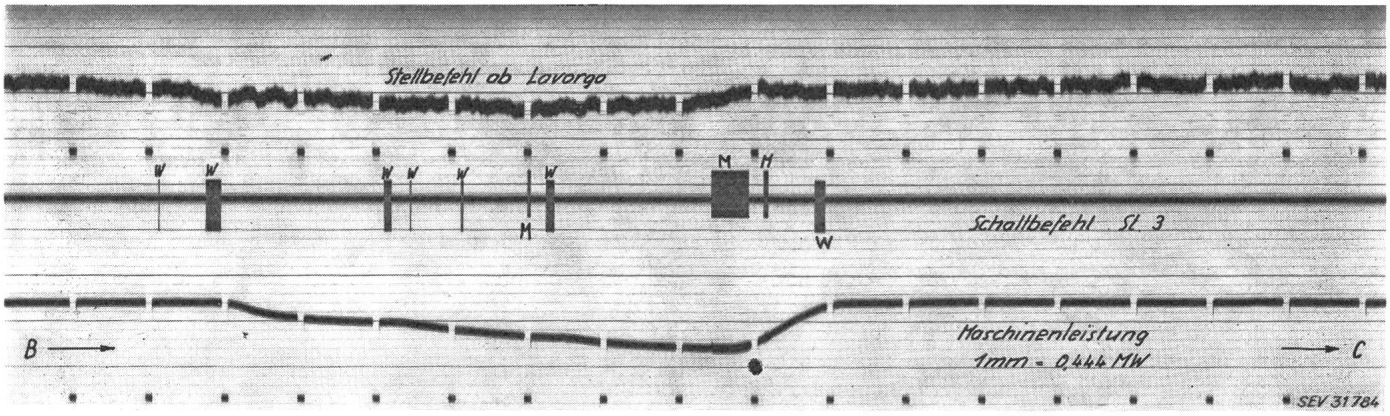

Fig. 9

Oszillogramm, aufgenommen im regulären Betrieb während der Ausregelung einer Laständerung

Man erkennt deutlich, wie empfindlich die Regelung arbeitet ohne zu pendeln oder zu überschiessen

Maschinenleistung im normalen Betrieb bei rund 50 % Regellastanteil während einer Leistungsänderung. Wie die Aufnahme erkennen lässt, folgt die Maschinen-Leistung dem Stellbefehl genau.

Bei allen oszillographischen Aufnahmen war am Nullverstärker die mittlere Empfindlichkeitsstufe 3 eingestellt. Je nach den vorliegenden Betriebsbedingungen kann natürlich auch eine grössere oder kleinere Empfindlichkeit gewählt werden.

Adresse des Autors:
F. Schär, Aare-Tessin Aktiengesellschaft für Elektrizität, Olten (SO).

Anwendungsmöglichkeiten eines Teilchenbeschleunigers in der Materialprüfung und Materialbehandlung

621.384.6 : 620.1

1. Vorwort

Die Commission Electrotechnique Internationale (CEI) besitzt in der Groupe de Travail (GT) 8 des Comité d'Etudes (CE) 15 seit längerer Zeit ein Organ, das sich mit der Wirkung von ionisierenden Strahlen insbesondere auf Isolierstoffe befasst. Vor etwa 2 Jahren beschloss das Fachkollegium (FK) 15 des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees (CES), selber auch eine Unterkommission (UK) 8 zu bilden, die in Zusammenarbeit mit der GT 8 die gleichen Probleme auf nationaler Ebene in Angriff nimmt.

Bereits an der ersten Sitzung der UK 8 vom 27. Mai 1960 wurde die Frage nach einer geeigneten Bestrahlungsquelle besprochen. An der zweiten Sitzung vom 21. Oktober 1960 kam die UK 8 zur Überzeugung, dass die Aufwendungen für eine solche Strahlenquelle derart seien, dass ihre Anwendungsmöglichkeiten über den Rahmen der Zielsetzungen der UK 8 hinaus auf breitester Basis geprüft werden müssten, wenn eine Aussicht auf Verwirklichung überhaupt bestehen solle. Es wurden daher 3 Mitglieder der UK 8 mit dem Studium dieser Fragen beauftragt. Die Ergebnisse sollen hier dargelegt werden und die Unterlage bilden, um einen weiteren Kreis von Interessenten mit den Problemen vertraut zu machen und ihr Interesse für eine Mitarbeit zu wecken.

Im folgenden werden die Beiträge der 3 Beauftragten unverändert wiedergegeben. Es hat dies zwar den Nachteil, dass die gleichen Fragen z. T. mehrfach angeschnitten werden; umgekehrt kommen aber dadurch verschiedene Betrachtungsweisen zu ihrer Geltung. Für einige Spezialfragen wurden Fachleute konsultiert, deren Stellungnahmen ebenfalls in diese Studie aufgenommen wurden. Zum Schluss wird versucht, die Ergebnisse zusammenzufassen.

2. Die Anwendungsmöglichkeiten einer starken Strahlenquelle

2.1 Materialuntersuchung [1])

Die Behandlung von Materialien mit ionisierenden Strahlen hat oft die erwünschte oder unerwünschte Veränderung der physikalischen, chemischen oder biologischen Eigenschaften des bestrahlten Gutes zur Folge. Es ergeben sich daraus folgende Fragen:

1. Welche Eigenschaften können an einem vorgegebenen Material durch Bestrahlung mit der einen oder andern Strahlenart verändert werden?
2. Wie kommen diese Veränderungen zustande?
3. In welchem Mass können die Eigenschaften eines Materials durch Bestrahlung beeinflusst werden, und wie ist der Zusammenhang zwischen verabfolgter Dosis und Veränderung der Eigenschaften?

Während die Problemstellungen 1. und 2. als solche der Grundlagenforschung zu betrachten sind, und soweit als beantwortet gelten können, dass die speziellere Fragestellung 3. in höchstem Masse sinnvoll wird, stellen sich in ihrem Rahmen so viele Einzelfragen, dass sie den Aufgabenkreis der Grundlagenforschung weit überschreiten.

Oft tritt bei der Problemstellung 3. als Sonderfall auch bloss die Frage auf: Welche meist sehr hohe Dosis einer bestimmten Strahlenart erträgt ein Material, ohne seine Eigenschaften so stark zu verschlechtern,

[1]) Verfasser dieses Abschnittes ist Dr. phil. nat. *H. Schindler*, Sekretär der SBK, Zürich.

dass es seinen Verwendungszweck, z. B. als Baustoff oder Bauelement einer Reaktoranlage, nicht mehr zu erfüllen vermag? Die Untersuchungen zur Beantwortung dieser Sonderfrage werden etwa als zerstörende Materialprüfung bezeichnet. Im Hinblick auf die Zukunft scheint es indessen im Zusammenhang dieser Studie wichtig, die Frage 3. in ihrer vollen Allgemeinheit zu betrachten.

Wie man sieht, erfordert die Lösung einer Problemstellung nach Ziff. 3. folgende Teiloperationen:

a) Bestimmung der interessierenden Materialeigenschaften vor der Bestrahlung,

b) Bestrahlung, u. U. mit gleichzeitiger und fortlaufender Beobachtung und Messung der Materialeigenschaften und jedenfalls unter ständiger Kontrolle und Messung der verabfolgten Dosis,

c) Bestimmung der Materialeigenschaften nach der Bestrahlung, u. U. nach verschiedenen Zeitabständen, wenn es um die Feststellung eines möglichen Abklingvorganges geht.

Daraus sei als erste Folgerung festgehalten:

Neben der Bestrahlung selber erfordert die eigentliche Materialuntersuchung im Sinne der quantitativen Bestimmung der Materialeigenschaften einen beträchtlichen Aufwand und weitgehende messtechnische Möglichkeiten.

Die sich aus dieser Feststellung ergebenden Folgen, sollen hier nicht weiter analysiert werden. Das Augenmerk sei vor allem auf die Probleme der Bestrahlung selber gerichtet.

2.1.1 Die Strahlenart

Es können folgende Strahlenarten in Betracht gezogen werden:

1. Quantenstrahlung (Röntgen- und Gammastrahlung),
2. Strahlen von leichten geladenen Teilchen,
3. Strahlen von schweren geladenen Teilchen,
4. Strahlen von schnellen Neutronen,
5. Strahlen von langsamen Neutronen.

In dem hier interessierenden Energiebereich bis zur oberen Grenze von einigen MeV sind die Wirkungen der ersten und zweiten Strahlenart auf die Materie im wesentlichen die gleichen. Massgebend für den Einfluss auf die Materialeigenschaften ist dabei die Ionisierung. Es besteht zwischen der makroskopisch feststellbaren Wirkung und der von der Strahlung an die Materie abgegebenen Energie, der sog. Absorptionsdosis, gemessen in rad (1 rad = 100 erg g^{-1}), eine eindeutige Beziehung.

Bei der dritten und vierten Strahlenart treten neben der Ionisierung durch elastischen Stoss der Teilchen mit den Gitterbausteinen auch Verschiebungen im Kristallgefüge ein.

Bei der fünften Strahlenart, den langsamen Neutronen, kommt schliesslich noch die Kernumwandlung durch Einfang dieser Teilchen im Innern der Atomkerne hinzu.

Änderungen von Materialeigenschaften, die primär auf Ionisationsvorgänge zurückzuführen sind, können somit durch Strahlen der ersten und zweiten Art hervorgerufen werden. Welche davon man wählen wird, hängt vor allem von technischen und wirtschaftlichen Überlegungen ab.

2.1.2 Die Strahlenenergie

Die kinetische Energie eines einzelnen Teilchens, bzw. die Quantenenergie einer Strahlung wird gemessen in eV oder einem Vielfachen davon. Sie ist massgebend für die in einer bestimmten Eindringtiefe absorbierte Energie. Für die Materialuntersuchungen müssen in dieser Beziehung folgende Punkte beachtet werden:

1. Homogenität der Energieabsorption im ganzen bestrahlten Gut,
2. Angemessene Eindringtiefe der Strahlung,
3. Möglichst vollständige Absorption der Strahlenenergie innerhalb des bestrahlten Gutes.

Diese gleichen Anforderungen finden sich wieder bei der Materialbehandlung, und die Überlegungen, wie sie erfüllt werden können, sind die gleichen wie dort.

2.1.3 Die Strahlendosis

Die Bereiche der verschiedenen Wirkungen von ionisierenden Strahlen auf die Materie können etwa wie folgt angegeben werden:

biologische Wirkungen	0,05...5 Mrad
erwünschte chemische oder physikalische Wirkungen	1...50 Mrad
zerstörende chemische und physikalische Wirkungen	10 000 Mrad

Bemerkenswert sind die hohen Strahlendosen, die für die zerstörende Materialuntersuchung nötig sind.

Bei vollständiger Ausnützung der Strahlenenergie gilt für die erzielte Dosis die Beziehung:

$$D = 360 \frac{P\ t}{m}$$

(D Dosis in Mrad; P Strahlleistung in kW; t Bestrahlungszeit in h; m Bestrahlte Masse in kg.)

oder aufgelöst nach P:

$$P = \frac{m}{360\ t} D$$

Für eine Probe von 1 kg und eine Dosis von 10^4 Mrad ergibt sich die Strahlleistung aus

$$P = \frac{10000}{360} \cdot \frac{1}{t} \approx \frac{28}{t}$$

Man erkennt daraus, dass die Strahlleistung für die Zwecke der zerstörenden Materialprüfung die Grösse von einigen kW aufweisen muss, wenn die Bestrahlungszeiten nach Stunden und nicht nach Tagen zählen sollen.

2.1.4 Zustandsgrössen bei der Bestrahlung

Ein wichtiges Problem ist die Kontrolle und Überwachung der Temperatur einer bestrahlten Probe. Primär muss dafür gesorgt werden, dass die bei der Bestrahlung entstehende Wärme die Probe nicht unzulässig erhitzt. Darüber hinaus kann es aber nötig sein, die Probe während der Bestrahlung auf einem bestimmten, u. U. sehr tiefen oder sehr hohen Temperaturniveau zu halten.

Auch andere Parameter können von Einfluss sein, wie z. B. die Zusammensetzung der umgebenden Atmosphäre oder der Druck.

Diese Erfordernisse bedingen ein sorgfältiges Studium der Hilfseinrichtungen am Bestrahlungsort und die Möglichkeit, diese Einrichtungen nach Bedarf zu ergänzen.

2.1.5 *Zusammenstellung der wichtigsten, für die Materialprüfung erforderlichen Eigenschaften einer Strahlenquelle*

Die wichtigsten, für die Materialprüfung erforderlichen Eigenschaften einer Strahlenquelle sind die folgenden:

a) Hohe Strahlleistung von einigen kW;

b) Hohe Ausnützung der Strahlleistung in der bestrahlten Probe bei genügend grosser Eindringtiefe;

c) Erzielbare Homogenität der Absorptionsdosis innerhalb der Probe;

d) Gut definierte Dosisleistung;

e) Strahlenarten:
Eine Einordnung nach ihrer Wichtigkeit ist willkürlich und hängt weitgehend von den berücksichtigten Gesichtspunkten ab. Immerhin darf wohl gesagt werden, dass die Prüfung mit Strahlen, bei denen die Wirkungen auf die Ionisationsvorgänge allein zurückzuführen sind, also mit Quantenstrahlen und mit Strahlen leichter geladener Teilchen, insbesondere Elektronen und die Prüfung mit Neutronenstrahlen im Vordergrunde stehen.

f) Quanten- und Teilchenenergie:
Die Quantenenergie bei apparativ erzeugter Strahlung muss im Interesse der Energieausbeute in der Grössenordnung von 30...50 MeV liegen.
Die Teilchenenergie muss um eine genügende Eindringtiefe der Strahlung zu erreichen, einige MeV betragen. Übersteigt sie aber 8...10 MeV, so tritt ein in vielen Fällen unerwünschter Effekt, die Erzeugung radioaktiver Isotope im bestrahlten Gut ein, welche die weitere Untersuchung der Proben erschweren kann.

2.1.6 *Die bestehenden Möglichkeiten*

Wenn man sich auf die Möglichkeiten in der Schweiz beschränkt, so sind folgende Institute zu erwähnen, die über leistungsfähige Strahlenquellen verfügen:

Institut	Strahlenquelle	Strahlenart
Eidg. Institut für Reaktorforschung, Würenlingen	Reaktoren	γ, γ+n (Mischstrahlung)
	Isotope	γ
Verschiedene Universitätsinstitute	Teilchenbeschleuniger	positive Ionen
Einige grosse Spitäler Einige Industrieunternehmungen	Betatron	harte Röntgenstrahlen
	Bestrahlungseinheiten (CO^{60})	γ

Mit Ausnahme der Möglichkeiten des Eidg. Instituts für Reaktorforschung sind die übrigen Strahlenquellen alle zweckgebunden. Ihre Verwendung für die Materialuntersuchung oder gar Materialbehandlung kommt nur ausnahmsweise in Frage.

Es bleibt somit zu prüfen, ob neben den Möglichkeiten des Eidg. Instituts für Reaktorforschung ein für die Zwecke der Materialuntersuchung und Materialbehandlung errichteter Teilchenbeschleuniger eine Notwendigkeit ist und Existenzberechtigung hat.

2.2 Die Möglichkeiten der Beeinflussung von Metallen und anorganischen Stoffen durch Gamma- und Elektronenstrahlen [2])

Elektronenstrahlen mit Energien bis zu einigen MeV können primär zweierlei Wirkungen in festen, anorganischen Stoffen haben. Einerseits besteht die Möglichkeit, dass sie im Kristallgitter Atome aus ihren Plätzen herausschlagen, so dass Gitterleerstellen und Zwischengitteratome (d. h. sog. Punktdefekte) entstehen. Die Gitteratome müssen zu diesem Zwecke relativ hohe kinetische Energien erhalten. Nur leichten Atomen können durch Elektronen genügend hohe Energiebeträge übermittelt werden; so beginnt z. B. die Bildung von Punktdefekten bei Elektronenbestrahlung von Germanium erst bei einer Ernergie von 0,63 MeV. Schwere Atomarten können durch Elektronen mit Energien von einigen MeV nicht aus ihren Gitterplätzen weggeschlagen werden. Gammastrahlen können als solche keine Gitterdefekte erzeugen; sie können indessen bei genügend hoher Energie Photo- oder Compton-Elektronen auslösen oder Elektronen durch Paarbildung erzeugen. Diese Elektronen sind dann ihrerseits — falls sie genügend hohe Energien besitzen — imstande, Gitteratome wegzuschlagen.

Zweitens muss die Fähigkeit von Elektronen- und Gammastrahlen genannt werden, Elektronen der Gitteratome aus niedrigen Energieniveaus in höhere zu heben (sog. Anregungsprozesse) oder gar vom Atom abzulösen (Ionisation). Derartige Prozesse erfordern wesentlich geringere Energien als die Erzeugung von atomaren Punktdefekten. In anorganischen Stoffen wird der Hauptteil der Ernergie von Gamma- und Eelektronenstrahlen auf diese Weise absorbiert.

Welche Wirkungen haben nun die genannten Prozesse auf die Eigenschaften von *Metallen?* Punktförmige Gitterdefekte und aus solchen durch Agglomeration oder gegenseitige Reaktion entstandene grössere Gitterstörungen verändern z. B. die Festigkeitseigenschaften. Da jedoch Elektronen und Gammastrahlen im Gegensatz zu Neutronen, Protonen- und Alphastrahlen nur relativ wenig Gitterdefekte erzeugen, ist die diesbezügliche Wirkung im allgemeinen sehr gering. Immerhin wurde z. B. bei weichgeglühtem Kupfer nach Elektronenbestrahlungen eine geringe Härtesteigerung festgestellt. Demgegenüber fand man z. T. sehr beträchtliche Änderungen bei Neutronenbestrahlungen. Die Anregungs- und Ionisationsvorgänge sind praktisch wirkungslos, da in Metallen Störungen dieser Art in äusserst kurzer Zeit vernichtet werden. Mit Bestrahlungen von Metallen vermittels Elektronen- und Gammastrahlen konnten bisher keine nützlichen Effekte erzielt werden.

Viel deutlichere Effekte sind bei *anorganischen Stoffen* zu bemerken, in welchen die Atome nicht wie bei den Metallen durch mehr oder weniger freie Elektronen zusammengehalten werden, sondern in denen die Atome durch die sog. kovalente Bindung oder Elektronenpaarbindung, d. h. durch gemeinsam zu jeweils 2 Atomen gehörende Elektronen aneinandergebunden sind. Dies ist z. B. bei Diamant, Silizium, Germanium, Siliziumkarbid und vielen anderen Verbindungen der Fall. Die elektrische Leitfähigkeit dieser Stoffe — der sog. *Halbleiter* — beruht auf elektronischen Störungen im Kristallgitter. Solche Störungen

[2]) Verfasser dieses Abschnittes ist Prof. Dr. W. *Epprecht*, Abteilung für industrielle Forschung (AfiF) des Institutes für technische Physik der ETH, Zürich.

können durch Anregungs- und Ionisationsprozesse leicht erzeugt, verändert oder beseitigt werden, da ihre Bindung und Veränderung viel kleinere Aktivierungsenergien erfordert als die Erzeugung von atomaren Gitterstörungen. Elektronische Störungen in Halbleitern werden technisch vor allem in den Transistoren ausgenützt. Die Strahlenwirkung auf Halbleiter und daraus erzeugte Schaltungselemente konnte bis heute nicht in nützlichem Sinne ausgewertet werden, sondern man stellte vorläufig nur fest, dass durch Bestrahlungen die speziellen elektrischen Eigenschaften in unbrauchbarer Weise verändert werden. Es zeichnet sich somit zur Zeit auch für die Halbleitertechnik keine Nutzanwendung von Gamma- und Elektronenstrahlen ab.

Ausser der Strahlen-Beeinflussung der elektrischen Leitfähigkeit kann bei Stoffen mit kovalenter Bindung wie auch solchen mit ionischer Bindung (Zusammenhalt der Atome im Kristallgitter durch wechselweise Anordnung von elektrisch positiv und negativ geladenen Ionen) eine *Verfärbung* eintreten, wie sie beispielsweise bei Quarz (Kristallen und Glas), Halogenidkristallen (NaCl), Gläsern usw. bekannt ist. Bestrahlungsapparaturen können dazu benützt werden, die Verfärbungsempfindlichkeit von Gläsern abzuklären, ferner auch in geringem Umfange für die künstliche Färbung von Edelsteinen.

Auch die *Lumineszenz von Leuchtstoffen* hängt von Gitterstörungen ab, welche durch Elektronen- und Gammastrahlen beeinflussbar sind. Die bisherigen Veröffentlichungen lassen indessen vermuten, dass durch Bestrahlungen aktivierte Leuchtstoffe ihre Leuchtkraft sehr bald verlieren.

Die Eignung gewisser Stoffe, für chemische Prozesse katalytisch zu wirken, wird in vielen Fällen in sehr empfindlicher Weise von Störungen des atomaren und elektronischen Baues dieser *Katalysatorstoffe* beeinflusst. Metallische Katalysatoren sind bezüglich ihrer Veränderung durch Bestrahlungen erst wenig untersucht worden. Platinkatalysatoren, welche für das Kontaktverfahren der Schwefelsäureherstellung verwendet werden, wirken nach Röntgenbestrahlungen besser, verlieren indessen die gesteigerte Aktivität bald wieder. ZnO, welches für Hydrierung von Aetylen katalytisch wirkt, wirkt nach Co^{60}-Bestrahlungen schlechter. Etwas besser ist die Wirkung der Strahlen auf oxydische Katalysatoren untersucht. Offenbar besteht bei ihnen ein enger Zusammenhang zwischen der katalytischen Wirkung und den Halbleitereigenschaften. Metalloxyde mit Leitfähigkeit infolge überschüssiger Elektronen (sog. n-Leiter) scheinen sich als Katalysatoren für Hydrierungs- und Dehydrierungsvorgänge zu eignen, dagegen p-Leiter (Halbleiter mit Elektronen-Unterschuss) nicht. Es sind heute noch zu wenig Resultate über die Auswirkung von Bestrahlungen auf die Aktivität von Katalysatoren bekannt, doch scheint es durchaus möglich, dass praktisch auswertbare Ergebnisse gefunden werden.

Die Bestrahlung von Metallen, Halbleitern und ionisch gebundenen anorganischen Verbindungen mit Elektronen oder Gammastrahlen ist selbstverständlich wissenschaftlich von hohem Interesse. Das wissenschaftliche Studium der Bestrahlungs-Prozesse wird jedoch immer an Bestrahlungseinrichtungen in Instituten erfolgen müssen, weshalb auf die theoretische Bedeutung der Wechselwirkung zwischen Strahlen und anorganischen Festkörpern nicht eingegangen wurde.

2.3 Beeinflussung organischer Stoffe durch γ- und Elektronenstrahlen [3])

Beim Durchgang durch Materie gibt jede Strahlung Energie an die Materie ab, wobei je nach Art der Strahlung der Energieübertragungsmechanismus ein verschiedener ist. In praktischer Hinsicht geschieht bei den in Betracht kommenden Energiewerten von einigen MeV der Grossteil der Energiewechselwirkungen durch Ionisierung, Erzeugung von freien Elektronen und Anregung von Atomen oder Molekeln. Als Folge des verschiedenen Charakters von Quantenstrahlung und Teilchenstrahlung ist die Art und das Ausmass der Intensitätsabnahme beim Durchgang durch Materie verschieden. So durchstrahlen bei gleicher Energie Photonen (γ-Strahlen) viel grössere Schichtdicken als etwa Elektronenstrahlen (bei 3 MeV ist das Verhältnis der Halbwertdicken in $g/cm^2 \approx 10:1$, bei 1 MeV $\approx 20:1$).

Die Wirkung ionisierender Strahlung auf organische Moleküle ist sehr komplex, und es laufen in der Regel eine grössere Zahl Reaktionen simultan ab. Bei einem einfachen Kohlenwasserstoff lassen sich folgende Vorgänge betrachten:

a) Abspaltung von Wasserstoff;
b) Bildung niederer Kohlenwasserstoffe gesättigt und ungesättigt;
c) Bildung höherer Kohlenwasserstoffe durch Polymerisation und Vernetzung.

Obschon die Strahlungsenergie statistisch aufgenommen wird, zeigen die Endprodukte starke Hinweise auf Selektiveffekte. Dieser Umstand erlaubt es, ionisierende Strahlungen in der präparativen organischen Chemie anzuwenden. Der weitaus grösste Teil der Untersuchungen wurde auf dem Gebiet der Kunststoffchemie durchgeführt, weil hier die Möglichkeiten neue Produkte zu schaffen oder bestehende Produkte im gewünschten Sinne zu verändern am aussichtsreichsten erscheinen. In den USA und in England allein wurden bis Mitte 1959 über dieses Gebiet über 300 Patente erteilt. Die wichtigsten durch ionisierte Strahlung zu erzielenden Effekte lassen sich wie folgt unterteilen:

2.3.1 Effekte der Strahlung auf Monomere

Wohl der wichtigste dieser Effekte ist die *Polymerisation*, die durch Hochenergiestrahlung eingeleitet werden kann. Es handelt sich dabei um eine chemische Kettenreaktion, und die Strahlung beeinflusst nur deren Einleitung, obschon bei hohen Intensitäten auch der Kettenabbruch in einer gewissen Anzahl von Fällen auf durch Strahlung entstandene Radikale zurückzuführen ist. Man nimmt an, dass die ionisierende Strahlung diejenigen Ionen und freien Radikale erzeugt, die in einer «normalen», d. h. nicht strahlungsbedingten, Polymerisation die Kettenreaktion einleiten. Die Strahlung übernimmt also die Rolle des Katalysators, so dass dieser nicht mehr notwendig ist. Man erreicht dadurch die folgenden Vorteile:

a) Grössere Reinheit (was sehr wichtig sein kann, z. B. in der Isolierstofftechnik);
b) Günstigere thermische Bedingungen (weil die Anzahl der einleitenden Radikale nur von der Strahlungsmenge abhängt).

Die niedrigeren Polymerisationstemperaturen bewirken weniger verzweigte Ketten im Polymerisat. Andere Vorteile sind die Möglichkeit einer «verzögerten Polymerisation», in welcher das Monomere zuerst bei

[3]) Verfasser dieses Abschnittes ist Prof. Dr. sc. techn. *F. Held*, AG R. & E. Huber, Pfäffikon (ZH).

niedriger Temperatur bestrahlt wird, worauf bei Erwärmung an einem späteren, gewünschten Zeitpunkt die eigentliche Polymerisation mit einem thermischen Katalysator vor sich geht, sowie die Möglichkeit einer Polymerisation in festem Zustand (etwa bei Acrylamid). Die Strahlungspolymerisation kann auch dort Vorteile bringen, wo die Polymerisation des Monomeren katalytisch schwer einzuleiten ist, wie etwa bei fluorierten Kohlenwasserstoffen oder dort wo bestimmte Füllstoffe (z. B. Russe) die normale katalytische Polymerisation stark verzögern.

2.3.2 *Effekt der Strahlung auf Polymere*

Man kann die gebräuchlichsten Polymere in zwei Klassen einteilen: diejenigen, die unter dem Einfluss der Hochenergiestrahlung *vernetzten*, und diejenigen, die dabei *zerfallen*. In der zweiten Gruppe figurieren Poly-isobutylen, Polytetrafluoraethylen, Polyvinylidenchlorid, Polymethylmethacrylat und Cellulose.

Die Folgen der Vernetzung sind primär Molekulargewichtszunahme. Dabei spielt auch die Veränderung der Kristallinität eine wichtige Rolle, die Löslichkeit nimmt im allgemeinen ab, der Schmelz- oder Erweichungspunkt wird erhöht, der Widerstand gegen Chemikalien wird verbessert, während die Ausdehnungskoeffizienten abnehmen. Die elektrischen Eigenschaften werden verändert (insbesondere die Temperaturabhängigkeit), die Dichte nimmt ab usw.

Praktische Möglichkeiten eröffnen sich im Gebiete der *Vulkanisierung von Elastomeren*, die bei gewöhnlicher Temperatur vor sich gehen kann. Insbesondere trifft dies zu für synthetische Kautschuke, wo im allgemeinen schon mit geringen Dosen eine genügende Vulkanisation erreicht werden kann. Die Vulkanisation verläuft ohne Beschleuniger und Aktivatoren, was für gewisse Produkte Vorteile bieten kann.

Die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in der Wärme wird bedingt durch die Möglichkeit, mit Hilfe ionisierender Strahlen chemische Bindungen zwischen den Russpartikeln und dem Kautschukmolekül zu erzeugen. Auf Grund der Patentliteratur scheint es wahrscheinlich, dass die Vulkanisation synthetischer Elastomere mit ionisierenden Strahlen für besondere Anwendungsgebiete sich technisch durchsetzen wird.

Ein zweites Gebiet ist die Vernetzung von Thermoplasten, die am Beispiel des Polyaethylen bereits grosstechnisch durchgeführt wird. Die Vernetzung kann sowohl ohne wie auch mit besonderen Vernetzungsmitteln (z. B. Divinylbenzol und Chlorbenzol) durchgeführt werden und führt zu Produkten mit verbesserten Eigenschaften bezüglich Wärme und Lösungsmittelbeständigkeit. Auch hier ist es möglich, die Eigenschaften durch Zugabe von Füllstoffen, die bei der Bestrahlung in chemische Bindung mit dem Polymeren eingehen, wesentlich zu verbessern. Besondere Effekte werden erhalten, wenn in orientiertem Zustand bestrahlt wird. In Gegenwart von Sauerstoff kann durch Bestrahlung auch eine Depolymerisation erreicht werden. Dieser Effekt wird technisch ausgenützt bei der Herstellung klebfähiger oder «heat-sealing»-Folien, sowie Schrumpffolien für die Verpackungsindustrie. Die Untersuchungen über die Vernetzung anderer Thermoplasten sind in keiner Weise abgeschlossen, obschon technische Anwendungen noch ausstehen. Ein gewisses Interesse dürfte dabei das Gebiet der synthetischen Faser umfassen.

2.3.3 *Pfropf- und Blockpolymere*

Die Veränderung der Eigenschaften von Kunststoffen durch ionisierende Strahlen in Gegenwart von niedermolekularen Substanzen wurde bereits im Jahre 1955 durch zahlreiche Patente von Du Pont veröffentlicht. *Chapiro* [4]) erwähnte schon 1956 zwei Methoden zur Pfropfpolymerisation mit Polyaethylen: die erste besteht aus der Bestrahlung von Polyaethylen in Anwesenheit des Monomeren, das sich dann auf die durch die Strahlung im Polyaethylen entstandenen Radikale aufpfropft; die zweite beruht auf der Bildung von Peroxydbrücken, wenn Polyaethylen an der Luft bestrahlt wird; diese Brücken werden unstabil bei einer Temperatur von 150 °C und zerfallen, indem sie freie Radikale erzeugen; praktisch wird also das Polymere in Anwesenheit von Sauerstoff bestrahlt, zu einem späteren, gewünschten Zeitpunkt dann in Anwesenheit des Monomeren erhitzt. Diese beiden Methoden wurden dann auf weitere Polymersysteme erweitert.

Die Vorteile der Pfropfpolymerisation sind bekannt: man kann damit die Eigenschaften eines Polymeren mit denjenigen eines Monomeren kombinieren. Einige Beispiele:

Acrylnitril, auf Polyvinylchlorid aufgepfropft, erhöht dessen Erweichungspunkt; Oberflächenaufpfropfung von Acrylamid auf Polyaethylen ergibt eine hydrophile Oberfläche, die bedruckt werden kann; die Klebbarkeit von Tetrafluoraethylen kann durch Aufpolymerisieren von Styrol bedeutend erhöht werden usw. Von technischem Interesse ist zweifellos das sog. «Preradiation grafing» bei dem der Kunststoff durch Bestrahlung in gewissem Sinne aktiviert wird (Bildung von instabilen Verbindungen, die später in Radikale zerfallen) und erst in einem späteren Zeitpunkt mit den Monomeren, die aufgepfropft werden sollen, in Verbindung gebracht werden. Diese Verfahren sind für Filme, Folien und Fasern geeignet, aber auch für Polymerisate in fein verteilter Form (Suspensionen).

Die gleichen Verfahren wie bei der Herstellung von Pfropfpolymeren lassen sich prinzipiell anwenden für die Herstellung von Blockpolymeren (Einbau der Monomeren oder eines Monomerblockes in die Hauptkette). Auch hier lassen sich die Eigenschaften in weiten Grenzen verändern und Kombinationen verwirklichen, die mit den klassischen katalytischen Verfahren nicht möglich sind. Verfahren — Herstellung von Pfropf- und Blockpolymeren — mit ionisierenden Strahlen sind in jedem Falle einmalig, wenn es gilt, bereits geformte Kunststoffe (als Folien, Fasern, Platten, Rohre usw.) nachträglich in ihren Eigenschaften zu verändern, d. h. dem vorgesehenen Verwendungszweck anzupassen.

Zusammenfassend sei festgehalten, dass die Wechselwirkung zwischen ionisierenden Strahlen und Materie für organische Verbindungen sowohl vom theoretischen wie vom praktischen Standpunkt von hohem Interesse ist. Die durch Strahlung verursachte Veränderung von organischen Verbindungen lassen sich in drei Arbeitsgebiete gliedern:

a) Theoretische Studie über den Reaktionsmechanismus (Bildung von Radikalen und Reaktionen der Radikale) bei einfachen und komplexen Systemen;

b) Untersuchungen der Strahlenschäden an organischem Material, das als Werkstoff beim Reaktorbau eingesetzt wird;

c) Bestrahlung von organischem Material zur Synthese neuer Verbindungen.

[4]) *A. Chapiro*, Chim. Industr., 76(4), 754(1956).

Das dritte Gebiet wird insbesondere für die Kunststoffchemie zurzeit sehr intensiv bearbeitet. Die grossen Variationsmöglichkeiten, die sich hier in der Behandlung von organischen Werkstoffen bezüglich Eigenschaftsveränderungen eröffnen, lassen mit Sicherheit erwarten, dass weitere technische Anwendungen folgen werden.

2.4 Anwendungsmöglichkeiten eines 2...3-MeV-Elektronenbeschleunigers hoher Strahlenleistung in der Biologie [5])

Für einen 2...3-MeV-Elektronenbeschleuniger besteht in der Strahlenbiologie und Medizin grösstes Interesse und Bedürfnis.

2.4.1 Grundlagenforschung

Vornehmlich drei Eigenschaften des Elektronenbeschleunigers sind von Wichtigkeit.

a) Hohe Strahlenleistung. Viele strahlenbiologische Vorgänge lassen sich nur mit hohen Dosen, die in relativ kurzer Zeit verabreicht werden müssen, untersuchen. Dies gilt besonders für chemische, biochemische Experimente, für die Beobachtung von Bestrahlungsprodukten, Resonanzphänomenen, ferner aber auch für die Strahlengenetik. Auf dem wichtigen Gebiet der Vererbungsforschung ist die Anwendung ionisierender Strahlen bestimmend und ausschlaggebend geworden. Der Strahlengenetiker von heute befasst sich mit Mikroorganismen (Viren, Bakterien, Pilzen) und untersucht einzelne Mutationsschritte. Diese Experimente können sinnvoll nur mit einer hohen Dosisleistung durchgeführt werden. Ebenso können Probleme der Prophylaxe und Therapie des Strahlenschadens nur mit hohen Intensitäten bewältigt werden. Schutzstoffe müssen unmittelbar vor oder nach einer Bestrahlung eingesetzt werden, die eine bestimmte Dauer nicht überschreiten darf. Ferner ist von elementarem Interesse zu wissen, ob eine konzentrierte Bestrahlung eine andere Wirkung als eine verdünnte aufweist. Dies gilt für sämtliche Strahleneffekte.

b) Kontinuierliche Bestrahlung mit hohen Energien. Bis anhin standen für Elektronen hoher Energie Therapiegeräte mit gepulster Strahlung zur Verfügung. Die Experimente ergaben in vielen Fällen eine relative biologische Wirksamkeit unter 1, d. h. die energiereichere Strahlung erwies sich mit gleichen Ionisationsdosen als die weniger wirksame. Dieses Phänomen kann unter anderem durch die diskontinuierliche Bestrahlung zustande kommen. Eine definitive Abklärung ist erst möglich, wenn eine kontinuierliche Bestrahlung verwendet werden kann, wie sie in dem Elektronenbeschleuniger produziert wird.

c) Hohe Energie. Auf dem gesamten Gebiet der Strahlenbiologie könnten mit dieser Apparatur Beziehungen: Effekt — Ionisationsdichte untersucht werden.

2.4.2 Praktische Anwendung

a) Sterilisationsverfahren. Zur Schädlingsbekämpfung, Sterilisation und Haltbarmachung von Lebensmitteln hat sich die ionisierende Strahlung als wirksames Mittel erwiesen. Da sich die Schädlinge, seien es Insekten oder Mikroorganismen, durch eine grosse Strahlenresistenz auszeichnen, sind hohe Dosen, die zum Teil 200 000 r übersteigen, erforderlich.

Von Interesse sind ferner die Feststellungen, dass Reifungsvorgänge in Früchten gefördert werden können, dies auch nur mit hohen Dosen. Zur Schädlingsbekämpfung (Insekten) hat sich eine weitere Methode günstig gezeigt, nämlich Sterilisierung der Keimdrüsen. Auch hier muss mit relativ hohen Dosen bis 50 000 r gearbeitet werden. Realisiert werden, können diese Nutzanwendungen nur mit einer Apparatur hoher Strahlenleistung, wie sie in dem 2...3-MeV-Elektronenbeschleuniger zur Verfügung stehen würden.

b) Herstellung neuer Pflanzensorten. Der Agronome bedient sich heute der künstlichen Mutationsauslösung durch Röntgenstrahlen, um neue günstige Mutationen von Getreide, Futterpflanzen, usw. heranzuzüchten. Auch auf diesem Gebiete werden hohe Strahlendosen erfordert, die in kurzer Zeit verabreicht werden müssen.

Aus den erwähnten Gründen wäre es vom biologisch-medizinischen Standpunkt aus zu begrüssen, wenn ein 2...3-MeV-Elektronenbeschleuniger hoher Strahlenleistung angeschafft würde, um so mehr, da bislang keine Apparatur mit diesen Eigenschaften zur Verfügung stand.

2.5 Dosimetrie und Eichung [6])

Die Prüfung und Eichung von Strahlenmessgeräten, sowohl Dosimetern wie auch Dosisleistungsmessern wird unter dem Einfluss der Strahlenschutzverordnung und im Hinblick auf die Verwendung solcher Apparate in der Armee und im Zivilschutz eine gewisse Bedeutung erlangen. Für bestimmte Messgeräte wird sogar eine Prüfpflicht zu erwarten sein.

Darüber hinaus werden mit steigender Anwendung ionisierender Strahlen in Industrie und Technik gerade bei hohen Dosen und Dosisleistungen spezielle dosimetrische Probleme auftreten, die oft von Fall zu Fall studiert und ausprobiert werden müssen.

Zur Beurteilung, wie weit eine Strahlenquelle, die in erster Linie der Materialprüfung und Materialbehandlung dient, auch für die Aufgaben der Dosimetrie, der Instrumentenprüfung und -eichung herangezogen werden könnte, seien im folgenden einige Überlegungen angestellt. Auf die Prüfung mit Strahlen der Quanten- und Teilchenenergie bis etwa 0,5 MeV braucht dabei nicht eingegangen zu werden.

Ganz allgemein sind dosimetrische Probleme ziemlich komplex und heikel. Dies ist einerseits auf die verschiedenen Dosis- und Dosisleistungs-Definitionen, anderseits auf die messtechnischen Schwierigkeiten zurückzuführen. Besonders gross sind sie in gewissen Bereichen der Neutronen-Dosimetrie. Aber auch die Dosismessung im Falle der Quanten und Elektronenstrahlung bietet oberhalb einer Energie von etwa 3 MeV viele Probleme, weil hier die Definition der Expositionsdosis, die den gebräuchlichen Strahlungsmessgeräten zu Grunde liegt, nur noch beschränkt gilt. Während man für grosse Dosen und Dosisleistungen auch in diesem hohen Energiebereich auf die Absorptionsdosis-Definition zurückgreifen kann, so dass sich wenigstens keine prinzipiellen Schwierigkeiten bieten (kalorimetrische Messung der absorbierten Energie), steht für die Messung kleiner und mittlerer Dosen, wie

[5]) Verfasserin dieses Abschnittes ist Prof. Dr. *Hedi Fritz-Niggli*, Strahlenbiologisches Laboratorium des Kantonsspitals, Zürich.

[6]) Verfasser dieses Abschnittes ist Dr. phil. nat. *H. Schindler*, Sekretär der SBK, Zürich.

sie für die Bedürfnisse des Strahlenschutzes und der Röntgentherapie auftreten, keine unbestrittene Methode zur Verfügung. Nun ist die Abklärung dieser Probleme zwar Sache der messtechnischen Grundlagenforschung, an der viele Fachgelehrte und grosse Institute arbeiten. Anderseits ist es aber auch von gewissem nationalem Interesse, die Ergebnisse dieser Forschungen wenigstens ausnützen zu können, stehen doch in unserem Lande in Spitälern und in der Industrie (Röntgenographische Materialuntersuchung) eine ganze Reihe von Einrichtungen, die mit Teilchenenergien bis zu etwa 30 MeV (Betatron) arbeiten, im Gebrauch.

Bei der Primärstrahlung von Kernwaffen kommen, wenn auch im Verhältnis zur gesamten Strahlung bloss zu einem kleinen Prozentsatz, ebenfalls Quantenenergien von über 3 MeV bis gegen 10 MeV vor, so dass u. U. für Typenprüfungen von Strahlenmessgeräten der Armee und des Zivilschutzes eine geeignete Eichstrahlenquelle in diesem Energiebereich wünschenswert wäre.

Es kann daher gesagt werden, dass eine Eichstrahlenquelle für Elektronen- und Quantenstrahlung im Energiebereich von 3...50 MeV gestatten würde, gewisse dosimetrische Aufgaben zu lösen, die bereits jetzt und vermehrt noch in der Zukunft von einiger praktischer Bedeutung sind.

Die Anforderungen, welche an diese Eichstrahlenquelle zu stellen wären, sind etwa folgende:

a) Verwendbarkeit für Elektronen- und Quantenstrahlen;

b) Energiebereich der Teilchen und Quanten, einstellbar zwischen einigen MeV und etwa 50 MeV;

c) Energiespektrum bei Bedarf einigermassen monoenergetisch, auch für Quantenstrahlung;

d) Erzielbare Dosisleistungen von einigen mrad/h bis etwa 100 rad/min, also verglichen zu den Anforderungen der Materialprüfung verhältnismässig kleine Leistungen;

e) Gute zeitliche und örtliche Konstanz der eingestellten Dosisleistung, wenn möglich nicht pulsierend.

Die hier geforderte hohe Teilchenenergie schliesst die Verwendung von Isotopen-Standard-Quellen aus, so dass nur ein Teilchenbeschleuniger als Strahlenquelle in Frage kommt. Welcher Art dieser Beschleuniger indessen am zweckmässigsten ist, ob Betatron, ob Linearbeschleuniger oder gar eine andere Konstruktion, kann nicht ohne sorgfältiges Studium gesagt werden. Wie weit sich die Anforderungen an einen Teilchenbeschleuniger für die Zwecke der Materialprüfung und für die erwähnten dosimetrischen Aufgaben überschneiden oder einander zuwider laufen, wird Gegenstand einer abschliessenden Betrachtung sein.

Die grundsätzliche Frage, ob und wie weit dosimetrische Zweckbestimmungen bei einer allfälligen Planung eines Beschleunigers für die Materialuntersuchung und Materialbehandlung berücksichtigt zu werden wünschbar sind, muss zu gegebener Zeit noch abgeklärt werden

3. Die physikalisch-technischen Grundlagen der für die Bestrahlungen geeigneten Beschleuniger[7])

3.1 Einleitung

Durch die Einwirkung von ionisierenden Strahlen können Veränderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften des bestrahlten Gutes beobachtet werden. Diese Effekte sollen im Mittelpunkt dieser Studien stehen. Ionisation kann direkt durch geladene Teilchenströme wie Elektronen oder Protonen, indirekt durch Neutronen und γ-Strahlen verursacht werden.

Die geladenen, beschleunigten Nukleonen haben auch bei hohen Energien nur eine kleine Reichweite im Material und sind zudem viel schwieriger zu produzieren als Elektronen. Bestrahlungen mit Neutronen geben meistens Anlass zur Produktion von Radioisotopen, die wegen ihrer Aktivität eine Messung der Materialeigenschaften erschweren. Daher ist die Anwendung von Elektronen die beste Lösung. Gammastrahlen wirken auch wieder über die Sekundärelektronen, nur ist die Verteilung der Ionisationsdichte in Abhängigkeit von der Eindringtiefe völlig anders. Während bei den Elektronen nach dem Durchlaufen der mittleren Reichweite eine recht scharfe Begrenzung der Ionisation vorliegt, fällt bei γ-Quanten die Ionisationsdichte beinahe exponentiell (im Bereich von $W\gamma \approx 1...5$ MeV) ab.

In praktisch allen Fällen ist die Ionisation proportional zu der absorbierten Leistung im Material.

Die Einheit der absorbierten Dosis ist das «rad». 1 «rad» entspricht 100 erg/g absorbierter Strahlung jeder Art.

$$1 \text{ Mrad} = 10 \text{ J/g} = 1{,}26 \text{ W h/lb} = 2{,}78 \text{ W h/kg}$$

Anders ausgedrückt: Bei einer Strahlleistung von 1 kVA kann 400-kg/h-Material mit einem Mrad bestrahlt werden.

Das «Curie» ist ein Mass für die Radioaktivität und entspricht $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle/s.

Die Energie einer ionisierenden Strahlung wird in «MeV» angegeben und die Leistung in MeV · Curie. ($1 \text{ MeV} \cdot 1 \text{ Curie} \approx 5{,}9 \cdot 10^{-3}$ W).

An einem Beispiel: Co^{60}-Quelle, kann man jetzt sehr einfach zeigen, dass leistungsmässig gesehen die natürlichen und künstlich angeregten Isotope schlecht liegen.

Co^{60} (Kobalt-60) zerfällt in einer γ-Kaskade, so dass pro 100 Zerfälle 100 Quanten mit einer Energie von $W\gamma = 1{,}17$ MeV und 100 Quanten mit einer Energie von $W\gamma = 1{,}33$ MeV emittiert werden. Für eine Leistung von 1 kW müsste man eine 68-kilocurie-Quelle bereitstellen. Damit kann sehr eindrücklich gezeigt werden, dass für eine ausreichende Leistung von 5...15 kW ungeheuer starke Co-Quellen bereit zu stellen sind, die praktisch nicht zu handhaben und zudem viel zu teuer wären. Damit beschränkt sich die Wahl für Strahlleistungen von 5...15 kVA auf Elektronenbeschleuniger.

Bestrahlungen im Neutronenfluss von Reaktoren oder mit der Reststrahlung von abgebrannten Füllstäben stehen aus verschiedenen Gründen, die teilweise ausgeführt wurden, hier ausser Diskussion. Um die Apparatur reichlich ausnützen zu können, ist die Möglichkeit der Umstellung des Elektronenbeschleunigers auf Nukleonenbeschleunigung in Betracht zu ziehen. In erster Linie interessiert die Neutronenerzeugung mit künstlich beschleunigten Teilchen, vornehmlich Deuteronen .

Beschleunigungsanlagen als Neutronenquelle haben folgende Vorteile: Es lassen sich mit guter Auflösung monoenergetische Neutronen jeder gewünschten Energie mit ausreichender Intensität für alle Experimente (10^{11} Neutronen/s in 4π) herstellen. Schliesslich besteht die Möglichkeit, durch Unterbrechung des Teilchenstromes die Quelle zu pulsen, wodurch Laufzeitmessungen möglich werden.

[7]) Verfasser dieses Abschnittes ist Prof. Dr. *P. Stoll*, Micafil AG, Zürich.

Unter Berücksichtigung dieses Gesichtspunktes: Umstellbarkeit von Elektronen auf Deuteronen wird die Auswahl der möglichen Apparate noch kleiner.

3.2 Möglichkeiten der Erzeugung von hohen kontinuierlichen Elektronen- bzw. Deuteronen-Strömen bei Energien von 1...3 MeV

Durch die Forderung nach kontinuierlichen Elektronenströmen und Energien bis zu 3 MeV mit Umstellmöglichkeit Elektronen/Nukleonen müssen die Linearbeschleuniger nicht diskutiert werden. Ebenso fallen die Bestrahlungsmöglichkeiten mit radioaktiven Elementen, die durch Neutronenbeschuss im Reaktor produziert werden können, aus verschiedenen Gründen (siehe Ziff. 3.1) dahin. Dazu gehören auch die Bestrahlungsmöglichkeiten mit abgebrannten Reaktorstäben. Ebenso werden die Möglichkeiten einer direkten Neutronen- bzw. γ-Bestrahlung am Reaktor nicht in diese Untersuchungen einbezogen.

Für diesen beschränkten Problemkreis kommen folgende Maschinentypen in Frage:

a) Cockcroft-Walton-Generator (Kaskadenbeschleuniger);
b) Resonanz-Transformator;
c) Elektrostatische Generatoren jeglicher Bauart.

Dazu sind folgende Kriterien massgebend: Strahlungsleistung, Strahlungsenergie, Möglichkeiten der doppelseitigen Bestrahlung, Kosten pro kW-Strahlleistung und Schätzungen über Betriebskosten.

3.2.1 Strahlungsleistung

Die erforderliche Strahlungsleistung kann sehr einfach abgeschätzt werden, wenn das konkrete Bestrahlungsproblem vorliegt. Mit einer Leistung von 1 kVA können 400 kg Material pro Stunde mit einer Dosis von 1 Mrad versehen werden. Anzustreben ist bei einer modernen Maschine unbedingt eine Leistung von 5...10 kW.

3.2.2 Strahlungsenergie

Für praktische Anwendungen kann die optimale Elektronenenergie für eine gegebene Schichtdicke und Material nach folgender Formel ausgerechnet werden.

$$W_{[\mathrm{MeV}]} = 0{,}3\ \varrho_{[\mathrm{g/cm^3}]}\ d_{[\mathrm{mm}]}$$

Beispiel: $W = 2$ MeV $\rho = 1$ g/cm³ (Wasser)

$$d \approx 7 \text{ mm}$$

In diesen Fällen, berechnet nach vorerwähnter Handformel, ist die höchste Dosis nur 25% grösser als die kleinste Dosis (homogene Durchionisierung).

Diese Schichtdicken müssen daher für uniforme Bestrahlung gewählt werden.

3.2.3 Doppelseitige Bestrahlung

Durch die Dosis-Kurve bei monochromatischen Elektronen ist der Ausnutzungsfaktor bei einseitiger Bestrahlung 0,6, bei doppelseitiger Bestrahlung 0,8. Diese Tatsache ist leicht verständlich, wenn man bedenkt, dass sich bei doppelseitiger Bestrahlung die Dosisverteilungskurven überlappen und damit auch die Randgebiete benutzbar sind. Für Doppelbestrahlungen kommen in der Regel nur Maschinen mit horizontaler Strahlachse zum Einsatz. Die Möglichkeit einer allfälligen Strahlumlenkung in Magnetfeldern ist mehrfach studiert worden. Auch in diesem Fall ist es weit einfacher, kontinuierliche Teilchenströme abzulenken.

3.2.4 Kosten pro kW-Strahlleistung

Die Kostenstruktur lässt sich heute nur abschätzen und hängt stets stark von den grossen einmaligen Investitionskosten einer Apparatur ab. Aus Tabelle I lassen sich die approximativen Kosten pro kW angeben. Dabei beschränkt man sich im Vergleich auf Elektronenenergien von 2 MeV.

Kostenstruktur

Tabelle I

Type	Teilchenart	Energie MeV	Mittlere Leistung kVA	Preis Fr.	Preis/kVA
Cockcroft-Walton-Generator (Kaskadenbeschleuniger)	e Nukleonen	2	10	600 000	60 000
Resonanz-Transformator	e	2	10	600 000	60 000
Elektrostatische Maschinen	e Nukleonen	2	0,5	330 000	660 000

Resonanz-Transformator und Cockcroft-Walton-Generator schneiden am besten ab, wobei der Resonanz-Transformator nur für Elektronenbeschleunigung brauchbar ist. Die Elektrostatischen Maschinen sind in Bezug auf Strom zu wenig entwickelbar. Es sind Anstrengungen beispielsweise durch Einfügen von Mehrfachbändern gemacht worden. In Bezug auf Betriebssicherheit sind Maschinen ohne rotierende Teile vorzuziehen.

Während sich die Kapitalkosten und die Betriebskosten (Energieverbrauch, Unterhalt) einigermassen abschätzen lassen, entbehren Annahmen über die Amortisation und Kapitalverzinsung jeglicher Grundlage. Es ist auch nicht sehr sinnvoll, in der ersten Stufe des Experimentalbetriebes darüber zu sprechen.

Besonders zu beachten in der Kostenstruktur sind die Abschirmungsmassnahmen und der Strahlenschutz.

Ebenfalls unberücksichtigt in der Kostenstruktur sind alle besonderen Massnahmen für die Materialbestrahlungen. Am einfachsten sind Flüssigkeiten zu behandeln. Man pumpt diese durch die Bestrahlungskammern. Filme und Kabel laufen auf Rollen vor dem Lenard-Fenster vorbei. Noch besser ist ein Vakuum-Einschub-System, in dem ohne Mühe auch mehrere Filmschichten oder Kabel von der Atmosphäre in das Hochvakuum befördert werden können. Feste Gegenstände erfordern Transportbänder. Für eine gute Ausnützung des Strahles auf dem Bestrahlungsgut ist eine Strahl-Führung und Verteilung notwendig. Bei kleineren Energien bis zu 3 MeV genügen elektrostatische Ablenksysteme. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von magnetischen Quadripollinsen gleicher Polarität. Darin unterscheidet sich dieses System von der sog. «starken Fokussierung», wie sie in grossen Kreisbeschleunigern angewendet wird.

Der Effekt besteht darin, dass ein Elektronenstrahl in der x-Ebene nicht geändert wird, dagegen in der y-Ebene auseinander geht.

3.3 Erzeugung von Elektronenströmen mit Energien über 3 MeV

Für die Produktion von Elektronen mit Energien grösser als 3 MeV kommt allerdings nur der Linear-Akzelerator in Frage.

In einer typischen Form werden die Elektronen durch Axialfelder, hervorgerufen durch Hochfrequenz-

wellen in einem besonderen Wellenleiter, beschleunigt. In neuester Zeit werden Hochleistungs-Klystrons verwendet, so dass die Ausgangsleistung gesteigert werden kann.

Nachteilig ist der Impulsbetrieb, der auch für eine genaue Dosismessung grosse Probleme aufwirft. Ebenfalls wird die Strahlumlenkung problematisch, da die Aufwendungen bei hohen Energien sehr stark steigen. Zur Zeit sind Geräte mit Energien von 7...10 MeV und Leistungen von 4...10 kW auf dem Markt, wobei Anschaffungskosten von 0,8...1,4 Millionen sFr. bekannt sind. Ist man besonders auf die Durchstrahlung von dicken Präparaten angewiesen, wird der Linear-Beschleuniger die günstige Lösung sein. Es herrscht aber bei der vorbesprechenden Unterkommission Einigkeit darüber, dass in der ersten Phase mit einem kontinuierlichen Elektronenstrahl gearbeitet werden soll. Denn prinzipielle Effekte können ebensogut an dünneren Schichten studiert werden und bei gleichen Leistungsstärken sind naturgemäss die pro cm^3-Material möglichen Höchstdosen pro Zeiteinheit grösser.

3.4 Schlussfolgerungen

Beschränkt man sich auf Elektronen-Energien von 1...3 MeV, so kommen nur noch die Beschleuniger vom Typ Cockcroft-Walton-Generator oder Resonanz-Transformator in Frage. Bei der Beibehaltung der Forderung auf Umstellbarkeit von Elektronen auf Nukleonen fällt der Resonanz-Transformator aus der Betrachtung. Die Begründungen für eine Energiebeschränkung sind eingehend in den vorhergehenden Kapiteln besprochen worden. Ein weiteres Argument ist auch durch die Vielseitigkeit der Anwendung gegeben. Es ist zu beachten, dass sämtliche beauftragten Stellen noch über keinerlei Erfahrung in der Handhabung und Experimentaltechnik von Elektronenbeschleunigern verfügen. Es zeigt sich aber oft, dass die Auswertung eines Experimentes an einer ungenügenden Dosimetrie scheitert. Kleine Energien bis zu 3 MeV und bei kontinuierlichen Strömen sind aber leichter zu beherrschen. Man darf dieses Argument nicht hoch genug veranschlagen.

Resonanz-Transformatoren werden zur Zeit nur von einer Firma in den USA mit unbekanntem Erfolg eingesetzt. Für die Schweiz drängt sich daher ein Kaskadengenerator (Cockcroft-Walton) mit einer Strahlleistung von 5...10 kW auf.

Die Anordnung sollte unbedingt horizontal sein, damit man bequem ohne Strahlumlenkung experimentieren und für später einen Zweistrahlbetrieb vorsehen kann.

Es besteht durchaus die Möglichkeit, zwei Schweizer Firmen, die bereits Beschleuniger auf dieser Basis bauen, für die nötigen Entwicklungsarbeiten zu interessieren.

4. Zusammenfassung

4.1 Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass ein Teilchenbeschleuniger hoher Strahlleistung neben der Materialprüfung in erster Linie in der Kunststoffchemie und in der Biologie sowie ihren Anwendungsgebieten interessante Möglichkeiten eröffnet. Von gewissem Interesse sind darüber hinaus Anwendungen in der Textil- und Lebensmittelindustrie, sowie bei der Lösung von dosimetrischen Problemstellungen.

4.2 Als Strahlenarten für diese Anwendungen stehen Elektronenstrahlen und harte Röntgenstrahlen im Vordergrund.

4.3 Die Strahlleistung, die zur Verfügung stehen sollte, beträgt 5...10 kVA.

4.4 Die Strahlhärte muss einige MeV betragen.

4.5 Als Strahlenquelle, die diesen Bedingungen genügt, kommt nur ein Teilchenbeschleuniger in Frage. Unter den drei Bauarten Cockcroft-Walton-Generator, Resonanz-Transformator und elektrostatischer Maschine (z. B. Van de Graaff) steht nach den Ausführungen unter Ziff. 3 der Cockcroft-Walton-Generator hinsichtlich Leistung, Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund. Er gestattet zudem die Beschleunigung von Elektronen wie auch von geladenen Nukleonen.

4.6 Wenn man die in der Schweiz bestehenden Möglichkeiten überprüft, so kommt man zur Feststellung, dass für die genannten Anwendungen keine geeignete Strahlenquelle zur Verfügung steht. Es dürfte schwierig sein, auch bloss ausnahmsweise und behelfsmässig eine der bestehenden Möglichkeiten nutzbar zu machen. Am ehesten können wohl Bestrahlungsaufträge beim Eidg. Institut für Reaktorforschung untergebracht werden. Aber gerade auch von dieser Seite wird das Bedürfnis nach einer für die Materialprüfung und Materialbehandlung besonders gebauten und geeigneten Strahlenquelle unterstrichen. Es ist daher durchaus gerechtfertigt, ein Projekt für die Errichtung einer allgemein zugänglichen Strahlenquelle für die beschriebenen Aufgaben einer näheren Prüfung zu unterziehen.

4.7 Eine vorläufige Abschätzung der Kosten für die Anschaffung und Aufstellung eines solchen Teilchenbeschleunigers ergibt etwa folgendes:

Der Beschleuniger selber kommt auf ca. Fr. 600 000 zu stehen. Dazu kommen die Aufwendungen für die nötigen Räumlichkeiten, wobei beträchtliche Kosten für die Strahlenschutzmassnahmen zu erwarten sind. Ebenfalls an die Laboratoriumseinrichtungen für die Untersuchung der Wirkungen an den bestrahlten Proben ist zu denken. Die Gesamtkosten dürften sich daher zwischen 1,2...1,5 Millionen Franken bewegen.

In verschiedenen Beziehungen könnte es Vorteile mit sich bringen, wenn der Beschleuniger in einem bestehenden Institut aufgestellt werden könnte. Die Möglichkeiten dazu sind sicher vorhanden.

4.8 Es ist der Zweck der vorliegenden Studie, den potentiellen Benützern die Unterlagen zu liefern, um die Anwendungsmöglichkeiten in ihrem Interessenbereich abzuschätzen.

Die Berichterstatter sind der Überzeugung, dass es an Problemen und Aufgaben nicht mangeln wird, wenn die interessierten Kreise bereit sind, nicht nur materiell, sondern auch mit ihrer Erfahrung und ihren Sonderkenntnissen mitzuarbeiten.

Der Zeitpunkt für die Errichtung eines Elektronenbeschleunigers für die Materialuntersuchung und die Materialbehandlung ist nicht ungünstig. Verschiedene Einsatzverfahren sind bereits industriereif, andere warten noch der endgültigen Bereinigung, neue werden auftauchen. Es gilt, den Anschluss an die Entwicklung auch auf diesem Gebiet rechtzeitig vorzunehmen. Die Bereitstellung eines allgemein zugänglichen Beschleunigers wäre der erste Schritt in dieser Richtung.