

Lebensmittelbestrahlung*

Helmar Schubert und Dieter Ehlermann**

Durch Behandlung mit ionisierenden Strahlen können Haltbarkeit und hygienische Beschaffenheit von Lebensmitteln verbessert werden. Bis zu einer Dosis von 10 kGy gilt das Verfahren als gesundheitlich unbedenklich. In vielen Ländern beobachtet man eine ständige Zunahme der Lebensmittelbestrahlung, während diese in der Bundesrepublik Deutschland weiterhin verboten ist. In dieser Übersicht werden Anwendungen und Verfahren der Lebensmittelbestrahlung zusammengestellt, Grenzen und Möglichkeiten aufgezeigt sowie Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlichen Verfahren diskutiert. Die derzeitigen Möglichkeiten einer nachträglichen Identifizierung bestrahlter Lebensmittel sowie Methoden zur Dosimetrie und Prozeßkontrolle werden erläutert. Für die kontinuierliche Bestrahlung von Schüttgütern ist die Verwendung von Elektronen aus Maschinenquellen besonders interessant. Die Kenndaten des Beschleunigers und die örtliche Geschwindigkeitsverteilung im Schüttgut beim Durchqueren der Bestrahlungszone können so aufeinander abgestimmt werden, daß die Dosisverteilung möglichst homogen wird und zugleich die Strahlungsenergie möglichst vollständig absorbiert wird. Am Beispiel einer Anlage zur Bestrahlung von Getreide und Gewürzen als Schüttgut werden die Einzelheiten diskutiert. Die Gewürzbestrahlung ist von besonderem Interesse als Alternative zur verbotenen chemischen Behandlung.

Irradiation of food. Processing of food with ionizing radiation is a method suitable to enhance shelf-life and hygienic quality. Up to a dose of 10 kGy the method is considered wholesome. In many countries the practical use of food irradiation is increasing, however, in the Federal Republic of Germany the process is strictly forbidden. Applications and methods for radiation processing of food are compiled, limits and prospects are explained, and advantages and disadvantages are compared with traditional methods. Identification of irradiated foods and dosimetry and process control for radiation processing of food are areas where further research is needed. Continuous processing of particulate foods in bulk is an application where electron accelerators might be profitable. Beam parameters and velocity distribution of food particles in the treatment area can be matched for an effective result. Thus, dose distribution can be adjusted for homogeneous treatment and at the same time radiation energy is absorbed almost completely. An example of an experimental plant for radiation processing of grain and spices is shown. Decontamination of spices by radiation processing is an alternative to chemical fumigation, which now is widely forbidden.

1 Einleitung

Ionisierende Strahlen sind dadurch gekennzeichnet, daß ihre Quantenenergie ausreicht, Bindungen in Molekülen aufzubrechen. Dieser Sachverhalt wurde zuerst als Ionisierung in einer luftgefüllten Meßkammer entdeckt und gab daher der Strahlenart den Namen. Schon sehr früh nach der Entdeckung der Radioaktivität (1895 durch *Röntgen* die Bremsstrahlung, 1896 durch *Becquerel* die natürliche Radioaktivität) wurde die mikrobizide Wirkung ionisierender Strahlung und ihre Wirkung auf Lebensmittel beschrieben; das erste Patent zur Strahlenbehandlung von Lebensmitteln wurde 1930 in Frankreich erteilt. Eine gezielte und koordinierte Erforschung begann jedoch erst nach 1950. Seitdem dürften rund 10 000 wissenschaftliche Arbeiten über die Technik der Lebensmittelbestrahlung, über ausgelöste chemische und physikalische Veränderungen und über die Prüfung der gesundheitlichen Auswirkungen bestrahlter Lebensmittel erschienen sein. Auf einige zusammenfassende Publikationen sei an dieser Stelle in der Zeitfolge ihres Erscheinens verwiesen [1–8].

Im Jahre 1959 kam es in Deutschland zur Weltpremiere der

kommerziellen Bestrahlung von Lebensmitteln, und zwar der Bestrahlung von Gewürzen zur Reduzierung der Belastung mit Mikroorganismen. Durch das geänderte Lebensmittelgesetz wurde die Bestrahlung bereits 1960 verboten. Dieses Verbot einschließlich des Imports bestrahlter Lebensmittel besteht in der Bundesrepublik Deutschland bis heute. Nachdem in Jahre 1980 ein Internationales Expertenkomitee der Weltgesundheitsorganisation, der Welternährungsorganisation und der Internationalen Atomenergieorganisation (WHO, FAO, IAEA) bestrahlte Lebensmittel unter Beachtung einer festgelegten Grenzdosis als gesundheitlich unbedenklich eingestuft hat [9], hat sich die Zahl der Zulassungen bestrahlter Lebensmittel in vielen Ländern der Erde ständig erhöht. Die intensive Forschungstätigkeit der letzten 25 Jahre hat zu einer Verfeinerung der Bestrahlungsmethoden für Lebensmittel geführt [8]. Die neueren Entwicklungen auf diesem Gebiet sind auch für Entwicklungsländer interessant [10], denen andere Methoden nicht zur Verfügung stehen. Aber auch in den weiterentwickelten Ländern gibt es als Alternative oder Ergänzung zu konventionellen Verfahren aussichtsreiche Anwendungen [4], so die Bekämpfung von Salmonellen und ähnlichen Mikroorganismen in tiefgefrorenen Produkten, ohne diese auftauen zu müssen.

2 Strahlenquellen für die Lebensmittelbestrahlung

Von der Vielzahl ionisierender Strahlen – sowohl als Teilchen- wie auch als Wellenstrahlung – kommt nur ein kleiner Teil für die Lebensmittelbestrahlung in Frage. Einerseits muß

* Vortrag von H. Schubert auf dem Jahrestreffen der Verfahrens-Ingenieure, 30. Sept. bis 2. Okt. 1987 in Freiburg.

** Prof. Dr.-Ing. H. Schubert, Institut für Verfahrenstechnik der Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Engesserstr. 20, 7500 Karlsruhe, und Institut für Lebensmittelverfahrenstechnik der Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, 7500 Karlsruhe, und Dipl.-Phys. D. Ehlermann, Institut für Verfahrenstechnik der Bundesforschungsanstalt für Ernährung, Engesserstr. 20, 7500 Karlsruhe.

sichergestellt sein, daß durch die ionisierenden Strahlen keine Radioaktivität im bestrahlten Produkt erzeugt wird; aufgrund dieser Forderung wurde die Quantenenergie auf $E \leq 5$ MeV bei Gamma-Quanten und $E \leq 10$ MeV bei Elektronen festgelegt [9]. Andererseits sollte die Quantenenergie der Strahlen ausreichend groß sein, um eine genügende Eindringtiefe zu ermöglichen. Ferner sollte im Falle der Verwendung von künstlichen Radioisotopen die Halbwertszeit möglichst groß sein. Aufgrund dieser Bedingungen sowie aus Kostengründen stehen für die ionisierende Bestrahlung von Lebensmitteln lediglich folgende Quellen zur Verfügung:

- a) Gamma-Strahlung von künstlichen Radioisotopen
 - Kobalt-60 (Co-60): 2 Quanten mit 1,17 und 1,33 MeV; Halbwertszeit $t_{1/2} = 5,27$ a.
 - Cäsium-137 (Cs-137): 1 Quant mit 0,66 MeV; $t_{1/2} = 30$ a.
- b) Elektronen bis maximal 10 MeV, erzeugt in Beschleunigern (z. B. Elektronen-Linearbeschleunigern).
- c) Röntgenstrahlung bis maximal 5 MeV, erzeugt durch Abbremsen energiereicher Elektronen.

Bei Co-60 und Cs-137 kann aufgrund der geringen Quantenenergie der Strahlung auch nach beliebig langer Bestrahlung keine Radioaktivität im Lebensmittel erzeugt werden. Um eine induzierte Radioaktivität mit Sicherheit auch bei Elektronen- und Röntgenstrahlung auszuschließen, werden für die Lebensmittelbestrahlung nur solche Geräte verwendet, bei denen die angegebenen maximalen Energien bauartbedingt nicht überschritten werden können.

Die am weitesten verbreitete Strahlenquelle, die zugleich für die Sterilisierung medizinischer Einwegartikel und Pharmaprodukte kommerziell fast ausschließlich eingesetzt wird, ist Co-60. Dieses wird in speziellen Kernreaktoren durch Neutronenbeschuß aus Kobalt-59 erzeugt. Dagegen ist Cs-137 ein Nebenprodukt aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente von Kernreaktoren. Zur Zeit ist jedoch Cs-137 praktisch nicht verfügbar. Wegen des zunehmenden Bedarfs an industriellen Bestrahlungsanlagen und der Knappheit des lieferbaren Co-60 werden zunehmend Elektronenbeschleuniger eingesetzt, vorwiegend zur Produktveredelung in der chemischen Industrie (Kunststoffvernetzung, Schrumpffolien), zur Lackhärtung und zur Kabelisolierung. Röntgenanlagen haben sich wegen des geringen Wirkungsgrades und damit vergleichsweise hohen Energieverbrauchs in der Praxis nicht durchsetzen können.

Werden als Strahlenquelle Radioisotope eingesetzt, so müssen sie ausreichend umhüllt sein, um jeglichen Kontakt mit den Lebensmitteln ausschließen zu können. Üblich ist eine doppelte Einkapselung der Gammaquelle in Zirkonium und rostfreiem Stahl in Form von Stäben, die zu großflächigen Rahmen zusammengesetzt werden. Da Radioisotope im Gegensatz zu Bestrahlungsmaschinen nicht ausgeschaltet werden können, versenkt man sie meist zur Abschirmung in ein tiefes Wasserbecken, wenn der Bestrahlungsraum zu Wartungs- oder Reparaturzwecken betreten werden muß. Der große Vorteil von Bestrahlungsmaschinen liegt darin, daß kein Umgang mit radioaktivem Material und keine damit verbundenen Sicherheitsvorkehrungen erforderlich sind. Da es sich um ionisierende Strahlen handelt, entsteht in der umgebenden Luft Ozon, das aus dem Bestrahlungsraum abgesaugt werden muß. Selbstverständlich muß der Bestrahlungsraum durch geeignetes Material bzw. dicke Wände nach außen ausreichend abgeschirmt sein, und es müssen sehr aufwendige weitere Schutzmaßnahmen und Meßvorrichtungen vorgesehen werden, wie sie entsprechend bei kerntechnischen Anlagen aus Sicherheitsgründen vorgeschrieben sind. Der Grund für diese Maßnahmen liegt in den notwendigen Dosiswerten, die bei der Lebensmittelbestrahlung erforderlich sind, um das gewünschte

Ziel (z. B. die Abtötung von Mikroorganismen) erreichen zu können. Je höher eine biologische Gattung entwickelt ist, bei desto niedrigeren Strahlendosen tritt i. a. eine Schädigung ein. Eine Ganzkörperdosis von nur 6 Gy führt beim Menschen zum Tode, während zur Eliminierung besonders widerstandsfähiger Mikroorganismen Dosiswerte zwischen 25 und 50 kGy erforderlich sind.

Die Stärke einer Strahlungsquelle wird durch die *Aktivität* (bei Radioisotopen) bzw. durch die *Strahlleistung* (bei Elektronen) gekennzeichnet. Die Aktivität A ist die Anzahl der radioaktiven Zerfälle im Zeitintervall; die Maßeinheit ist die reziproke Sekunde mit dem speziellen Namen „Becquerel“ (Bq), $1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$. Aufgrund der oben angegebenen Energien der ausgesendeten Quanten und der Umrechnung

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

gilt für

$$\text{Co-60} : 1 \text{ kW} \triangleq 2,5 \times 10^{15} \text{ Bq} \quad ;$$

$$\text{Cs-137} : 1 \text{ kW} \triangleq 9,5 \times 10^{15} \text{ Bq} \quad . \quad (1)$$

Damit ist ein Vergleich mit der Strahlleistung z. B. eines Linearbeschleunigers (1 kW bei 10 MeV und 0,1 mA) möglich. Bei den Beziehungen (1) wurden Verluste durch Absorption im Radioisotop sowie im Hüllmaterial nicht berücksichtigt. Diese Verluste können durch einen Wirkungsgrad, der in der Praxis bei $\eta_1 = 0,85$ bis $0,95$ liegt, erfaßt werden. Wegen der Selbstabsorption und der begrenzten spezifischen Aktivität der Radioisotope ist die Quellstärke in der Praxis auf 10^{17} Bq begrenzt.

Maßgeblich für die Strahlenwirkung auf biologisches Material ist die *Dosis* D , die als absorbierte Energie pro Massenelement definiert ist. D hat die Maßeinheit 1 J/kg ; der spezielle Name dieser Maßeinheit ist „Gray“ (Gy), $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. In der Praxis hat die über das Volumen eines bestrahlten Lebensmittels gemittelte Dosis

$$\bar{D} = \frac{1}{m} \int_V \rho(x,y,z) D(x,y,z) dV \quad (2)$$

Bedeutung. Hierin sind:

m = Gesamtmasse des bestrahlten Produkts,
 ρ = örtliche Dichte des Produkts am Punkt (x,y,z) ,
 D = am Punkt (x,y,z) absorbierte Ortsdosis,
 dV = differentielles Volumenelement ($dx dy dz$).

Maßgeblich für die Dauer einer Bestrahlung bis zum Erreichen der gewünschten Dosis ist die *Dosisleistung*

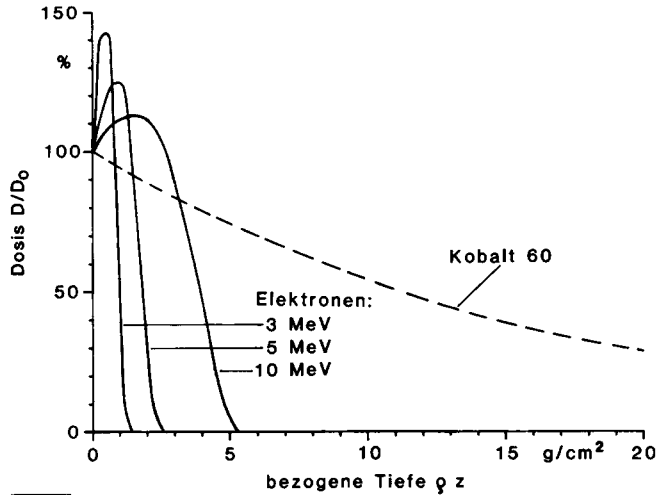
$$\dot{D} = dD/dt \quad (3)$$

einer Quelle. Einige Beispiele für Dosisleistungen sind:

- Linearbeschleuniger für Elektronen, 10 MeV, 10 kW etwa 10^6 Gy/s (bei günstiger Strahlenausnutzung),
- Labor-Kobalt-Quelle mit Co-60, 6×10^{14} Bq als Punktquelle etwa 0,6 Gy/s (in 0,3 m Abstand) bzw. etwa 0,06 Gy/s (in 1,0 m Abstand),
- kommerzielle Bestrahlungsanlage für medizinische Artikel mit Co-60, 4×10^{16} Bq als Flächenquelle etwa 1 Gy/s (in 1,0 m Abstand).

Hieraus wird ersichtlich, daß die Bestrahlungsdauer für die bei Lebensmitteln in Frage kommende Dosis $D \leq 10$ kGy beim Elektronen-Linearbeschleuniger i. a. in der Größenordnung von Sekunden oder darunter liegt, bei einer Bestrahlung mit Radioisotopen dagegen im Bereich von Stunden und darüber.

Die aufgeführten Strahlenquellen unterscheiden sich erheblich in ihrem Eindringvermögen durch Materie. Abb. 1 zeigt die relative Dosis für Elektronen und Kobalt-60 in Abhängigkeit von der bezogenen Tiefe, die zweckmäßigerweise als Produkt aus Dichte des Lebensmittels und der Eindringtiefe angegeben wird. Bei Elektronenstrahlung gibt es zu jeder Nenn-



B 5390.1

Abb. 1. Verlauf der Tiefendosis für die Strahlung von Kobalt-60 und für Elektronen verschiedener Energie; für Wasser mit $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ gibt die Skala auch die Tiefe z in cm an.

energie eine maximale Reichweite, die bei 10 MeV Elektronen in Wasser bei etwa 4,5 cm liegt. Hinter dieser Tiefe tritt im Produkt nur noch Bremsstrahlung auf, deren Anteile bei Lebensmitteln aber wegen der geringen mittleren effektiven Kernladungszahl vernachlässigbar klein ist. Der Anstieg der Dosis unmittelbar nach Eintritt der Elektronenstrahlen in das Material ist auf das Entstehen von Sekundärelektronen zurückzuführen. Abb. 1 gibt die Verhältnisse für den kollimierten, engen Strahl wieder, während bei der praktischen Anwendung mit einem nicht kollimierten, weiten Strahl eine günstigere Tiefendosisverteilung erreicht werden kann. Ein wesentlich größeres Eindringvermögen hat die Kobalt-60-Strahlung, die als Wellenstrahlung nach der Beziehung

$$\frac{D}{D_0} = \exp(-\mu z) = \exp(-\mu_1 \rho z) \quad (4)$$

exponentiell abgeschwächt wird. Das Ausmaß der Schwächung wird vom linearen Schwächungskoeffizienten μ gekennzeichnet. Dieser wird im interessierenden Energiebereich im wesentlichen von der Dichte ρ des Materials und wenig von der Kernladungszahl des Gutes und der Quantenenergie der Strahlung bestimmt, so daß der Massenschwächungskoeffizient μ_1 in Gl. (4) annähernd konstant ist ($\mu_1 = 0,064 \text{ cm}^2/\text{g}$ für Wasser, $\mu_1 \approx 0,062 \text{ cm}^2/\text{g}$ für biologisches Material). Bei Schüttgütern beziehungsweise porösen Lebensmitteln ist in Gl. (4) statt ρ die Schüttgutdichte einzusetzen. Bei den in der Praxis üblichen großflächigen Strahlenquellen ergibt sich wiederum eine günstigere Tiefendosisverteilung als im engen kollimierten Strahl, der der Abb. 1 zugrunde liegt. Die anschauliche Halbwertsschichtdicke, also die Dicke eines schichtdurchstrahlten Gutes, hinter der die verbleibende Strahlungsenergie auf die Hälfte abgesunken ist, erhöht sich so von dem theoretischen Wert bei Wasser von 10,8 cm auf knapp 30 cm.

Röntgenstrahlung ist ein Gemisch von Gammastrahlung aller Wellenlängen bis zu einer maximalen Quantenenergie, die

der Energie der abgebremsten Elektronen entspricht. Die Röntgenstrahlung der höchstens anwendbaren Energie von 5 MeV ist etwas durchdringungsfähiger als die Strahlung von Kobalt-60. Da Röntgenanlagen zur industriellen Bestrahlung in diesem Bereich bisher keine praktische Bedeutung erlangt haben, sollen hier keine weiteren Einzelheiten erörtert werden.

3 Anwendungsbereiche der Lebensmittelbestrahlung, Vor- und Nachteile

Zur Herstellung von Lebensmitteln aus nicht direkt für den Verzehr geeigneten Rohstoffen, zur Haltbarkeitsverlängerung und zur Veredelung von Lebensmitteln existieren viele Methoden und Verfahren der Lebensmitteltechnik. Je nach Produkt, den örtlichen Gegebenheiten und den gewünschten Eigenschaften der Lebensmittel kommen nur bestimmte Methoden und Verfahren in Frage, die vielfach miteinander konkurrieren, wobei sich jedoch in einigen Fällen ein bestimmtes Verfahren als zweckmäßig oder als am günstigsten herausgestellt hat. Fast immer sind mit der Behandlung von Lebensmitteln neben den erwünschten auch unvermeidliche, unerwünschte Veränderungen verbunden, die meist auf physikalischen und chemischen bzw. enzymatischen Veränderungen beruhen. So werden beispielsweise beim Hitzepasteurisieren krankheitserregende Keime eliminiert, gleichzeitig laufen jedoch unerwünschte chemische Reaktionen ab wie der Abbau von Vitaminen. Es ist ein wesentliches Ziel der Lebensmitteltechnik, die unerwünschten Veränderungen in Lebensmitteln so klein wie möglich zu halten. Mit der Lebensmittelbestrahlung steht ein Verfahren zur Verfügung, das in einigen Anwendungsfällen helfen kann, diesem Ziel näher zu kommen.

Obwohl die Lebensmittelbestrahlung meist als ein neues Verfahren bezeichnet wird, sind ihre möglichen Anwendungen im Grundsatz seit über 25 Jahren entdeckt und beschrieben [1]. Der einsetzbare Dosisbereich umfaßt 4 Größenordnungen (Tab. 1). Die Stimulierung von Saatgut zum besseren Auskeimen erfordert noch niedrigere, die Abtötung der meisten Viren sowie die Inaktivierung von Enzymen wesentlich höhere Dosiswerte. Die international eingeführten Begriffe Radication und Radurisation können auch durch Strahlenpasteurisation, die Radapperisation als Strahlensterilisation ersetzt werden.

Die Hauptvorteile der Lebensmittelbestrahlung gegenüber konventionellen Verfahren sind:

- die geringe Temperaturerhöhung als Folge der Bestrahlung,
- das Fehlen eines Rückstands von chemischen Behandlungsmitteln sowie
- die Möglichkeit, auch verpackte Lebensmittel zu behandeln.

Die vernachlässigbare Temperaturbelastung eines Lebensmittels durch eine Bestrahlung selbst bei der empfohlenen Höchstdosis von 10 kGy ist aus Tab. 2 erkennbar. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, Lebensmittel auch im tiefgefrorenen Zustand zu pasteurisieren oder zu sterilisieren. Wegen der geringen Temperaturerhöhung ist die Lebensmittelbestrahlung ein besonders schonendes Verfahren. Wie bei jeder physikalischen Behandlung treten geringe chemische Veränderungen auf, die jedoch wesentlich geringer als beispielsweise bei einer Erhitzung sind. Es wurden jedoch in bestrahlten Lebensmitteln keine chemischen Verbindungen gefunden, die nicht auch bei anderen Verfahren der Lebensmittelbehandlung entstehen. Die Identifizierung bestrahlter Lebensmittel ist daher bis heute mit chemisch-analytischen Methoden nicht mit ausreichender Sicherheit möglich.

Tabelle 1.
Anwendungsbereiche der Lebensmittelbestrahlung.

Ziel	Dosisbereich [kGy]
<i>Dosisbereich bis 10 kGy</i>	
Keimungshemmung (Kartoffeln, Zwiebeln, Knoblauch)	0,01–0,15
Verzögerung der Reifung (Früchte und Gemüse)	0,1–1,0
Desinfestation (Abtötung von Schadinsekten bzw. Unterbindung ihrer Vermehrung in Cerealien, Trockenprodukten, Obst)	0,2–1,0
Radicidation (Eliminierung von Parasiten, pathogenen Organismen und Mikro- organismen, jedoch nicht Viren) Trichinen, Bandwurm u. ä. Salmonellen u. ä.	0,1–1,0 2,0–8,0
Radurisation (Reduktion der Belastung mit Verderb erregenden Mikroorganismen und dadurch Verbesserung der Haltbarkeit bei Fleisch, Fisch, Obst, Gemüse)	0,4–10,0
Beeinflussung technologischer Eigenschaften (erhöhter Saftertrag, leichtere Extrahierbarkeit, verkürzte Rehydrations- und Kochzeit)	1,0–10,0
<i>Dosisbereich über 10 kGy</i>	
Radappertisation (nahezu vollständige Eliminierung der den Verderb verursachenden Mikroorganismen bei Fleisch, Fisch, Backwaren u. ä.)	10–50
Inaktivierung der meisten Viren	50–200
Inaktivierung von Enzymen	50–1000

Tabelle 2.
Adiabate Temperaturerhöhung $\Delta T = D/c_p$ (D = Dosis, c_p = spez. Wärme) bei der Lebensmittelbestrahlung für $D = 10 \text{ kGy} = 10 \text{ kJ/g}$.

Stoff	c_p [J/g K]	ΔT [K]
Wasser	4,2	2,4
Fett	2,3–1,9	4,3–5,3
Protein	1,6	6,3
Kohlenhydrat	1,4	7,1
Polyethylen (HD)	2,5	4,0
Aluminium	0,9	11,1
Glas	0,8	12,5

Aufgrund des an zweiter Stelle genannten Hauptvorteils stellt die Bestrahlung eine Alternative zur chemischen Behandlung von Lebensmitteln dar. Insbesondere in den Fällen, in denen die früher übliche chemische Behandlung inzwischen verboten wurde und andere konventionelle Verfahren nicht zur Ver-

fügung stehen, kommt die Lebensmittelbestrahlung in Betracht.

Ein besonderer Vorteil ergibt sich aus der Möglichkeit, Lebensmittel in verpacktem Zustand auch unter Vakuum oder modifizierter Atmosphäre zu bestrahlen. Zu beachten ist jedoch die Eindringtiefe der Strahlen, die insbesondere bei der Elektronenbestrahlung begrenzt ist (Summe aus Packungshöhen mal Dichte $\leq 3,5 \text{ g/cm}^2$). Als ausreichend strahlenresistente Verpackungstoffe steht eine Vielzahl von Materialien wie Glas, Blech, Papier, Pappe, strahlenresistente Kunststoffe wie Polyethylen, Polystyrol, Kautschuk, Silicon zur Verfügung [11, 12]. Bei Verbundpackstoffen und Kunststoffen mit Stabilisatoren und Weichmachern sollte zuvor geprüft werden, ob sie sich bei der Bestrahlung von Lebensmitteln eignen.

Ein weiterer Vorteil der Bestrahlung ist in einigen Anwendungsfällen (Tab. 1) die Haltbarkeitsverlängerung von Lebensmitteln ohne spezielle Anforderungen an die nachfolgende Lagerung. Dieser Vorteil ist für Entwicklungsländer von Interesse, denen es an den nötigen technischen Einrichtungen wie beispielsweise Kühl- und Gefrierketten fehlt.

Die Hauptnachteile der Lebensmittelbestrahlung liegen in der

- mangelhaften Verbraucherakzeptanz und den
- vergleichsweise hohen Kosten des Verfahrens.

Hierzu werden nähere Erläuterungen in den Kap. 8 und 10 gegeben. Ein weiterer Nachteil der Lebensmittelbestrahlung ist der eingeschränkte Anwendungsbereich (Tab. 1), so daß die Bestrahlung nur als Ergänzung konventioneller Verfahren der Lebensmitteltechnik in Frage kommt. So ist die Bestrahlung fettreicher Lebensmittel unzureichend, da sich bereits sehr geringe chemische Veränderungen der Fette geschmacklich bemerkbar machen können. Um derartige Veränderungen zu vermeiden, müßte bei tiefen Temperaturen bestrahlt werden, was mit zusätzlichen Kosten verbunden ist und daher nur in speziellen Fällen angewendet wird.

Zu den derzeitigen kommerziellen Anwendungen zählt die Bestrahlung von Kartoffeln zum Verhindern des Auskeimens. Eine Kobalt-60-Bestrahlungsanlage ist für diesen Zweck seit vielen Jahren in Japan in Betrieb [13]. Die bestrahlten Kartoffeln dienen einer Fabrik für Chips zur Erhöhung der Pufferlagerung zwischen den Ernten. Weitere kommerzielle Anwendungen der Kartoffelbestrahlung existieren jedoch nicht. In vielen Ländern hat sich jedoch die Kartoffel verarbeitende Industrie mit ausreichender Kapazität an Kühlhäusern ausgestattet, so daß unter gleichzeitiger Anwendung chemischer Mittel zur Keimungshemmung die Zeit zwischen letzter Ernte und nächster Saison überbrückt werden kann. Aus diesem Grunde hat es bei den Mitgliedsländern der EG auch nie Aktivitäten seitens der Industrie zur kommerziellen Bestrahlung von Kartoffeln gegeben.

Die Bestrahlung von Gewürzen zur Eliminierung krankheits-erregender und verderbsverursachender Mikroorganismen wurde für die weiterverarbeitende Industrie zur ausschließlichen Alternative, als die chemische Begasung mit Ethylenoxid wegen Gesundheitsschädlichkeit fast ausnahmslos verboten wurde. Gewürze, vor allem naturbelassene, enthalten stets einen hohen Anteil von Mikroorganismen. Verwendet man nicht entkeimte Gewürze in Lebensmitteln, die nicht ausreichend erhitzt werden können, so kann es zu einer gefährlichen Keimvermehrung kommen. In gewerblich verarbeiteten Lebensmitteln, die nicht unmittelbar nach der Herstellung verzehrt werden, muß ein derartiges Keimwachstum vermieden werden. Insbesondere bei Gewürzen, die aus weniger entwickelten Ländern importiert werden, ist es schwierig, eine ausreichende Hygiene schon bei der Produktion zu garantieren. Hier kommt nur die nachträgliche Hygienisie-

rung in Frage [14, 15], für die sich die ionisierende Bestrahlung besonders gut eignet. Die immer wieder vorgeschlagenen Verfahren wie Hitze- und Alkoholdampf-Behandlung [16] sind nachteilig, weil sie Aroma- und Gewürzintensität stark beeinträchtigen. Bei einigen „Sichtgewürzen“ wie Pfeffer scheiden diese Verfahren aus, es sei denn, man ersetzt die fehlende Gewürzintensität durch die nachträgliche Zugabe eines Gewürzextraktes. Die Gewürzbestrahlung ist inzwischen auch in den Ländern der EG weit verbreitet, in der Bundesrepublik Deutschland jedoch nach wie vor verboten. Die kommerzielle Entkeimung von Gewürzen mittels Bestrahlung stellt hohe Ansprüche an die Prozeßkontrolle. Für eine ausreichende Eliminierung der Mikroorganismen ist eine Minimaldosis von 8 kGy an jeder Stelle des Gutes nötig; zugleich muß die gesetzlich zulässige, mittlere Höchstdosis – nach den Codexregeln 10 kGy – eingehalten werden. In den meisten Kobalt-60-Bestrahlungsanlagen, wie sie zur Behandlung medizinischer Einwegartikel üblich sind, beträgt jedoch das Verhältnis von maximaler zu minimaler Dosis mehr als 2. Daher ist in derartigen Anlagen eine Gewürzbestrahlung nur mit besonderem Aufwand möglich.

Neben der mikrobiellen Belastung eines Produktes wie Gewürze, die bei der Weiterverwendung die Haltbarkeit eines damit hergestellten Produktes gefährdet, verdient das Problem der gesundheitlichen Gefährdung des Verbrauchers durch krankheitserregende Keime besondere Beachtung. Nach einer epidemischen Salmonelleninfektion im Jahre 1981 in Norwegen sahen die Verantwortlichen keine andere Alternative als die Bestrahlung für Gewürze zuzulassen. Ähnlich war es in den Niederlanden, nachdem 14 Personen nach dem Genuß von durch *Shigella* infiziertem tiefgefrorenem Shrimp-Fleisch aus Asien zu Tode gekommen waren. Im Grunde könnte man in Garnelenfleisch die pathogenen Keime durch Erhitzen sicher entfernen. Allerdings wäre dann das Fleisch überkocht und hätte seine sensorischen Eigenschaften – Geschmack und Textur – verloren, dererwegen man es eigentlich verzehrt. Die Bestrahlung ist hier die einzige Alternative, da die Ware in tiefgefrorenem Zustand bestrahlt werden kann und da sie sich als Folge der Bestrahlung nur wenig erwärmt. Ähnliches gilt für die Bestrahlung tiefgefrorener Hähnchen zur Bekämpfung der Salmonellengefahr.

Die Desinfestation von frischen Früchten und die Verbesserung ihrer Haltbarkeit für Transport und Vermarktung haben große Bedeutung für Entwicklungsländer, die diese Produkte exportieren. Die Desinfestation spielt außerdem eine Rolle beim Import in Länder, die bestimmte Schädlinge bisher nicht kennen und deren Einschleppung durch strikte Quarantänemaßnahmen unterbinden. In Hawaii entsteht daher zur Zeit eine Anlage zur Früchtebestrahlung, damit auch frische Früchte ohne Einschleppung der Fruchtfliege nach Nordamerika gebracht werden können. Die chemische Oberflächenbehandlung ist wegen der gesundheitlichen Gefährlichkeit der betreffenden Chemikalien inzwischen nicht mehr zugelassen; außerdem erreicht diese Behandlung Maden, Larven und Käfer nicht, wenn sie sich im Inneren der Frucht befinden. Die Bestrahlung durchdringt die Früchte dagegen ausreichend gleichmäßig. Das Beispiel des Mangokäfers zeigt zudem, daß es zur Bestrahlung keine Alternative gibt: Die Larven dringen in den Kern der noch unentwickelten Frucht ein, entwickeln sich dort zum fertigen Käfer und zerstören die Frucht bei ihrem Auftauchen. Eine chemische Behandlung von außen ist wirkungslos, nur die Strahlung durchdringt die Frucht und tötet Larven und Käfer.

Ein weiteres Beispiel ist die Getreidebestrahlung in der UdSSR zur Bekämpfung von Insekten. Diese Bestrahlungsanlage ist seit einiger Zeit in Betrieb und wird als ständig und kommerziell eingesetzt reklamiert. Kommerziell eingesetzt

Tabelle 3.

Erteilte Zulassungen innerhalb der EG.

Land	Produkt
Belgien	Kartoffeln, Zwiebeln, Schalotten, Knoblauch, Erdbeeren, Gewürze, Dichtungsmittel, getrocknete Gemüse
Dänemark	Kartoffeln, Gewürze
Frankreich	Kartoffeln, Zwiebeln, Knoblauch, Schalotten, Separatorenfleisch (Geflügel), Dichtungsmittel, getrocknete Gemüse, Frühstückscerealien
Italien	Kartoffeln, Zwiebeln, Knoblauch, Pfeffer
Niederlande	Kartoffeln, Zwiebeln, Reis, Fischfilet, Garnelen, Hähnchen, Froschschenkel, Pilze, Gewürze, getrocknete Gemüse, Eipulver

wird ferner die Bestrahlung von Früchten wie Erdbeeren in Südafrika zur Verlängerung der Frischlagerfähigkeit. Da stets eine bestimmte Vermarktungszeit nötig ist, können Erdbeeren im reiferen Zustand geerntet werden, wenn sie nachträglich bestrahlt werden. Früchte, die an der Pflanze reifen, haben stets ein besser ausgeprägtes Aroma. Bestrahlte Erdbeeren werden daher bei gleicher Vermarktungsdauer geschmacklich höher bewertet, was die Verbraucher in diesem Land durch einen höheren Preis für die bestrahlte Ware honorieren.

Bei einer Reihe anderer Verfahren ist die Schwelle zum kommerziellen Einsatz erreicht: Die Bestrahlung von Separatorenfleisch von Geflügel soll die Belastung von pathogenen und Verderb erregenden Keimen reduzieren. Eine für diesen Zweck geeignete Bestrahlungsanlage ist in Frankreich seit Anfang 1987 fertiggestellt.

Die wenigen Beispiele sowie die Angaben über die bisherigen Anwendungen [17] zeigen, daß trotz der weltweit zahlreichen Zulassungen [18] und auch der Zulassungen innerhalb der EG (Tab. 3) die Lebensmittelbestrahlung noch praktisch keinen bedeutsamen Umfang erreicht hat. Die hauptsächlichsten Anwendungen liegen dort, wo Alternativen nicht bestehen. Von dem Vorzug der Bestrahlung als ein besonders schonendes Verfahren wird nur selten Gebrauch gemacht, solange herkömmliche Verfahren bereitstehen, auch wenn sie das Lebensmittel weniger schonend behandeln.

Abschließend sei auf eine Anwendungsmöglichkeit hingewiesen, die nach Wissen der Autoren bisher noch nicht genutzt wurde. Bei der Enzymherstellung bereiten Probleme der Sterilität oft große Schwierigkeiten, da Enzyme hitzelabil sind und damit eine Hitzesterilisierung ausscheidet. Wie Tab. 1 zeigt, ist jedoch eine Strahlensterilisierung möglich, ohne die Enzymaktivität zu verringern.

4 Strahlenwirkung auf Mikroorganismen

Die biologische Wirkung ionisierender Strahlen hängt neben dem Milieu und dem vegetativen Zustand der Mikroorganismen nur von der Dosis ab; im hier interessierenden Bereich spielen die Strahlenenergie und die Dosisleistung keine Rolle. Im Fall von Mikroorganismen wird der Milieueinfluß hauptsächlich durch den pH-Wert, die Temperatur und die Wasseraktivität bestimmt. Während die durch ionisierende Strahlen ausgelösten chemischen Veränderungen in einem weiten Dosisbereich annähernd linear mit der Dosis zusammenhängen, ist die Abtötung von Mikroorganismen ein komplizierterer

Vorgang. Dies hängt einerseits damit zusammen, daß ein einzelner Strahlungs-„Treffer“ in der Regel einen Mikroorganismus nicht schädigt und darüberhinaus sehr wirksame Reparaturmechanismen für etwa eingetretene Strahlungsschäden zur Verfügung stehen. Andererseits werden die meist in großer Zahl vorhandenen Mikroorganismen unabhängig voneinander geschädigt, so daß mit fortschreitender Bestrahlung und Abtötung die Chancen immer kleiner werden, einen noch lebenden Mikroorganismus zu treffen.

Zur Beschreibung der Abtötung von Mikroorganismen durch ionisierende Strahlen wurden die sog. Treffertheorie und der Mehrbereichsansatz vorgeschlagen. Bei der Treffertheorie (vgl. [19]) wird davon ausgegangen, daß ein Mikroorganismus nur dann abgetötet wird, wenn ein Ziel (z. B. DNA) von mindestens n Treffern erreicht wurde und es sich um statistisch unabhängige Ereignisse handelt. Die Abtötung läßt sich dann für ein bestimmtes Milieu mit der Poisson-Verteilung

$$N/N_0 = [\exp(-D/D_e)] \sum_{m=0}^{n-1} D/D_e m! \quad (5)$$

beschreiben. Hierin bedeuten N_0 bzw. N die Zahl der Mikroorganismen pro Masse des Lebensmittels vor bzw. nach einer Bestrahlung mit der Dosis D . Der Dosiswert D_e berücksichtigt neben der Trefferzahl n die Strahlenempfindlichkeit der jeweiligen Art eines Mikroorganismus. Für $n = 1$ ist D_e diejenige Dosis, bei der N/N_0 auf $1/e$ reduziert wird.

Beim Mehrbereichsansatz [20] geht man davon aus, daß ein Mikroorganismus nur dann abgetötet wird, wenn mehrere Ziele mindestens einmal getroffen wurden. Würde nur ein getroffenes Ziel zur Abtötung genügen, so wäre wegen $dN_1 = -(N_1/D_e)dD$ der Anteil der nicht getroffenen Mikroorganismen

$$q_1 = N_1/N_{1,0} = \exp(-D/D_e) \quad (6)$$

und damit der Anteil der getroffenen Mikroorganismen $p_1 = 1 - q_1$. Müssen r Ziele bei gleicher Trefferwahrscheinlichkeit mindestens einmal getroffen werden, so ist der Anteil der getöteten Mikroorganismen

$$p_r = (1 - N_1/N_{1,0})^r \quad (7)$$

also der Anteil der überlebenden Mikroorganismen $N/N_0 = 1 - p_r = q_r$. Mit den Gln. (6) und (7) folgt daraus

$$N/N_0 = 1 - [1 - \exp(-D/D_e)]^r \quad (8)$$

Für $D/D_e \gg 1$ läßt sich Gl. (8) durch die Näherungsbeziehung

$$N/N_0 \approx r \exp(-D/D_e) \quad (8a)$$

beschreiben. In Anlehnung an die Kinetik der Hitzeabtötung von Mikroorganismen kann Gl. (8a) in die Form

$$\lg(N/N_0) \approx \lg r - D/2,3D_e = \lg(N_{ex}/N_0) - D/D_{10} \quad (8b)$$

gebracht werden. Die Bedeutung des extrapolierten Wertes N_{ex} ergibt sich aus Abb. 2; $N_{ex}/N_0 = r$ kann auch als Abschätzung für die Zahl der getroffenen Bereiche (Ziele) eines Mikroorganismus herangezogen werden, die zur Abtötung nötig ist. D_{10} ist die Dosis (in kGy), um im Bereich $D/D_e \gg 1$, also im linearen Kurventeil der halblogarithmischen Auftragung in Abb. 2, die Zahl der Mikroorganismen um den Faktor 10 zu reduzieren.

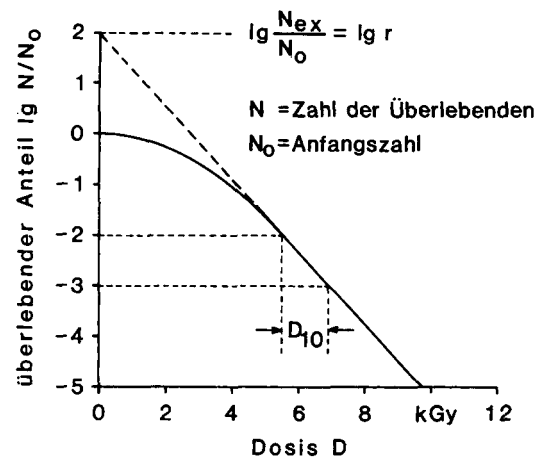


Abb. 2. Verlauf der Abtötung von Mikroorganismen in Abhängigkeit von der Dosis ionisierender Strahlen.

Sowohl Gl. (5) als auch Gl. (8) bzw. (8b) ergeben bei der üblichen halblogarithmischen Auftragung (Abb. 2) sog. Schulterkurven, mit denen experimentelle Daten zufriedenstellend angepaßt werden können. Aus derartigen Experimenten kann daher nicht entschieden werden, welche Modellvorstellung den tatsächlichen Mechanismen näher kommt. Da Gl. (8b) am einfachsten zu handhaben ist, wird dieser Ansatz im folgenden verwendet. In vielen Publikationen (z. B. [1, 21]) wird jedoch nur der Ansatz

$$\lg(N/N_0) = -D/D_{10} \quad (8c)$$

angegeben, der sich aus Gl. (8b) für $r = 1$ ergibt. Wie man der Tab. 4 entnehmen kann, ist dieser Ansatz jedoch nur für strahlenempfindliche Mikroorganismen brauchbar. Die Zahlenwerte in Tab. 4 sind verschiedenen Literaturstellen entnommen [22–25]; die großen Streubreiten lassen sich hauptsächlich auf unterschiedliche Milieubedingungen sowie auf hier nicht vermerkte Stämme der Mikroorganismen zurückführen. Je nach Art der Mikroorganismen ist die zum Abtöten

Tabelle 4.

D_{10} -Werte bei der Lebensmittelbestrahlung [19–22].

Mikroorganismus	$\lg r$	D_{10} [kGy]
<i>Moraxella osloensis</i>	5–10	5 – 10
<i>Micrococcus radiodurans</i>	2– 4	3 – 7
<i>Clostridium botulinum</i>	1– 2	2 – 3,5
Schimmelpilzsporen	<1	0,5 – 5
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<1	0,4 – 0,6
Salmonellen	≈ 0	0,2 – 1
<i>Staphylococcus aureus</i>	≈ 0	0,2 – 0,6
<i>Escherichia coli</i>	0	0,1 – 0,35
<i>Pseudomonas</i>	0	0,02– 0,2

notwendige Trefferzahl sehr unterschiedlich und damit die „Schulter“ der Abtötungskurve verschieden stark ausgebildet. Auffallend ist jedoch, daß ein hoher Wert für die nötige Trefferzahl mit einem großen D_{10} -Wert einhergeht. Übliche Verderb erregende Mikroorganismen wie *Pseudomonas*, die zugleich durch einen abstoßenden Geruch vor verdorbenen Lebensmitteln warnen, sind strahlenempfindlich und daher besonders leicht durch ionisierende Strahlung zu eliminieren. Anders dagegen verhält sich *Clostridium botulinum*, das als Sporenbildner ein für die Lebensmittelindustrie besonders kritischer Mikroorganismus ist, weil er unter in Lebensmitteln vielfach vorkommenden Bedingungen ein sehr starkes Toxin

bildet. Um das Risiko einer derartigen Lebensmittelvergiftung nahezu auszuschalten, ist es üblich, beim Sterilisieren von Lebensmitteln Bedingungen einzustellen, die diesen gefährlichen Sporenbildner mindestens um die Faktor 10^{12} reduziert (12-D-Konzept). In Analogie zur Hitzesterilisation kann der F_D -Wert eingeführt werden. Er gibt die erforderliche Dosis an, um den festgelegten Abtötungsfaktor zu erreichen. F_D läßt sich aus der Beziehung

$$F_D = (\lg(N_0/N) + \lg(N_{ex}/N_0)) D_{10} \quad (9)$$

berechnen, sofern $D/D_c \gg 1$ (vgl. Gl. (8a)) bzw. $F_D/D_{10} \gg 1$ ist. Nach den Zahlenwerten der Tab. 4 und $N_0/N = 12$ (12-D-Konzept) liegt F_D für *Clostridium botulinum* zwischen den Dosiswerten 26 kGy und 49 kGy. Zur Radappertisation wird daher die relativ hohe Dose von 25 bis 50 kGy benötigt.

Gl. (9) verdeutlicht eine Schwierigkeit der Lebensmittelbestrahlung. Ist die Bedingung $F_D/D \gg 1$ nicht erfüllt, so muß zur Berechnung der Strahlenwirkung die Abtötungskurve (Abb. 2) für die jeweilige Mikroorganismen-Art zugrunde gelegt werden. Liegt aufgrund der unvermeidlichen Dosisverteilung ein Teil des Lebensmittels im Bereich der „Schulter“ der Abtötungskurve, so werden in diesem Bereich kaum Mikroorganismen abgetötet. Dies bedeutet, daß in einigen Anwendungsfällen eine hinreichend enge Dosisverteilung strikt einzuhalten ist, da die maximale Dosis in der Regel vorgegeben wird.

5 Auslegung von Bestrahlungsanlagen

Bestrahlungsanlagen arbeiten in der Regel kontinuierlich bzw. quasikontinuierlich. Hierzu wird das zu bestrahlende Gut durch den Strahlengang geleitet bzw. an der Strahlenquelle vorbeigeführt, bis die gewünschte Dosis erreicht ist. Der Massendurchsatz m , der bei einer Leistung P der Strahlenquelle mit der Dosis D bestrahlt werden soll, ergibt sich aus

$$\dot{m}_D = \eta_2 \eta_1 P/D \quad (10)$$

Der Wirkungsgrad η_2 ist das Verhältnis aus absorbiertener Strahlenergie zur Energie, die von der Oberfläche der Strahlenquelle bzw. vom Hüllenmaterial der Quelle abgegeben wird; η_1 berücksichtigt bei Radioisotopen die Absorption im Isotop und im Hüllenmaterial (vgl. Kap. 2). Bei ausgeführten Co-60-Bestrahlungsanlagen liegt η_2 bei 0,3, bei Linearbeschleunigern zwischen 0,3 und 0,4 [6]. Aus Gl. (10) kann die erforderliche Leistung bzw. Aktivität für einen gegebenen Massenstrom ermittelt werden. Soll beispielsweise ein Massenstrom von 1 t/h mit der Dosis von 8 kGy bestrahlt werden, so ergibt sich mit $\eta_2 = 0,37$ eine abgegebene Strahlleistung ($\eta_1 = 1$) von 6 kW für den Elektronen-Linearbeschleuniger oder eine Aktivität von 2×10^{16} Bq für eine Co-60-Anlage (vgl. Gl. (1)), wenn man $\eta_2 = 0,9$ und $\eta_2 = 0,3$ zugrunde legt.

Die genannten zwei Bestrahlungstypen, deren Schema Abb. 3 zeigt, unterscheiden sich hauptsächlich durch die sehr verschiedenen Aufenthaltszeiten des Gutes im Bestrahlungsraum und durch das unterschiedliche Durchdringungsverhalten der Strahlen. Bei einer Co-60-Großbestrahlungsanlage hat es sich als zweckmäßig erwiesen, das in Containern oder Paletten untergebrachte Gut schrittweise durch die Anlage zu befördern. Da die Ortsdosisleistung relativ niedrig ist, verweilt das Gut jeweils einige Minuten in jeder Bestrahlungsposition. Zur besseren Ausnutzung der Energie der stark durchdringungsfähigen Co-60-Strahlung läßt man außerdem in der Regel das Gut in mehreren Schichten die Strahlenquelle passieren. Für die Radappertisation ist je nach Größe der Anlage

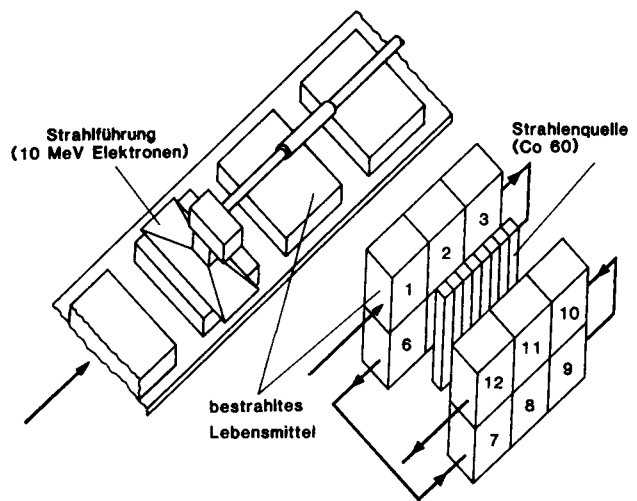


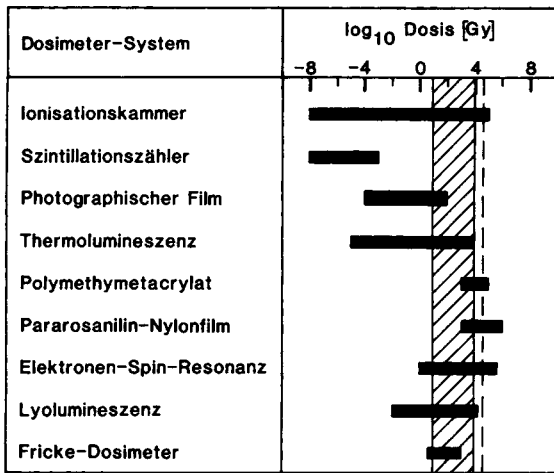
Abb. 3. Schema von Bestrahlungen: Bei Elektronenbestrahlung laufen die Gutsbehälter auf einem Förderband durch das eng begrenzte Strahlungsfeld; bei Kobalt-60-Strahlung werden die Gutsbehälter über mehrere Positionen (Reihenfolge der Nummern) um die Strahlenquelle herumgeführt und so auch von zwei Seiten bestrahlt.

eine gesamte Aufenthaltszeit des Gutes im Bestrahlungsraum von 8 bis 24 h erforderlich.

Bei Elektronenbeschleunigern wird das Gut in relativ dünner Schicht (vgl. Abb. 1) vergleichsweise schnell durch den Elektronenstrahl geführt, der i. a. mittels eines Scanners periodisch ausgelenkt wird, um eine möglichst homogene Dosis erreichen zu können. Die Transportgeschwindigkeit des Gutes muß dabei auf die Scanfrequenz abgestimmt werden; im Fall von Elektronenbeschleunigern, die nur einen Impulsbetrieb zulassen, muß ferner die Impulsfrequenz berücksichtigt werden [26]. Da die Verweilzeit des Gutes im Strahlengang bei der Radappertisation i. a. in der Größenordnung von Sekunden oder noch darunter liegt, ergeben sich vergleichsweise hohe Transportgeschwindigkeiten. Bei leistungsfähigen Beschleunigeranlagen, die das Gut mittels eines Förderbandes durch den Elektronenstrahl führen, kann die Transportgeschwindigkeit zum limitierenden Faktor werden. Hierauf ist insbesondere bei der Lebensmittelbestrahlung zu achten, wenn nur geringe Dosiswerte ausreichen, den gewünschten Zweck zu erzielen (s. Tab. 1).

6 Dosimetrie und Prozeßkontrolle bei der Lebensmittelbestrahlung

Die Dosimetrie ionisierender Strahlen ist für alle Dosisbereiche in allgemein anerkannter Weise etabliert. In größeren Abständen erscheinen Monographien, die den aktuellen Stand zusammenfassen [27]. In bezug auf die Lebensmittelbestrahlung ist ein Handbuch [28] die Grundlage für die Regelungen des Codex Alimentarius [29] geworden. Allerdings sind in Teilbereichen immer noch Probleme ungelöst, die in einigen Fällen Voraussetzung für eine ordnungsgemäße und zuverlässige Strahlenbehandlung sind und die vor allem für die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte unerlässlich sind. Die Empfehlung der Expertenkommission [9] für eine mittlere Dosis nach Gl. (2) von bis zu 10 kGy und ihrer punktuellen Überschreitung bis zu 15 kGy war aus der Sicht einer toxikologischen Bewertung des Verfahrens richtig und nützlich. In der praktischen Anwendung des Verfahrens kommt es jedoch auch darauf an, den Effekt und damit die Minimaldosis an jedem Punkt der behandelten Ware zu garantieren. Außerdem muß die Innehaltung einer Obergrenze sichergestellt sein.



schraffiert : Anwendungsbereich der Lebensmittelbestrahlung

Abb. 4. Meßbereiche verschiedener Dosimeter-Systeme.

Das Konzept solcher Dosisgrenzen und ihrer Bezüge zu den ursprünglichen Festsetzungen [30] hat bisher in der Literatur erst wenig Niederschlag gefunden [31–33].

Die Dosimetrie ist das essentielle Kontrollverfahren jeder Bestrahlungsanwendung. Abb. 4 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Dosimetersysteme mit ihren Meßbereichen. Zuerst werden im Laborversuch die Beziehungen zwischen Dosis und Wirkung festgestellt und später bei der praktischen Anwendung des Verfahrens die Dosis bestimmt, weil der erzielte Effekt (z. B. die Keimungshemmung) in der Regel nicht direkt zur Prozeßkontrolle eingesetzt werden kann. Die Dosimetrie ist zugleich die Basis für die Dokumentation, daß die gesetzlichen Auflagen eingehalten wurden. Insbesondere die aus Inhomogenitäten des bestrahlten Gutes herrührenden Ungleichmäßigkeiten der Dosis können nicht durch Rechner-simulation, sondern nur durch direkte Messung erfaßt werden. Eine Bestandsaufnahme bei einem internationalen Seminar hat gezeigt [33], daß bisher keine Dosimeterart verfügbar ist, die den Bereich der Lebensmittelbestrahlung von 10 Gy bis 10 kGy überdeckt und die bei Temperaturen von -40 bis $+60$ °C einsetzbar ist (Abb. 4). Es gibt bisher kein eichfähiges oder gar amtlich geeichtes Dosimeter, welches bei einer Lebensmittelbestrahlung eingesetzt werden könnte. Damit ist ein Überwachung von Bestrahlungsanlagen und eine Kontrolle der Einhaltung der Bestrahlungsbedingungen für die zuständigen Behörden besonders schwierig. Ein bei der International Atomic Energy Agency in Wien eingerichteter Dosimetrieservice (IDAS [34]) kann industriellen Anwendern dabei helfen, die Lebensmittelbestrahlung zu kontrollieren, solange nationale Standards und Referenzmessungen nicht verfügbar sind. (Allerdings ist die Bundesrepublik Deutschland dem betreffenden Abkommen bisher nicht beigetreten, so daß deutschen Anwendern diese Rückversicherung nicht zugänglich ist.)

Die Anforderungen an Dosimeter, die bei der Lebensmittelbestrahlung eingesetzt werden sollen, sind [28]:

- meßbarer und reproduzierbarer Dosis-effekt im jeweils interessierenden Dosisbereich,
- Eignung für alle interessierenden Strahlungsarten und Energiebereiche,
- Unabhängigkeit des Dosis-effektes von der zu erwartenden Dosisleistung,
- in bezug auf Strahlungsabsorption Gleichwertigkeit mit dem jeweiligen Lebensmittel (mittlerer Kernladungszahl und Dichte),
- Unempfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen, insbesondere Temperatur und Feuchtigkeit,

- Verfügbarkeit einer standardisierten Auswertungs-prozedur,
- Stabilität der Anzeige von Minuten bis zu vielen Tagen,
- eine Bezugsgröße, die eine genügende räumliche Auflösung des Dosisfeldes erlaubt,
- geringe Kosten des Dosimetermaterials und des Auswertegerätes,
- gute Lagerfähigkeit vor der Benutzung und Robustheit in der Handhabung.

Die Verfügbarkeit solcher Dosimeter [35] und Methoden zur Qualitätssicherung in der Dosimetrie [36] sind verschiedentlich beschrieben worden. Dosimeter nach dem Prinzip der Lumineszenz wurden in Miniaturkapseln einem Schüttgutstrom von Getreide zur Überwachung der Dosisverteilung beigefügt [37, 38]. Miniaturhalbleiter eignen sich ebenfalls für die Anwendung [39, 40], auch wenn ihre Materialdichte deutlich höher als diejenige von Lebensmitteln ist. Allerdings verdient das Gebiet der Bestimmung der Dosisverteilung in freifließendem Schüttgut weitere Aufmerksamkeit [41]. Insbesondere sollten bei Lebensmitteln Materialien eingesetzt werden, die nicht toxisch sind [42] wie das häufig verwendete Lithiumfluorid. Eine Vielzahl von Lebensmittelinhaltsstoffen, wie Zucker und Aminosäuren, zeigt Lumineszenz-Erscheinungen, die sich gut für die Dosimetrie eignen [35]. Bei Schüttgut liegt der Gedanke nahe, die einzelnen Körner des Schüttgutes selbst als Dosimeter zu verwenden [42]. Der Einsatz geeigneter Dosimeter ist besonders wichtig, wenn sich die Geometrie bei der Bestrahlung ändert. Dies ist immer dann der Fall, wenn Dichte und Raumerfüllung nicht kontrolliert sind, wie das etwa bei der Bestrahlung von ganzem Frischfisch unter Beimengung von schmelzendem Scherbeneis der Fall ist [43].

7 Kosten der Lebensmittelbestrahlung

Die Angabe gesicherter Kosten einer Lebensmittelbestrahlung ist nicht möglich, da bisher keine ausreichenden kommerziellen Erfahrungen vorliegen. Für die einzige kommerzielle Anlage, die in Japan schon längerfristig zur Keimungshemmung bei Kartoffeln eingesetzt wird [13], wurden damals Kosten von höchstens 10 US-\$/t bei einer Minimaldosis von 60 Gy angegeben; Berichte über die tatsächlich erzielten Kosten sind aber bisher nicht zugänglich. Diese genannten Kosten wären zu den Kosten der üblichen chemischen Keimungshemmung bei Kartoffeln konkurrenzfähig.

Aufgrund des Mangels an praktischen Betriebserfahrungen ist es verständlich, daß es eine Vielzahl von Kostenschätzungen unter den unterschiedlichsten Voraussetzungen gibt [44–48]. Die Grundlagen dieser Schätzungen wurden in den 60er Jahren durch die mit dem Bau und der Auslegung der Bestrahlungsanlagen befaßte Arbeitsgruppe am Brookhaven National Laboratory gelegt; eine spätere, ausführliche Zusammenfassung dieser Gruppe kann auch heute noch als Arbeitsgrundlage für den Einsatz von Isotopenanlagen dienen [49]. Schon frühzeitig wurde in den USA die Lebensmittelindustrie und der Handel in die Untersuchungen einbezogen [50]. Kosten von 0,02 US-\$/kg und 10 kGy [46] erscheinen für fast alle Produkte und Anwendungen vertretbar. Lediglich bei der Strahlensterilisation von Fleisch und Fisch wurden Kosten bis zu 1,00 US-\$/kg errechnet [47], weil die Bestrahlung bei tiefen Temperaturen zur Vermeidung von Geschmacksveränderungen erfolgen muß und anschließend eine Hitzebehandlung zur Enzyminaktivierung nötig ist. Auch die Auswirkungen von Bestrahlungskapazität und Anlagengröße wurden untersucht [48]. Für die in Südafrika im großtechnischen Maßstab eingesetzte Bestrahlung von Früchten zur

Haltbarkeitsverbesserung werden für Erdbeeren bei einer Dosis von 2,4 kGy Kosten von 0,15 DM/kg und für Bananen 0,05 DM/kg (bei $D = 0,4$ kGy) genannt [51].

Auch für die Verhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland wurden Kostenschätzungen versucht. Da der Zusatz von Hexamethylentetramin zu Fischkonserven wegen möglicher Gesundheitsgefahren verboten wurde, kam man auf den Gedanken, die Bestrahlung für eingedoste Marinaden einzusetzen [52]: Bei einem Durchsatz von 5000 t im Jahr mit einer Dosis von 1,6 kGy wurden etwa 0,20 DM Kosten pro kg errechnet, während die konventionelle Hitzekonservierung der Dosen damals mit 0,07 DM/kg angegeben wurde. Unter den Bedingungen der deutschen Garnelenfischerei reichte bei einem Durchsatz von 2000 t ungeschälter Krabben im Jahr mit einer Dosis von 1 kGy die Kostenschätzung von 0,10 bis 2,00 DM/kg [53].

Angesichts des zunehmenden Einsatzes der Strahlensterilisation medizinischer Einwegartikel können auch die Preise der zahlreichen Lohnbestrahlungsanlagen zur Schätzung herangezogen werden: Die Behandlung von 1 m³ Gut auf Paletten bei einer Dichte von 200 kg/m³ und einer garantierten Minimaldosis von 25 kGy beträgt maximal 300 DM (Großanlage mit $5,5 \times 10^{16}$ Bq, Verweilzeit ca. 7 h).

Rechnet man anhand der detaillierten Berechnungsbeispiele [54] unter verschiedenen Ausgangsbedingungen den Einsatz eines Großbeschleunigers zur Lebensmittelbestrahlung durch, so kommt man bei günstiger Auslastung trotz hoher Investitionskosten von etwa 10 Mio. DM für den Beschleuniger selbst und etwa 5 Mio. DM für Gebäude und Einrichtungen auf Kosten von etwa 0,10 DM/kg bei einer Dosis von 10 kGy. Wesentliche Annahmen sind dabei ein Betrieb von 2000 Stunden im Jahr und eine Ausnutzung der Strahlleistung von 100 kW bei 10 MeV Elektronenenergie zu 50%. Wegen der hohen Investitionskosten und der nahezu gleichbleibenden Personalkosten wäre bei einer entsprechenden, kleinen 10-kW-Elektronenbeschleunigeranlage mit Kosten von annähernd 1 DM/kg für die Bestrahlung mit einer Dosis von 10 kGy zu rechnen.

8 Identifizierung bestrahlter Lebensmittel

Wie bereits erwähnt, konnten trotz intensiver Forschung in bestrahlten Lebensmitteln keine chemischen Verbindungen nachgewiesen werden, die nicht auch bei anderen Verfahren der Lebensmitteltechnik entstehen. Eine zuverlässige, nachträgliche Identifizierung bestrahlter Lebensmittel ist daher bisher nicht möglich. Deshalb schlägt der Codex Alimentarius [29] als Alternative vor, daß jeweils national den Betreibern von Bestrahlungsanlagen neben der atomrechtlichen Lizenz noch eine besondere Genehmigung zur Bestrahlung von Lebensmitteln erteilt werden solle. Durch geeignete Kennzeichnung der Lebensmittel soll der Weg des bestrahlten Produktes zurückverfolgt werden, um aus den Aufzeichnungen des Betreibers die ordnungsgemäße Durchführung der Bestrahlung, insbesondere die Einhaltung von Dosisgrenzwerten, überprüfen zu können. Für eine direkte und schnelle Kontrolle, aber auch zur Überwachung und Durchsetzung etwaiger Kennzeichnungsvorschriften wäre es nützlich, einen Nachweis direkt am Produkt vornehmen zu können.

Der analytische Nachweis einer erfolgten Bestrahlung ist nur möglich, wenn nachträglich meßbare, strahlenspezifische Veränderungen aufgetreten sind. Da die Suche nach strahlenspezifischen chemischen Verbindungen bisher ergebnislos war, konzentriert man sich derzeit auf andere Effekte [55], die durch eine weitere Verfeinerung der Analysetechnik erwarten lassen [56], daß für einige spezielle Anwendungen schon

Tabelle 5.
Übersicht einiger aussichtsreicher Verfahren zur Identifizierung bestrahlter Lebensmittel (vgl. [31]).

Produktgruppe	Anwendungsbereich	Verfahren
a) nach Labortests jetzt im Stadium internationaler Ringversuche:		
Gewürze	Keimzahlreduzierung	Thermo- und Chemilumineszenz
Knollengewächse	Keimungshemmung	elektrische Leitfähigkeit; histologische/morphologische Veränderungen
b) noch im Labortest:		
Gewürze	Keimzahlreduzierung	Änderung der Viskosität in Aufschlämmungen
Fische und Schalentiere	Haltbarkeitsverlängerung	Elektronenspinresonanz in Gräten und Panzern; flüchtige Fettsäurebestandteile
Fleisch	Haltbarkeitsverlängerung	chemische Veränderungen an Proteinen
Geflügel	Haltbarkeitsverlängerung	Elektronenspinresonanz in Knochen; chemische Veränderungen an Proteinen
Dickungsmittel	Keimzahlreduzierung	Änderung der Viskosität in Zubereitungen

bald verlässliche Nachweismethoden zur Verfügung stehen werden. Diese Effekte beruhen darauf, daß die als Primärprodukte einer ionisierenden Bestrahlung erzeugten, sogenannten freien Radikale in trockener Umgebung relativ lange beständig sind, während sie in Gegenwart von Wasser schnell zu Folgeprodukten weiterreagieren. Die in freien Radikalen gespeicherte Energie kann in Licht umgewandelt werden, indem man die Radikale durch Lösung in Wasser oder durch Erhitzen freisetzt. Beide Wege werden als Lyolumineszenz und Thermolumineszenz auch zur Dosimetrie ionisierender Strahlung eingesetzt. Ein kürzlich durchgeführter Ringversuch mehrerer bundesdeutscher Forschungsinstitute [57] hat gezeigt, daß die Methode unter Beachtung ihrer Randbedingungen aussichtsreich ist, jedoch vor einem amtlichen Einsatz noch weiterer Verbesserungen bedarf.

Biologische Methoden, bei denen die durch die Bestrahlung ausgelösten, erwünschten Erscheinungen zum Nachweis benutzt werden, können besonders zuverlässig sein. So läßt sich eine durch Bestrahlung ausgelöste Keimungshemmung von Kartoffeln oder Zwiebeln daran zuverlässig erkennen, daß sie permanent ist, während die durch chemische Mittel ausgelöste Hemmung reversibel ist. Allerdings ist diese Methode für den amtlichen Gebrauch in der Regel zu langsam. Bei einem internationalen Seminar in Neuherberg wurde kürzlich eine Bestandsaufnahme aller bisher vorgeschlagenen Nachweismethoden gemacht [31]; alle Beiträge und die Schlußfolgerungen sollen als Fortschrittsbericht publiziert werden. Eine Übersicht einiger aussichtsreicher Methoden zur Identifizierung bestrahlter Lebensmittel zeigt Tab. 5.

9 Gesundheitliche Zuträglichkeit – Verbraucherakzeptanz

Aufgrund der großen Vielfalt von strahlenchemischen Veränderungen an Inhaltsstoffen und Bestandteilen von Lebensmit-

teln [3] waren sich alle Experten einig, daß einer etwaigen Zulassung der Lebensmittelbestrahlung eine sehr sorgfältige Prüfung der gesundheitlichen Zuträglichkeit vorausgehen mußte. Da es schon früh absehbar war, daß die Aufklärung aller Sachverhalte und der Nachweis einer etwaigen gesundheitlichen Unbedenklichkeit von keinem Staat allein zu schaffen sein würde, wurde zur internationalen Koordination ein Internationales Projekt auf dem Gebiet der Nahrungsmittelbestrahlung (IFIP) gegründet. Dieses wurde aus Beiträgen von 23 Mitgliedsländern finanziert und hat zu derart gründlichen und umfassenden Untersuchungen bestrahlter Lebensmittel geführt, wie es bisher noch nie für ein Verfahren der Lebensmitteltechnik vor seiner Anwendung praktiziert wurde. Nachdem das IFIP sein Ziel, die gesundheitliche Unbedenklichkeit nachzuweisen, erfolgreich erreicht hatte, wurde es 1983 aufgelöst. Aufgrund der weltweit durchgeführten und durch IFIP koordinierten Untersuchungen war 1980 eine von der Weltgesundheitsorganisation, der Welternährungsorganisation und der Internationalen Atom-Energie-Organisation (WHO, FAO und IAEA) gemeinsam getragene Expertengruppe zu dem Schluß gekommen [9], daß eine Bestrahlung von Lebensmitteln bis zu einer Durchschnittsdosis von 10 kGy ohne Rücksicht auf die Art des Produktes gesundheitlich zuträglich sei und daher auch keine weiteren toxikologischen Untersuchungen mehr nötig seien. In bezug auf mikrobiologische Probleme und den Nährwert wurden strahlenbehandelte Lebensmittel als völlig vergleichbar mit konventionell behandelten Lebensmitteln angesehen. Lediglich im Dosisbereich über 10 kGy, wie er zur Sterilisierung nötig ist, reichten die damals vorhandenen Daten zu einem Urteil nicht aus; allerdings gaben die vorgelegten Daten zu keinerlei Zweifeln Anlaß, daß eine Extrapolation zu höheren Dosiswerten zu einem positiven Urteil führen würde. Die immer wieder, insbesondere von Nicht-Fachleuten geltend gemachten Zweifel an der gesundheitlichen Zuträglichkeit bestrahlter Lebensmittel konnten bisher seitens der Zweifler entweder nicht substantiiert werden oder beruhen auf teilweise falschen Zitaten aus Veröffentlichungen, die vom o. g. Expertenkomitee in die damalige Bewertung schon einbezogen worden waren.

Viele Verbraucher stehen neuen Verfahren der Lebensmitteltechnik und besonders solchen kerntechnischer Natur reserviert gegenüber. Trotz der eindeutigen Stellungnahme [9] der Experten genügen bereits unzureichend begründete und widerlegbare Zweifel an der gesundheitlichen Unbedenklichkeit bestrahlter Lebensmittel, Unsicherheit beim Verbraucher zu erzeugen. Es ist heute in vielen Ländern und besonders in der Bundesrepublik Deutschland schwierig, auf Emotionen beruhende Vorurteile gegen eine Bestrahlung auszuräumen [58]. Erschwerend kommt hinzu, daß einige der überzeugten Gegner einer Lebensmittelbestrahlung Sachverhalte verfälschen und tiefsetzende Ängste wecken [14]. Dies führte dazu, daß die Lebensmittelindustrie in der Bundesrepublik kaum noch Interesse an Bestrahlungsverfahren zeigt. Zu den hohen Investitions- und anderen Anfangskosten für das Verfahren selbst kommen bei einer erstmaligen Anwendung noch erhebliche Kosten für die Verbraucheraufklärung und Produktwerbung. Dies dürfte auch der Grund dafür sein, daß von den innerhalb der EG eigentlich möglichen Anwendungen (Tab. 3) nur in wenigen Fällen Gebrauch gemacht wird und dies vor allem Anwendungen sind, bei denen das bestrahlte Lebensmittel nicht als Produkt der 1. Generation unter ausdrücklicher Kennzeichnung als bestrahlt in die Hände der Verbraucher gelangt. Vielmehr werden etwa Gewürze ausschließlich für Zwecke von Großverbrauchern bestrahlt; eine Kennzeichnung von Produkten der 2. Generation als mit bestrahlten Ingredientien hergestellt ist bisher nicht vorgeschrieben.

10 Gesetzliche Regelungen

Auf der Grundlage des Expertenurteils zur gesundheitlichen Unbedenklichkeit [9] wurde ein Codex Alimentarius-Standard [29] vereinbart, um den internationalen Handel mit bestrahlten Lebensmitteln zu erleichtern. Darin werden die für eine Lebensmittelbestrahlung einsetzbaren Strahlungsarten eingegrenzt, zusätzlich wird in einem Code of Practice festgelegt, wie die mittlere Dosis nach Gl. (2) ("overall average dose") zu bestimmen und die Einhaltung aller Regeln bei der praktischen Durchführung der Bestrahlung zu überwachen und zu dokumentieren ist. Allerdings hat keines der Länder, in denen es bisher Zulassungen für bestrahlte Lebensmittel gibt [59], die Codex-Regeln zum Bestandteil der nationalen Gesetzgebung gemacht. In der Bundesrepublik Deutschland schließt die Systematik des Lebensmittel- und Bedarfsgegenstände-Gesetzes ein solches Vorgehen auch grundsätzlich aus. Die Liste der weltweit zahlreichen Zulassungen [18] und auch der Zulassungen innerhalb der EG (Tab. 3) kann darüber hinwegtäuschen, daß nur von wenigen Zulassungen auch Gebrauch in praktisch bedeutsamen Umfang gemacht wird. Die Angaben über das bisher erreichte Ausmaß [17] zeigen, daß es sich bisher noch um kleine Mengen handelt, wobei eine steigende Tendenz unterstellt wird.

11 Bestrahlung von Schüttgut

11.1 Stand der Technik

Die überwiegende Anzahl aller Anwendungsmöglichkeiten der Lebensmittelbestrahlung setzt voraus, daß die Lebensmittel verpackt sind, damit eine spätere Rekontamination oder Infektion ausgeschlossen ist. In einigen wenigen Fällen – z. B. Keimungshemmung bei Kartoffeln und Zwiebeln – kommt es auf die Verpackung nicht an, weil ein biologischer Prozeß das Ziel der Bestrahlung ist. Aber schon bei der Reifungshemmung und der Insektenbekämpfung an frischem Obst ist die Verpackung Voraussetzung für den weiteren, schonenden Transport zu Markt und Verbraucher. Solche Produkte werden daher in der Regel auch in ihrer Verpackung bestrahlt. Es ist der bereits genannte Vorteil der ionisierenden Strahlung, daß sie das Verpackungsmaterial ohne Beeinträchtigung zu durchdringen vermag. Einige Lebensmittel werden jedoch in großem Maßstab als Schüttgüter gelagert und transportiert; bei ihnen stellt die Verpackung nur für den Zeitraum der Bestrahlung einen zusätzlichen und vermeidbaren Aufwand dar. Insbesondere bei Getreide und anderen Schüttgütern hat es Versuche zur Bestrahlung bis in den großindustriellen Maßstab gegeben.

In Odessa, UdSSR, wurde 1980 eine Bestrahlungsanlage für Getreide errichtet [60]. Sie besteht aus 2 parallelen Bestrahlungssystemen mit je einem 1,4-MeV-Elektronenbeschleuniger und einer Beschickungsanlage. Das Getreide wird (Abb. 5) mit einem Becherförderwerk in einen Puffertsilo in etwa 14 m Höhe gebracht und fällt dann etwa 6,5 m in die Bestrahlungszone. Die Fallstrecke ist 1,5 m breit wie auch die Bestrahlungszone; sie biegt am Ende fast in die Waagrechte um, weil dieser Beschleuniger aus technischen Gründen nur vertikal aufgestellt werden darf. Wegen der Staubentwicklung ist die Anlage mit einer Absaugvorrichtung direkt im Bestrahlungsbereich ausgerüstet. Die elektrische Leistung von 20 kW des 1,4-MeV-Beschleunigers entspricht einem Durchsatz von 200 t/h bei einer Dosis von 200 Gy (4×10^7 Gy h/kg). Seit 1983 wird die Anlage zur Desinfestation eingesetzt, wobei jährlich etwa 400 000 t Getreide, vorwiegend Weizen, behandelt werden [61]. Nach Angaben sowjetischer Wissenschaftler

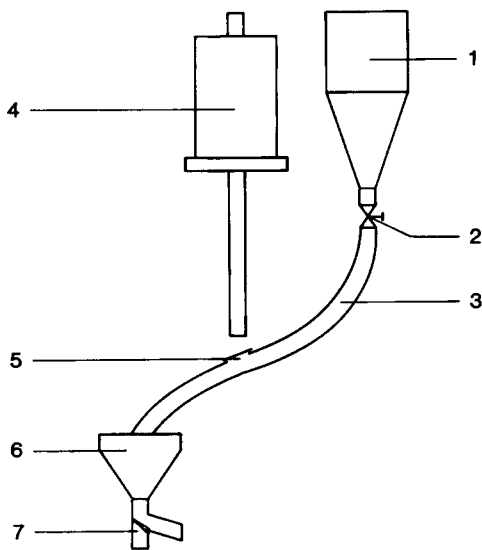


Abb. 5. Schema der Pilotanlage zur Getreidebestrahlung in Odessa, UdSSR: 1 Getreide-Puffersilo; 2 Dosiervorrichtung; 3 Fallstrecke; 4 Elektronenbeschleuniger (1,4 MeV, 20 kW); 5 Bestrahlungszone; 6 Dämpfungskammer; 7 Verteilerkammer mit Kippklappe.

wurden umfassende dosimetrische Untersuchungen durchgeführt, die allerdings nicht als Publikation zugänglich sind. Eine verlässliche Prozeßkontrolle und Dosimetrie ist notwendig, da die Getreidekörner mit etwa 6,5 m/s die Bestrahlungszone passieren und die mittlere Verweilzeit im Elektronenstrahl nur etwa 0,1 s beträgt. Unmittelbar vor der Bestrahlungszone wird zwar durch einen Abstreifer die Dicke der Getreideschicht auf 9 mm begrenzt, entsprechend der Eindringtiefe der 1,4-MeV-Elektronen; der Getreidefluß ist jedoch zeitlich nicht konstant, und jede Schüttdichteschwankung im Bestrahlungsbereich führt zur Änderung der absorbierten Dosis. Die Bestrahlungskosten wurden mit etwa 0,6 Rubel/t angegeben [61], was deutlich weniger als die Kosten der in der UdSSR weit verbreiteten Begasung sein soll.

In Savannah, Georgia/USA, wurde eine Pilotanlage zur Desinfestation von Getreide mittels Bestrahlung im Jahr 1965 er-

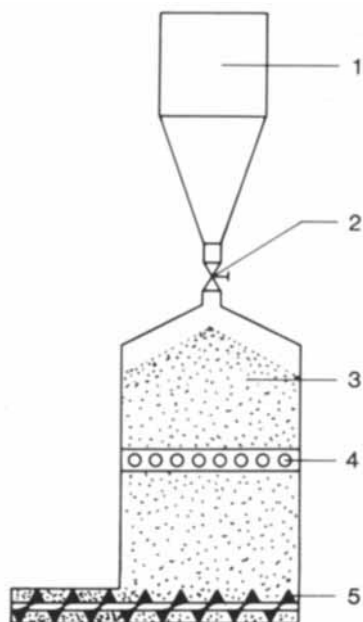


Abb. 6. Schema der ehemaligen Pilotanlage zur Getreidebestrahlung in Savannah, USA: 1 Vorratsbunker; 2 Absperrschieber; 3 Schüttgut; 4 Kobalt-60-Stäbe mit Halterung; 5 Austrag.

richtet [62]. Das Konzept wurde in einer umfassenden Studie [63] entwickelt. Die wirtschaftliche Lösung war, das Schüttgut unter Einfluß der Schwerkraft durch ein Gitter von Kobaltstäben fließen zu lassen und die Fließgeschwindigkeit über die Austragsschleuse zu bestimmen (Abb. 6). Zusätzlich konnten in der Anlage nach einer Umrüstung der Kobaltquelle auch verpackte Produkte wie Getreide in Säcken bestrahlt werden. Das Konzept der Anlage hat sich nach allen betriebstechnischen Aspekten bewährt [64]. Die vorgeschriebene Mindestdosis für die Insektenbekämpfung betrug 200 Gy. Wenn die Anlage so eingestellt wurde, daß dieser Mindestwert eingehalten wurde, betrug der Höchstwert 400 Gy [37]. Die Messungen wurden mittels Lithiumfluorid und Thermolumineszenz-Messung durchgeführt. Das Dosimeterpulver wurde in kleinen Kapseln dem Getreidestrom beige-mischt. Durch Beobachtung des Pfades der Kapseln und auch von Strömungsfäden gefärbten Getreides wurde zuvor sicher-gestellt, daß die Kapseln das gleiche Fließverhalten wie das Getreide aufwiesen. Da die Insektenbekämpfung in Getreide heute keine große Bedeutung mehr in den USA hat, ist die Anlage nicht mehr in Betrieb. Eine ähnliche Anlage wurde im Auftrag der International Atomic Energy Agency in Iskender-un, Türkei, errichtet. Sie wurde aber aus politischen Grün-den nicht in Betrieb genommen.

In Mexico-City, Mexico, wurde (vermutlich 1973) eine De-monstrationsanlage zur Desinfestation von Getreide mittels Bestrahlung in Betrieb genommen [38]. Der Aufbau ähnelt der sowjetischen Anlage (vgl. Abb. 5), jedoch wird ein van-de-Graaf-Beschleuniger für 1-MeV-Elektronen eingesetzt; die Körner passieren das Bestrahlungsfeld auf einer schrägen Rutsche. Die Ergebnisse der Dosimetrie für die Bestrahlung von Mais als Schüttgut sind in zwei Berichten zusammenge-stellt [65, 66]. Als Dosimeter wurde ebenfalls Lithiumfluorid in Kapseln eingesetzt.

11.2 Eigene Untersuchungen zur Schüttgutbestrahlung

Zur Bestrahlung von Schüttgütern wie Gewürzen wurde eine Pilotanlage aufgebaut, um sowohl die Bedingungen für eine zuverlässige Dosimetrie unter allen Betriebsbedingungen als auch die Möglichkeiten einer Einflußnahme auf die Bestrahlungsparameter zur Erzielung einer optimalen Bestrahlung zu untersuchen (Abb. 7). Die Besonderheit dieser Anordnung liegt darin, daß die Bestrahlungszone durch Einbau einer Schwingrinne zu einem aktiven Element gemacht wurde. Erste Untersuchungen der Geschwindigkeitsprofile in der Schwingrinne in Abhängigkeit von Betriebsparametern (Frequenz, Anstellwinkel, eingebaute Hürden) haben gezeigt, daß im Grundsatz die Geschwindigkeitsverteilung so beeinflußt werden kann, daß sie die zu erwartenden Tiefendosisverteilung im Schüttgut annähernd kompensiert und so zu einer homogenen Bestrahlung beiträgt. Gerade etwa bei einer Gewürzbestrahlung, wo eine Mindestdosis von 8 kGy gefordert wird, gesetzlich aber höchstens 10 kGy als mittlere Dosis zugelassen werden, muß einiger Aufwand getrieben werden, um diese Grenzwerte einzuhalten. Die Alternative, dünnere Schichten zu bestrahlen, führt zu höheren Behandlungskosten, weil dann ein großer Anteil der Strahlungsenergie nicht absorbiert wird.

Zur Bestimmung der Tiefendosisverteilung wurden zunächst ruhende Schüttgüter wie Mais und Weizen sowie zu Vergleichszwecken Wasser bestrahlt. Als Strahlenquelle diente ein 10-MeV-Elektronen-Linearbeschleuniger mit einer maximalen Strahlleistung von 5 kW. In verschiedener Tiefe wurden sehr dünne Farbstoffdosimeter eingebracht, die den Dosisverlauf nicht beeinflussen. In Abb. 8 ist der Dosisverlauf

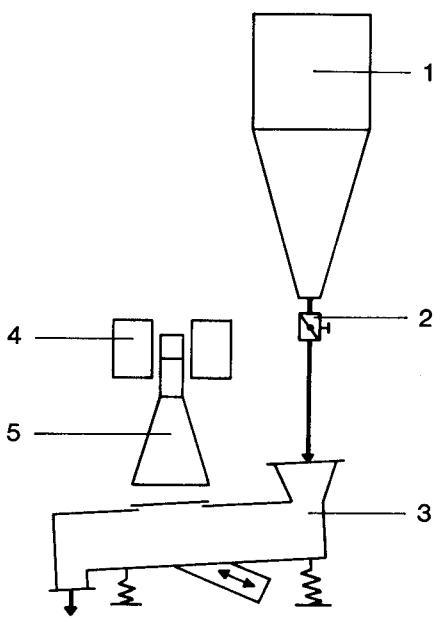


Abb. 7. Eigene Pilotanlage zur kontinuierlichen Bestrahlung von Schüttgütern: 1 Vorratssilo; 2 Dosiervorrichtung; 3 Schwingrinne; 4 Umlenkmagnet beim Linearbeschleuniger; 5 Strahlaustritt.

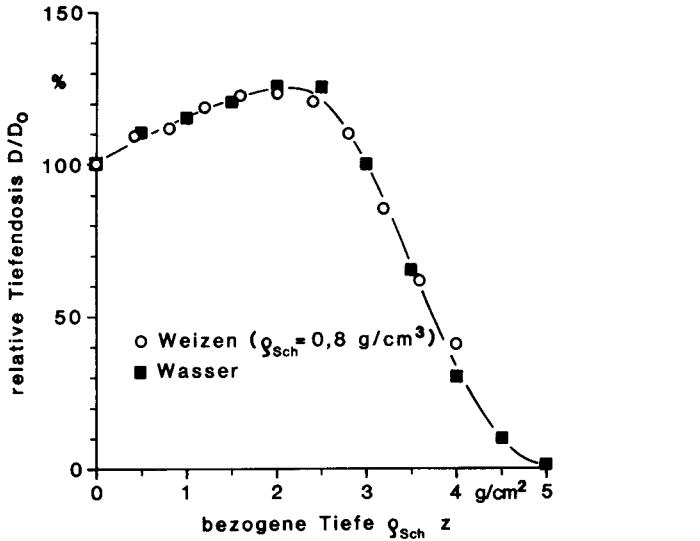


Abb. 8. Tiefendosiskurve in Weizen und in Wasser für einen gesamnten, breiten Strahl von 10-MeV-Elektronen.

normiert auf die Dosis D_0 an der Eintrittsoberfläche dargestellt. Trägt man die relative Dosis D/D_0 über der bezogenen Tiefe auf, also über dem Produkt aus Schüttgutdichte ρ_{sch} und der Eindringtiefe z , so fallen die Tiefendosiskurven im Rahmen der Meßgenauigkeit für die untersuchten Stoffe zusammen. Der gleichmäßig flache Anstieg der Kurve vor dem Maximalwert ist aus den Streubedingungen eines breiten, über das Gut bewegten Strahles zu erklären. Die in der Literatur üblicherweise angegebene Tiefendosiskurve (vgl. Abb. 1) bezieht sich auf einen engen, kollimierten Elektronenstrahl und weicht von dem in Abb. 8 gezeigten Kurvenverlauf ab. Um eine konstante Tiefendosis D_v im bewegten Schüttgut auf der Schwingrinne zu erreichen, muß die Bedingung

$$D_v = D(z) \bar{v}/v(z) = \text{konst.} \quad (11)$$

erfüllt sein. Hierin bedeuten $\bar{v} = \dot{V}/A$ (V = Volumenstrom; A = Querschnittsfläche) die mittlere Geschwindigkeit des Schütt-

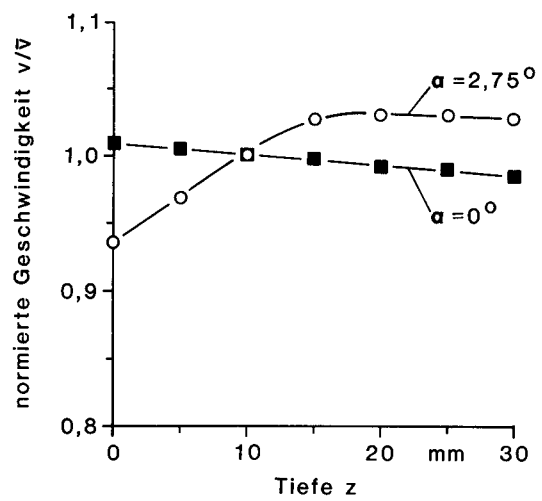


Abb. 9. Geschwindigkeitsverteilung bei Weizenkörnern in der Tiefe einer Schwingrinne; α Anstellwinkel des Bodens der Schwingrinne; z Tiefe von der Oberfläche des Gutes aus.

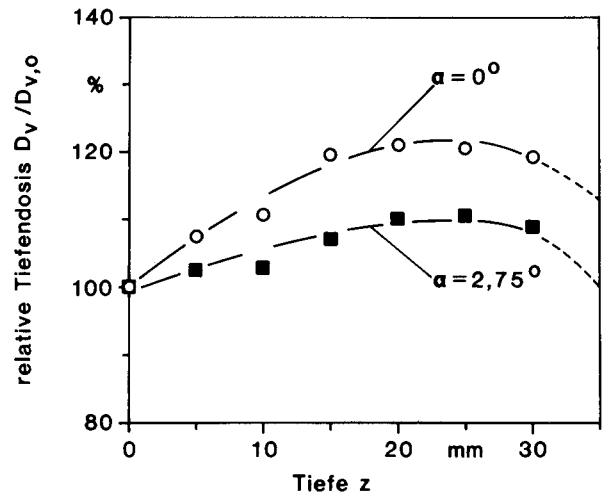


Abb. 10. Tiefendosisverteilung bei Weizenkörnern in einer Schwingrinne für 10-MeV-Elektronen; α Anstellwinkel des Bodens der Schwingrinne; z Tiefe von der Oberfläche des Gutes aus.

gutes und $v(z)$ die Geschwindigkeitsverteilung des Schüttgutes längs der Tiefe z , wobei $z = 0$ die Gutoberfläche angibt. Die Geschwindigkeitsverteilung $v(z)$ des Schüttgutes auf der Schwingrinne kann reproduzierbar variiert werden; ein Beispiel zeigt Abb. 9 für zwei unterschiedliche Anstellwinkel α der Schwingrinne, wobei $v(z)$ mittels eines faseroptischen Systems und einer Kreuzkorrelation gemessen wurde. Kombiniert man diese Geschwindigkeitsverteilung mit der Tiefendosisverteilung nach (Abb. 8), so erhält man die relative Tiefendosisverteilung im bewegten Schüttgut (Abb. 10) aus der Beziehung

$$\frac{D_v}{D_{v,0}} = \frac{D(z)}{D_0} \frac{\bar{v}}{v(z)} \quad (12)$$

Man erkennt aus Abb. 10, daß für einen Anstellwinkel $\alpha = 2,75^\circ$ der Schwingrinne im Bereich $z \leq 30$ mm ein Verhältnis aus maximaler zu minimaler Dosis von weniger als 10% resultiert. Eine derart günstige Tiefendosisverteilung, die für eine Gewürzbestrahlung Bedeutung hat, konnte bisher noch mit keiner der bekannten Anordnung zur Schüttgutbestrahlung erreicht werden. In weiteren Vorversuchen ist zu klären,

ob eine noch günstigere Dosisverteilung erzielbar ist. Nach Fertigstellung des Elektronenstrahl-Führungssystems der Pilotanlage (Abb. 7) müssen die Ergebnisse noch mit Hilfe einer geeigneten Dosimetrie überprüft werden. Über diese Ergebnisse wird in einer späteren Arbeit berichtet. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, daß sich Alanin und Glutamin als Lebensmittelbestandteile zur Dosimetrie mittels Lyolumineszenz eignen. Sie wurden in Gelatine-Kapseln, wie sie für Arzneimittel üblich sind, den Schüttgütern in einer Schwingrinne beigemischt. Durch Wahl eines Füllgewichtes, das der Schüttgutedichte des jeweiligen körnigen Materials entspricht, konnte erreicht werden, daß die Kapseln sich nicht vom Körnerstrom trennten.

Eingegangen am 28. Oktober 1987 [B 5390]

Literatur

- [1] Kuprianoff, J.; Lang, K.: Strahlenkonservierung und Kontamination von Lebensmitteln, Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, Darmstadt 1960.
- [2] Josephson, E. S.; Peterson, M. S. (Hrsg.): Preservation of Food by Ionizing Radiation, CRC Press Raton, Florida, USA 1981.
- [3] Elias, P. S.; Cohen, A. J. (Hrsg.): Recent Advances in Food Irradiation, Elsevier, Biomedical, Amsterdam 1983.
- [4] Ehlermann, D. A. E.; Grünewald, Th.: ZFL, Int. Lebensm. Technol. Verfahrenstech. 35 (1984) S. 426/433.
- [5] Diehl, J. F., in: Developments in Food Preservation – 2 (Thorne, S. (Hrsg.), Applied Science Publ. Ltd., Barking, Essex, England 1985.
- [6] Grünewald, Th.: Z. Lebensm. Unters. Forsch. 180 (1985) S. 357/368.
- [7] IAEA (Hrsg.): Food Irradiation Processing, Int. Atomic Energy Agency (IAEA), Wien 1985.
- [8] Urbain, W. M.: Food Irradiation, Academic Press Inc. Ltd., London 1986.
- [9] Wholesomeness of Irradiated Food, Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee, Technical Series 659, WHO, Genf 1981.
- [10] Ehlermann, D. A. E., in: Recent Advances in Food Irradiation (Elias, P. S.; Cohen A. J. (Hrsg.), Elsevier Biomedical, Amsterdam 1983.
- [11] Killoran, J. J.: Mod. Packag. 40 (1967) S. 179/183.
- [12] Zehnder, H. J.: alimenta 23 (1984) S. 47/50.
- [13] Umeda, K., in: Requirements for the Irradiation of food on a Commercial Scale, IAEA, Wien 1975, S. 113/131.
- [14] Diehl, J. F.: Lebensm. Technol. 17 (1984) S. 16/19.
- [15] Weber, H.: Fleischwirtschaft 63 (1983) 1, S. 1/6.
- [16] Leistner, L.: Ergebnisprotokoll des Workshops Gewürzentkeimung, veranstaltet in der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach 1983, S. 6.
- [17] Anon.: Food Irradiat. Newsl. 10 (1986) Nr. 2, S. 48/52.
- [18] Anon.: Food Irradiat. Newsl., Suppl. to 11 (1987) S. 1.
- [19] Hug, O.; Kellerer, A. M.: Stochastik der Strahlenwirkung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1966.
- [20] Brynjolfsson, A.: Food Preservation by Irradiation, IAEA, Wien 1978, S. 227/239.
- [21] IAEA (Hrsg.): Training Manual on Food Irradiation Technology and Techniques, Second Ed., Techn. Reports Series No. 114, IAEA, Wien 1982.
- [22] Quinn, J. D., et al. in IAEA (Hrsg.): Microbiological Problem in Food Preservation by Irradiation, IAEA, Wien 1967, S. 1/13.
- [23] Grecc, N., et al. in IAEA (Hrsg.): Radiation Preservation of Food, IAEA, Wien 1973, S. 177/191.
- [24] Maxcy, R. B., et al.: Radiation Resistance of Asporogenous Bacteria, Tech. Rep. 76-43-FSL; U.S. Army Res. Dev. Command, Natick (Mass.) 1976.
- [25] Silverman, G. J.; Sinskey, A. J., in: Disinfection, Sterilization and Preservation (Block, S. S. (Hrsg.), Lea & Febiger, Philadelphia 1977.
- [26] Grünewald, Th.: Z. Lebensm. Technol. Verfahrenstech. 30 (1979) S. 89/94.
- [27] Mahesh, K.; Vij, D. R. (Hrsg.): Techniques of Radiation Dosimetry, Wiley Eastern Ltd., New Delhi 1985.
- [28] Chadwick, K. H.; Ehlermann, D. A. E.; McLaughlin, W. L.: Manual of Food Irradiation Dosimetry, IAEA, Wien 1977, STI/DOC/10/178.
- [29] Codex General Standard for Irradiated Foods and Recommended International Code of Practice for the Operation of Radiation Facilities Used for the Treatment of Foods, Codex Alimentarius Commission, FAO, WHO, Rom 1984, CAC/Vol. XV-Ed.1.
- [30] Vas, K.; Beck, E. R. A.; McLaughlin, W. L.; Ehlermann, D. A. E.; Chadwick, K. H.: Acta Aliment. 7 (1978) S. 343/349.
- [31] McLaughlin, W. L.; Jarret, R. D.; Olejnik, T. A., in: Preservation of Food by Ionizing Radiation (Josephson, E. S.; Peterson, M. S. (Hrsg.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1981, Bd. 1, S. 189/245.
- [32] Chadwick, K. H.; Oosterheert, W. F.: Int. J. Appl. Radiat. Isot. 37 (1986) S. 47/52.
- [33] Working Group on Health Impact and Control Methods of Irradiated Foods, Summary Report, WHO, Regional Office for Europe, 1987, ICP/CEH 038 (S).
- [34] International Dose Assurance Service: Food Irradiat. Newsl. 9 (1985) Nr. 2, S. 24/25.
- [35] McLaughlin, W. L.; Miller, A.; Uribe, R. M.: Radiat. Phys. Chem. 22 (1983) S. 21/29.
- [36] McLaughlin, W. L.; Radak, B. B.; Farahani, M.: Trans. Amer. Nucl. Soc. 49 (1985) S. 8/9.
- [37] Tilton, E. W.; Brower, J. H.; Cogburn, R. R.: Int. J. Appl. Radiat. Isot. 22 (1971) S. 577/580.
- [38] Uribe, R. M.; de la Piedad, A.; Adem, E.; Reyes, J.: Rev. Mex. Fis. 26 (1980) S. 421/427.
- [39] Grünewald, Th.; Rudolf, M.: Atomkernenergie-Kerntechnik 43 (1983) S. 284/286.
- [40] Ehlermann, D. A. E.; Rudolf, M.; Grünewald, Th., in: Food Irradiation Processing, IAEA, Wien 1985, S. 349.
- [41] Ehlermann, D. A. E., in: WHO/BGA/GSF Working Group: Health Impact and Control Methods of Irradiated Foods, Neuberberg 17–21. Nov. 1986, im Druck.
- [42] Ehlermann, D. A. E., in: WHO/BGA/GSF Working Group: Health Impact and Control Methods of Irradiated Foods, Neuberberg 17.–21. Nov. 1986, im Druck.
- [43] Ehlermann, D. A. E., in: Industrial Applications of Radioisotopes and Radiation Technology, IAEA, Wien 1982, S. 499.
- [44] Brynjolfsson, A., in: Factors Influencing the Economical Application of Food Irradiation, IAEA Panel Proceedings Series, Wien 1973, S. 13/35.
- [45] Deitch, J., in: Radiation Preservation of Food, IAEA Proceedings Series, Wien 1973, S. 593/615.
- [46] Ketchum, H. W.: 6th Annual AEC Food Irradiation Contractors Meeting, Washington 1966, CONF-661017, S. 81.
- [47] Southern, E. M.: Food Manuf. 42 (1967) S. 19/26.
- [48] Rhodes, D. N., et al., in: Application of food irradiation in developing countries, IAEA, Wien 1966, S. 39/63.
- [49] Brynjolfsson, A.: Paper presented to Panel on Radiation Processing Techniques of Special Interest to Developing Countries, US Army Natick Laboratories, Natick 1970.
- [50] Anon.: Cost-benefit study of selected products in the Atomic Energy Commission's low-dose food irradiation program, Daniel Yankelovich Inc.; U. S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, Springfield, USA 1966, NYO-3666-1.
- [51] Brodrick, H. T.: Persönliche Mitteilung.
- [52] Anon.: Untersuchungen für die Eignung ionisierender Strahlen zur Verlängerung der Lagerfähigkeit von Fischpräserven. III. Technisch-wirtschaftliche Untersuchung, Batelle-Institut e. V., Frankfurt 1970.
- [53] Ehlermann, D.: Lebensm. Wiss. Technol. 10 (1977) S. 114/119.
- [54] Deitch, J.: CRC Critical Reviews in Food Sci. Nutr. 17 (1982) S. 307/334.
- [55] Bögl, W.; Heide, L.: Fleischwirtschaft 64 (1984) S. 1120/1126.
- [56] Delincée, H.; Ehlermann, D. A. E., in: WHO/BGA/GSF Working Group: Health Impact and Control Methods of Irradiated Foods, Neuberberg 17.–21. Nov. 1986, im Druck.
- [57] Heide, L.; Delincée, H.; Demmer, D.; v. Eichenauer, D.; Grabowski, H.-W.; Pfeilsticker, K.; Redel, H.; Schilling, M.; Bögl, W.: Be-

- richt des Instituts für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, 1986, ISH-Heft 101.
- [58] *Bruhn, C. M.; Schutz, H.; Sommer, R.:* Food Technol. 40 (1986) Nr. 1, S. 86/91.
- [59] Legislation in the Field of Food Irradiation, IAEA, Wien 1987 IAEA-TECDOC-422.
- [60] *Zakladnoj, G., et al.:* Mukomol'no Elevat. Kombikormovaya Prom. (1981) Nr. 6, S. 29.
- [61] Anon.: Food Irradiat. Newsl. 11 (1987) Nr. 1, S. 19/25.
- [62] *Laudani, H.; Tilton, E. W.; Brower, J. H.:* Food Irradiat. 6 (1965) Nr. 1/2, S. A6/A9.
- [63] Anon.: Cobalt-60 Bulk Grain Irradiator, Brookhaven National Laboratory, Upton, N. Y., USA 1963, BNL-810 (T-312).
- [64] *Tilton, E. W., et al.:* Int. J. Radiat. Eng. 1 (1971) S. 49/59.
- [65] *Uribe, R. R. M., et al.:* Instituto de Fisica, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 1974, IFUNAM-74-205.
- [66] *Adem, Ch. E., et al.:* Instituto Fisica, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, 1974, IFUNAM-74-408.
-