

EXPERTENGUTACHTEN ZUR  
LEBENSMITTELSICHERHEIT  
*LEBENSMITTELBESTRAHLUNG*

im Auftrag des  
Bundeskanzleramts

erstellt durch:  
o. Univ. Prof. Dr. I. Elmadfa  
Mag. A. Titz  
Mag. P. Burger

Institut für Ernährungswissenschaften der Universität Wien

Wien 1999

Inhaltsverzeichnis	
Zusammenfassung/Summary	4
1 Einleitung	6
2 Gesetzlicher Hintergrund	7
2.1 Österreich	7
2.2 Europäische Union	7
2.2.1 Rahmenrichtlinie	9
2.2.1.1 Kennzeichnung	10
2.2.1.2 Zulassungsbedingungen	11
2.2.2 Durchführungsrichtlinie	12
2.2.3 Diskussion möglicher Zulassungserweiterungen	12
2.3 Weltweit	14
3 Methoden der Bestrahlung von Lebensmitteln	16
3.1 Behandlung mit niedrigen Bestrahlungsdosen	16
3.2 Behandlung mit mittleren Bestrahlungsdosen	16
3.3 Behandlung mit hohen Bestrahlungsdosen	17
4. Reaktionsmechanismen der Lebensmittelbestrahlung	17
5 Auswirkung der Bestrahlung auf verschiedene Lebensmittelinhaltsstoffe	18
5.1 Auswirkungen der Bestrahlung auf Wasser	18
5.2 Auswirkungen der Bestrahlung auf Kohlenhydrate	19
5.3 Auswirkungen der Bestrahlung auf Proteine	21
5.4 Auswirkungen der Bestrahlung auf Lipide	22
6 Auswirkungen der Bestrahlung auf die ernährungsphysiologischen Eigenschaften eines Produkts	23
6.1 Makronährstoffe	23
6.2 Mikronährstoffe - Vitamine	24
7 Mikrobiologische Produktsicherheit und Schutz vor Parasiten durch Nutzung der Lebensmittelbestrahlung	24
7.1 Bakterien	25
7.2 Hefen und Schimmelpilze	25
7.3 Viren	26

7.4 Protozoa	26
7.5 Parasitische Helminthen	26
7.6 Insekten	27
8. Toxikologie	28
9. Analysenmethoden zum Nachweis bestrahlter Lebensmittel	29
9.1 Chemische Methoden	31
9.1.1 Nachweis von 2-Alkylcyclobutanonen	31
9.1.2 Nachweis von flüchtigen Kohlenwasserstoffen	32
9.2 Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie	33
9.3 Lumineszenzmethoden	33
9.3.1 Thermolumineszenz	34
9.3.2 Photostimulierte Lumineszenz	34
9.3.3 Chemilumineszenz	35
10. Schlußfolgerung	36
11 Literaturverzeichnis	37

## EXPERTENGUTACHTEN ZUR LEBENSMITTELSICHERHEIT: LEBENSMITTELBESTRAHLUNG

### ZUSAMMENFASSUNG

Pathogene und Parasiten in Nahrungsmitteln sind weltweit Auslöser von gefährlichen Krankheiten und verursachen zusammen mit Insekten große quantitative Nachernteverluste. Zur Sicherung der Nahrungsmittelversorgung einer ständig steigenden Weltbevölkerung wird die Behandlung von Lebensmitteln mit ionisierender Strahlung als eine der wirksamsten Technologien angesehen.

Ausgehend von jahrzehntelangen Forschungen kam das *Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food* bereits im Jahr 1980 zu dem Schluß, daß die Bestrahlung von Lebensmitteln bis zu einer Dosis von 10 kGy kein toxikologisches Risiko darstellt. Im September 1997 erweiterten sie ihre Stellungnahme insofern als jegliche Bestrahlungsdosis (auch > 10 kGy) – so weit sie technologisch erforderlich ist – sicher ist und den ernährungsphysiologischen Anforderungen genügt. Aufgrund dessen stimmten viele Regierungen – auch einige Länder innerhalb der EU – dem Inverkehrbringen von strahlenbehandelten Lebensmitteln zu. Durch die EU-Richtlinien 1999/2/EG und 1999/3/EG sollen nun die Handelshemmnisse, die durch die unterschiedliche Praxis in den Mitgliedstaaten bezüglich der Behandlung von Lebensmitteln mit ionisierenden Strahlen entstehen, beseitigt werden. Ein aktueller Änderungsvorschlag der Codex-Alimentarius-Kommission zum Standard über Lebensmittelbestrahlung soll die Basis für eine Anpassung der EU-Richtlinien an die Regeln des Codex und an die Bedingungen des WTO-Abkommens werden.

Um ein hohes Maß an Sicherheit, wie die Minimierung der ernährungsphysiologischen Veränderungen einerseits und Schutz vor Pathogenen, Parasiten und Insekten andererseits, zu gewährleisten, sind bestimmte Bedingungen zu erfüllen. So dürfen nur bestimmte Strahlungsarten (Gammastrahlen, Röntgen- und Elektronenstrahlen auf niedrigem Energieniveau, um Radioaktivität in Lebensmitteln zu vermeiden) eingesetzt werden, müssen Dosiskontrollen während des Bestrahlungsprozesses stattfinden, Qualitätsstandards hinsichtlich chemischer und physikalischer Eigenschaften der Verpackungsmaterialien eingehalten und verlässliche, schnelle und einfache Analysenmethoden zum Nachweis bestrahlter Lebensmittel angewandt werden.

Da es in Lebensmitteln durch die Bestrahlung nur zu minimalen Veränderungen der Inhaltsstoffe kommt und die ernährungsphysiologische Qualität der Lebensmittel in keiner Weise beeinträchtigt wird, könnte in absehbarer Zukunft, wenn sachlich darüber informiert wird, die Akzeptanz bestrahlter Lebensmittel in der Bevölkerung erhöht werden.

## Expert opinion on Food safety: Food Irradiation Summary

Pathogens and parasites in food cause various dangerous diseases all over the world and are – together with insects – responsible for big quantitative aftermath losses. To grant food supply of a continuously increasing world population the treatment of food with ionizing radiation is regarded as one of the most effective technologies. Originating in decades of research the Joint FAO/IAEA/WHO *Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food* has decided already in 1980 that the irradiation of food up to 10 kGy does not pose any toxicologic risk. In September 1997 they extended their opinion inasmuch as to determine that food irradiated to any dose appropriate to achieve the intended technological objective (also > 10 kGy) is both safe to consume and nutritionally adequate. As a consequence many governments – including some EU member states – initiated regulatory actions permitting the irradiation of a considerable number of food commodities. The guidelines 1999/2/EC and 1999/3/EC shall remove existing trade barriers concerning irradiated foods among the member states. A current modification proposal for the Standard on Food Irradiation of the Codex-Alimentarius-Commission will be the basis for adapting the guidelines of the EC to the rules of the Codex and the terms and conditions of the WTO.

To grant a high level of safety such as minimizing nutritional changes and protection against pathogens, parasites and insects, special requirements are to meet: only specific sources of radiation (gamma-rays, X-ray and electron radiation on a low energy level to save food from radioactivity) may be used, radiation doses during the irradiation process have to be checked, quality standards with a view to chemical and physical properties of the packaging materials have to be adhered and reliable, quick and easy analytical methods for the evidence of irradiated food have to be applied.

As there are only slight changes of food components in the course of irradiation and the nutritional quality of food is not affected, the acceptance of irradiated foods among the population could be improved soon provided factual information is warranted.

## 1. EINLEITUNG

Die gesundheitlichen und sozio-ökonomischen Auswirkungen der Kontamination von Lebensmitteln werden weltweit immer alarmierender.

Das Problem des Befalls der Nahrung mit Pathogenen und Parasiten ist nicht nur auf die Entwicklungsländer beschränkt, sondern wird auch in zunehmendem Maße in den industrialisierten Ländern zu einem Problem, wodurch es auch im internationalen Handel zu großen Einbußen kommt.

Im Laufe der Jahre wurden eine Vielzahl von Konservierungsmethoden entwickelt, wie z.B. Trocknen, Salzen, Kochen, Räuchern, Tiefrieren und auch die chemische Konservierung. Eine der neuesten und wirksamsten, aber auch eine der umstrittensten Methoden, ist die Behandlung von Lebensmitteln mit ionisierenden Strahlen (NAKAJIMA, 1989). Durch dieses Verfahren könnten in den Industrieländern Produkte mit einem höchsten Maß an Qualität und Hygiene angeboten werden. In den Entwicklungsländern könnten die Verluste zwischen Ernte und Verbrauch bedeutend minimiert werden (MOOG, 1989). In den letzten Jahren tauchen aber immer wieder Diskussionen über die Sicherheit der auf solche Weise behandelten Produkte auf, und das obwohl das *„Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Food“* bereits 1980 zu dem Schluß kam, daß „die Bestrahlung von Lebensmitteln bis zu einer „overall average dose“ von 10 kGy kein toxikologisches Risiko darstellt und folglich die weitere toxikologische Untersuchung von so behandelten Lebensmitteln nicht mehr erforderlich ist“ (WHO, 1981).

Aufgrund dieser Aussage stimmten viele Regierungen der Einführung von strahlenbehandelten Lebensmitteln auf ihren Märkten zu. Bisher ist in über 40 Ländern die Bestrahlung von insgesamt mehr als 50 Produkten erlaubt und jährlich werden mehrere tausend Tonnen an Lebensmitteln einer Behandlung mit ionisierenden Strahlen unterzogen (DIEHL, 1995).

## **2. GESETZLICHER HINTERGRUND**

### **2.1 Österreich**

In Österreich ist die Behandlung von Lebensmitteln mit ionisierenden Strahlen durch §14 LMG geregelt. Gemäß diesem unterliegt die Behandlung von Lebensmitteln, Verzehrprodukten und Zusatzstoffen mit ionisierenden Strahlen dem Verbotsprinzip, d.h. es bedarf einer Zulassung der Bestrahlung durch eine Verordnung (§14 Abs. 2) oder einen Bescheid (§14 Abs. 3), in dem auch die Art der Kennzeichnung dieser Produkte geregelt werden muß, da es ebenfalls verboten ist, diese ohne Kennzeichnung in Verkehr zu bringen.

Seit dem Beitritt Österreichs zur Europäischen Union am 1.1.1995 gilt auch in Österreich Gemeinschaftsrecht, d.h. es muß u.a. der freie Warenverkehr innerhalb des europäischen Binnenmarktes ermöglicht werden.

### **2.2 Europäische Union**

Auch innerhalb der EU erlauben bereits einige Länder das Inverkehrbringen von gewissen bestrahlten Lebensmitteln.

Durch die Richtlinien 1999/2/EG und 1999/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Februar 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über mit ionisierenden Strahlen behandelte Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile sollen nun die Handelshemmnisse, die durch die unterschiedliche Praxis bezüglich der Behandlung von Lebensmitteln mit ionisierenden Strahlen in den Mitgliedstaaten entstehen, beseitigt werden.

Dem Parlament und Rat ist sehr wohl bewußt, daß dies ein sehr empfindliches Thema bei den Verbrauchern der einzelnen Länder darstellt und für diese auch ein Grund zur Besorgnis ist.

Es wird aber ebenso festgehalten, daß die Bestrahlung kein Ersatz für gute Herstellungs- oder landwirtschaftliche Praxis und für geeignete Hygiene- oder Gesundheitsmaßnahmen sein darf. Lebensmittel dürfen nämlich nur dann bestrahlt werden, wenn dies aus Gründen der Nahrungsmittelhygiene erforderlich ist, oder wenn damit ein technologischer oder sonstiger Vorteil oder Nutzen für den

Verbraucher verbunden ist, sich das Lebensmittel in einwandfreiem Zustand befindet und für den Verzehr geeignet ist.

Wenn ein Mitgliedstaat Grund zur Annahme hat, daß ein bestrahltes Lebensmittel ein Gesundheitsrisiko darstellt, dann ist er ermächtigt, seine Verwendung auszusetzen oder einzuschränken oder die Grenzwerte herabzusetzen, bis eine Entscheidung auf Gemeinschaftsebene getroffen wird.

Die Wahl der Mittel und Methoden für die Überwachung der Bestrahlung wird gemäß Richtlinie 89/397/EWG den einzelstaatlichen Behörden überlassen. Es müssen aber die Qualitätsnormen für die Laboratorien gemäß der Richtlinie 93/99/EWG eingehalten und validierte Analysemethoden verwendet werden.

Außerdem muß der Wissenschaftliche Lebensmittelausschuß (SCF) zu allen unter diese Richtlinie fallenden Fragen, die für die öffentliche Gesundheit von Bedeutung sein könnten, gehört werden.

Bis zum Inkrafttreten der gemeinschaftlichen Positivliste für Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile, die mit ionisierenden Strahlen behandelt werden dürfen, können die Mitgliedstaaten ihre einzelstaatlichen Regelungen weiterhin anwenden.

Ziel der neuen Richtlinien war es nun, eine Angleichung der Rechtsvorschriften der einzelnen Mitgliedstaaten zu erreichen. Der erste diesbezügliche Vorschlag der Kommission wurde bereits 1988 vorgelegt. Nach jahrelanger Diskussion wurde dann 1997 ein Kompromiß erreicht indem der ursprüngliche Vorschlag vom Rat in zwei Teile gespalten wurde:

- a) in eine Rahmenrichtlinie, die die allgemeinen Bestimmungen über die Bestrahlungsvorschriften, über die Bestrahlungsanlagen und über die Kennzeichnung enthält. Sie betrifft die Herstellung, das Inverkehrbringen und die Einfuhr von mit ionisierenden Strahlen behandelten Lebensmitteln. Sie beinhaltet die allgemeinen und technischen Aspekte des Verfahrens.
- b) in eine Durchführungsrichtlinie über die Festlegung einer Gemeinschaftsliste von mit ionisierenden Strahlen behandelten Lebensmitteln und Lebensmittelbestandteilen. Sie enthält eine Liste der Lebensmittel, die mit ionisierenden Strahlen behandelt werden dürfen und die dafür zulässige Höchstdosis.

Die beiden Richtlinien gelten nicht für Lebensmittel, die mit ionisierenden Strahlen von Meß- oder Prüfgeräten bestrahlt worden sind und auch nicht für die Bestrahlung von Lebensmitteln, die für Patienten bestimmt sind, welche unter ärztlicher Aufsicht sterile Nahrung erhalten müssen.

Alle Mitgliedstaaten müssen die erforderlichen Maßnahmen treffen, damit Lebensmittel, die dieser Richtlinie entsprechen, in Verkehr gebracht werden können. Bis zum Ablauf der Übergangsfrist können aber die einzelstaatlichen Beschränkungen beibehalten werden.

Die Einfuhr von bestrahlten Lebensmitteln aus Drittländern ist nur dann erlaubt, wenn diese der Richtlinie 1999/2/EG entsprechen und auch die Bestrahlungsanlagen, die in den begleitenden Papieren angegeben werden müssen, ständigen Kontrollen unterzogen werden und ebenfalls dieser Richtlinie entsprechen.

Die Mitgliedsstaaten haben dafür zu sorgen, daß diese Richtlinie bis spätestens 20. September 2000 in nationales Recht umgesetzt wird, um das Inverkehrbringen und die Verwendung der in der Durchführungsrichtlinie angeführten bestrahlten Lebensmittel zu ermöglichen. Spätestens bis zum 31. Dezember 2000 wird die Kommission einen Vorschlag für die Ergänzung dieser in Richtlinie 1999/3/EG angeführten Positivliste einbringen. Außerdem muß dafür Sorge getragen werden, daß bis spätestens 20. März 2001 das Inverkehrbringen und die Verwendung von bestrahlten Lebensmitteln, die nicht mit dieser Richtlinie übereinstimmen, untersagt werden.

### **2.2.1 Rahmenrichtlinie**

Lebensmittel müssen gemäß Richtlinie 1999/2/EG zum Zeitpunkt der Bestrahlung genußtauglich sein. Die Bestrahlung darf in mehreren Teildosen erfolgen, die zulässige Strahlungshöchstdosis jedoch nicht überschritten werden. Die erneute Bestrahlung von Lebensmitteln ist verboten. Nicht bestrahlt werden dürfen Lebensmittel, die bereits einer chemischen Behandlung unterzogen wurden, welche dem gleichen Zweck dient wie die Bestrahlung.

Die Bestrahlungsanlagen müssen von den Mitgliedstaaten zugelassen sein, sie müssen über ihre Aktivitäten Buch führen und einer ständigen Kontrolle unterliegen. Ständige dosimetrische Kontrollen sind durchzuführen und der untere und obere Grenzwert der absorbierten Dosis sowie die Art der ionisierenden Strahlung ist anzugeben. Die

Berechnung der durchschnittlich absorbierten Gesamtdosis wird in Anhang 3 der Rahmenrichtlinie festgelegt.

Für die Kontrolle der Bestrahlung auf der Stufe des Inverkehrbringens müssen genormte und validierte Analysemethoden verwendet werden, die, wenn sie noch nicht genormt und validiert sind, bis spätestens 1. Jänner 2003 genormt und validiert werden müssen. Die Mitgliedstaaten müssen der Kommission die angewandten Methoden mitteilen, welche dann unter Einbeziehung des Wissenschaftlichen Lebensmittelausschusses die Verwendung und Entwicklung der Methoden bewertet.

#### *2.2.1.1 Kennzeichnung*

Die Etikettierung von mit ionisierenden Strahlen behandelten Lebensmitteln hat gemäß der Richtlinie 79/112/EWG zu erfolgen. Für den Endverbraucher oder für gemeinschaftliche Einrichtungen bestimmte bestrahlte Lebensmittel müssen gemäß Art. 5 Abs. 3 der Richtlinie 79/112/EWG am Etikett den Hinweis „bestrahlt“ oder „mit ionisierenden Strahlen behandelt“ enthalten. Bei lose verkauften Produkten muß ein Schild über oder neben dem Erzeugnis im Zusammenhang mit der Produktbezeichnung auf die Strahlenbehandlung hinweisen.

Wenn ein bestrahltes Produkt in einem anderen Erzeugnis enthalten ist, dann ist dieser Umstand auf dem Verzeichnis der Bestandteile neben dem entsprechenden Inhaltsstoff zu kennzeichnen. Bei lose verkauften Erzeugnissen ist dies wieder auf einem Schild über oder neben dem Erzeugnis anzugeben.

In Abweichung von Art. 6 Abs. 7 der Richtlinie 79/112/EWG ist dieser Hinweis auch dann anzubringen, wenn das bestrahlte Produkt zu weniger als 25% im Enderzeugnis vorhanden ist.

Bei Produkten, die nicht für den Endverbraucher oder gemeinschaftliche Einrichtungen bestimmt sind, müssen die Papiere, die das Produkt begleiten, eindeutig Aufschluß über deren Behandlung oder die Behandlung von deren Inhaltsstoffen geben. Außerdem müssen die Bestrahlungsanlage oder deren Referenznummer angegeben sein.

Die Verpackung muß aus einem Material sein, das für die Bestrahlung geeignet ist.

### 2.2.1.2 Zulassungsbedingungen

In Anhang 1 der Richtlinie 1999/2/EG sind die Bedingungen für die Zulassung der Bestrahlung von Lebensmitteln angeführt:

1. Die Bestrahlung von Lebensmitteln ist nur dann zulässig, wenn sie
  - technologisch sinnvoll und notwendig ist
  - gesundheitlich unbedenklich ist und gemäß den vorgeschlagenen Bedingungen durchgeführt wird
  - für den Verbraucher nützlich ist
  - nicht als Ersatz für Hygiene- und Gesundheitsmaßnahmen oder für gute Herstellungs- oder Landwirtschaftsverfahren verwendet wird.
  
2. Die Bestrahlung von Lebensmitteln darf nur auf die folgenden Zwecke ausgerichtet sein:
  - Verringerung der Krankheitserreger in den Lebensmitteln durch Zerstörung pathogener Mikroorganismen
  - Verringerung des Verderbs von Lebensmitteln durch Verzögern oder Anhalten von Verfallprozessen und durch Zerstörung verderbfördernder Organismen
  - Verringerung der Verluste von Lebensmitteln durch vorzeitiges Reifen, Sprossung oder Keimung
  - Befreiung der Lebensmittel vom Befall durch Schadorganismen der Pflanzen und Folgeerzeugnisse.

In Anhang 2 werden die erlaubten Quellen ionisierender Strahlung festgehalten. Verwendet werden dürfen:

- Gammastrahlen der Radionuklide  $^{60}\text{Co}$  oder  $^{137}\text{Cs}$
- Röntgenstrahlen, die von Geräten erzeugt werden, die mit einer Nennenergie von 5 MeV oder darunter betrieben werden.

- Elektronen, die von Geräten erzeugt werden, die mit einer Nennenergie von 10 MeV oder darunter betrieben werden.

Anhang 3 erklärt die Berechnung der durchschnittlich absorbierten Gesamtdosis durch dosimetrische Messungen.

### **2.2.2 Durchführungsrichtlinie**

In der Durchführungsrichtlinie 1999/3/EG wird eine Liste der Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile festgelegt, die unter Ausschluß aller anderen Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile mit ionisierenden Strahlen behandelt werden dürfen. Die Liste wird stufenweise erstellt und beschränkt sich zur Zeit auf getrocknete aromatische Kräuter und Gewürze, da diese häufig mit Mikroorganismen und/oder deren Stoffwechselprodukten kontaminiert sind und somit eine Gefahr für die öffentliche Gesundheit darstellen.

Da die Begasung mit Ethylenoxid Rückstände hinterläßt und dadurch nicht mehr angewendet werden kann, stellt die Behandlung mit ionisierenden Strahlen eine wirksame Alternative dar, der auch der Wissenschaftliche Lebensmittelausschuß zugestimmt hat. Diese Behandlung liegt somit im Interesse des Schutzes der öffentlichen Gesundheit.

Die Liste, die sich im Anhang dieser Richtlinie befindet, legt auch die für die Behandlung der jeweiligen Produkte zulässige Höchstdosis fest.

Auch die Richtlinie 1999/3/EG ist bis spätestens 20. September 2000 in nationales Recht überzuführen.

### **2.2.3 Diskussion möglicher Zulassungserweiterungen**

Der Wissenschaftliche Lebensmittelausschuß hat am 17.9.1998 zu den bereits bestehenden Vorschlägen acht weitere Lebensmittel diskutiert, die eventuell einer Bestrahlung unterzogen werden und somit zur Positivliste hinzugefügt werden könnten. Diese Produkte werden seit fast 20 Jahren in mindestens einem Mitgliedstaat eingesetzt. Dabei wurde die Sicherheitsbeurteilung *des Joint FAO/IAEA/WHO Expert*

*Committees* von 1981 von Lebensmitteln, die mit einer Dosis bis zu 10 kGy bestrahlt wurden, miteinbezogen.

Folgende Lebensmittel wurden in diesem Zusammenhang diskutiert:

- Froschschenkel: Da der Bedarf an Froschschenkeln in Europa durch heimische Produktion nicht gedeckt werden kann, wird ein Großteil aus Südasien tiefgefroren importiert. Diese sind sehr häufig mit Salmonellen und anderen Fäkalbakterien verunreinigt. Pasteurisation oder chemische Dekontamination kommen dafür nicht in Frage, da sonst inakzeptable organoleptische Veränderungen auftreten oder Rückstände in den Froschschenkeln verbleiben. Eine gute Alternative wäre hier die Bestrahlung des tiefgefrorenen Materials mit einer Maximaldosis von 5 kGy, bei der es auch zu keinen nennenswerten ernährungsphysiologischen Veränderungen kommt.
- Shrimps: Da ein Großteil der Shrimps aus den Ländern Südasiens nach Europa importiert wird und nicht den europäischen Hygienestandards entspricht, ist ebenso wie bei den Froschschenkeln eine Dekontamination erforderlich, die aber das Produkt weder organoleptisch verändert noch Rückstände hinterläßt. Auch hier würde eine Bestrahlung bis maximal 5 kGy eine effektive und technologisch akzeptable Lösung darstellen, die weder toxikologisch noch ernährungsphysiologisch bedenklich ist, zumal Shrimps, ebenso wie Froschschenkel, in Europa nicht Hauptbestandteil der Ernährung sind.
- Gummi arabicum: Als pflanzliches Erzeugnis der Tropen und Subtropen ist Gummi arabicum aufgrund der dort herrschenden Bedingungen oft mit Schmutz verunreinigt. Zudem trägt das feucht-warme Klima zu seiner mikrobiologischen Verunreinigung bei. Wenn Gummi arabicum in der pharmazeutischen Industrie verwendet wird, muß er sehr strikten mikrobiologischen Kriterien entsprechen. Diese können durch Bestrahlung mit 3 kGy erreicht werden, die weder die chemischen noch die toxikologischen noch die technologischen Eigenschaften des Gummi arabicums beeinflußt. So behandeltes Gummi arabicum kann deshalb auch in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden.
- Casein/Caseinate: Trotz strenger hygienischer Maßnahmen bei der Produktion können Caseine/Caseinate vor allem *Enterobacter sakazakii*, *E. coli*, *Salmonella ssp* und *Klebsiella pneumoniae* enthalten, was ohne Dekontamination eine

Gefährdung des Konsumenten darstellen würde. Eine Strahlenbehandlung mit maximal 6 kGy wäre zur Dekontamination ausreichend, ohne daß es zu Veränderungen im Produkt kommt.

- Eiklar: Eine Behandlung von flüssigem, gefrorenem oder getrocknetem Eiklar mit ionisierenden Strahlen mit einer Dosis von 3 kGy würde ausreichen, um der Lebensmittelindustrie Produkte von einer ausreichenden bakteriologischen Qualität zu liefern und die Rekontamination der dekontaminierten Produkte bei der Verpackung dem Transport oder der Lagerung zu verhindern.
- Getreideflocken: Getreideflocken und –keimlinge, die dazu bestimmt sind, Joghurt zugesetzt zu werden, sind häufig trotz Hitzebehandlung noch mit Bazillen verunreinigt. Einige Bacillusarten sind aber für den Menschen pathogen und können auch Toxine produzieren. Diese müssen daher vor der Zugabe der Getreideerzeugnisse zur Joghurt dekontaminiert werden. Eine sehr wirksame Methode ist die Bestrahlung der Getreideprodukte mit einer Dosis von 10 kGy, die unter diesen Umständen geeignet ist, die Gesundheit der Konsumenten zu schützen.
- Reismehl: Reismehl wird häufig in Kleinkindernahrung und in anderen Produkten, die für spezielle Teile der Bevölkerung gedacht sind und die eine hohe mikrobiologische Qualität benötigen, eingesetzt. Diese mikrobiologische Qualität kann mit herkömmlichen Methoden nicht erzielt werden. Eine Behandlung mit ionisierenden Strahlen mit 4 kGy wäre eine effektive Lösung.
- Blutprodukte: Ein Großteil des Blutes, der in den Schlachthäusern anfällt, muß aufgrund des schlechten hygienischen Status verworfen werden. Da Blut auch als eine Proteinquelle in der Lebensmittelindustrie verwendet wird, muß es einem bestimmten mikrobiologischen Status entsprechen, der durch eine Bestrahlung mit 5 kGy erreicht werden könnte. Es wird allerdings eine Bestrahlung mit 10 kGy gefordert, um ein gewisses Maß an Sicherheit zu erlangen.

### 2.3 Weltweit

Da vor allem Gewürze teilweise so stark kontaminiert sind, daß eine Erhöhung der zulässigen Strahlendosis erforderlich wäre, traf die *Joint FAO/IAEA/WHO Study Group on High-Dose Irradiation* im September 1997 in Genf zusammen, um alle relevanten

Daten, die sich mit Bestrahlungsdosen von  $> 10$  kGy beschäftigen (WHO 1999) zu evaluieren. Sie kamen zu dem Schluß, daß bestrahlte Lebensmittel bei jeder Strahlendosis, so lange diese technologisch erforderlich ist, sicher sind und den ernährungsphysiologischen Anforderungen genügen. Mit derartigen Dosen wäre sogar die Eliminierung von *C. botulinum*-Sporen und anderen toxischen Mikroorganismen möglich. Sie stellten weiterhin fest, daß die Festlegung eines Höchstwerts nicht notwendig sei, da bestrahlte Lebensmittel unter Einhaltung der notwendigen Dosierungen als *wholesome* zu beurteilen sind. Bezüglich einer Risikobeurteilung gingen sie davon aus, daß die Lebensmittelbestrahlung auch in höheren Dosen im Wesentlichen gleichwertig mit konventionellen, thermischen Behandlungsverfahren wie die Sterilisierung von Dosenprodukten ist (*substanzielle Äquivalenz*).

Als Anwendungen für die Bestrahlung (gemäß GMP und GIP) wurden in der Stellungnahme neben Gewürzen und anderen getrockneten Lebensmittelzutaten auch vorgekochte, verpackte Lebensmittel, sterile Mahlzeiten (z.B. für immunsuppressive Patienten) vorgeschlagen. Grundsätzlich könnte sie auch für andere Lebensmittel, die eine lange Haltbarkeit und hohe hygienische Qualität erfordern, angewendet werden.

Aufgrund der Ergebnisse des WHO-Berichts und der im Oktober 1999 in Antalya abgehaltenen Tagung „Ensuring the Safety and Quality of Food through Radiation Processing“ liegt der Codex-Alimentarius-Kommission ein Änderungsvorschlag zum Standard über Lebensmittelbestrahlung auf Stufe 3 vor (CL 1999/32-FAC). Der Begriff „overall average dose“ und die Angabe von 10 kGy wurden im Vergleich zum vorangehenden Standard gestrichen. Für eine bessere Übereinstimmung mit den Regeln des Codex Alimentarius und für die Erfüllung der Bedingungen des WTO-Abkommens wird überlegt, die im März 1999 in Kraft getretenen EU-Richtlinien zur Lebensmittelbestrahlung entsprechend anzupassen.

### 3. METHODEN DER BESTRAHLUNG VON LEBENSMITTELN

#### 3.1 Behandlung mit niedrigen Bestrahlungsdosen

Die Behandlung von Produkten mit einer niedrigen Strahlendosis wird Radurisation genannt (HACKWOOD, 1991).

Dafür werden Dosen, die kleiner als 1 kGy sind, eingesetzt. Sie dienen der Unterdrückung der Keimung, wie z.B. bei Kartoffeln und Zwiebeln, der Verzögerung der Reifung bei einigen Obst- und Gemüsearten, der Sterilisation von Insekten, wie z.B. bei Getreide und Zitrusfrüchten, aber auch der Unterdrückung der Reifung von Parasiten in Fleisch (KILCAST, 1994). Die Unterdrückung der Reifung bei Früchten beruht darauf, daß in der Frucht die Synthese von Amino-Carboxy-Cyclopropan (ACC), einer Vorstufe von Ethylen, durch Bestrahlung vermindert wird und somit weniger Ethylen (Reifungshormon) produziert werden kann. Früchte, die kein Klimakterium aufweisen, wie z.B. Erdbeeren, müssen reif geerntet werden. Hier kann durch Bestrahlung die Pektinaseaktivität herabgesetzt werden, was zu einer längeren Haltbarkeit der Früchte führt (XU et al., 1993). Darüber hinaus kann durch Bestrahlung die Atmung der Früchte vermindert werden, wodurch ebenfalls die Haltbarkeit verlängert (ZHANG et al., 1993).

#### 3.2 Behandlung mit mittleren Bestrahlungsdosen

Die Behandlung von Produkten mit mittlerer Strahlendosis wird Radicidation genannt (HACKWOOD, 1991).

Hier werden Dosen im Bereich von 1 – 10 kGy eingesetzt. Dosen zwischen 1 – 3 kGy reichen aus, um die meisten Mikroorganismen in einem Lebensmittel abzutöten. Die Abtötung von *Salmonella*-, *Shigella*-, *Campylobacter*- und *Listeria*- Arten benötigt etwas höhere Dosen. Um eine ausreichende Reduktion von Viren zu erreichen, ist eine Dosis um die 10 kGy notwendig. Für die Abtötung von Mikroorganismen gilt generell, daß sie umso resistenter sind, je weniger freies Wasser in einem Lebensmittel vorhanden ist, da hier die radiolytischen Produkte des Wassers, die für die Abtötung der Mikroorganismen verantwortlich sind, in nur geringen Mengen gebildet werden können. Getrocknete und tiefgefrorene Lebensmittel benötigen daher höhere Dosen als frische (KILCAST, 1994).

### 3.3 Behandlung mit hohen Bestrahlungsdosen

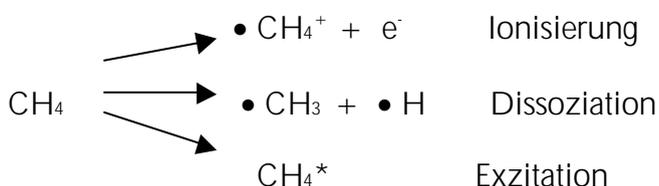
Die Behandlung von Produkten mit hohen Strahlendosen wird Radappertisation genannt (HACKWOOD, 1991).

Die Dosen liegen hier zwischen 10 - 45 kGy. Sie dienen der Abtötung aller Mikroorganismen, inklusive der Sporenbildner und werden zur Produktion von lange haltbarer Militärverpflegung, Astronautennahrung und steriler Krankenhausverpflegung für immunsuppressive Patienten eingesetzt (DIEHL, 1995).

## 4. REAKTIONSMECHANISMEN DER LEBENSMITTELBESTRAHLUNG

Die Bestrahlung führt in Lebensmitteln zu einer Energieaufnahme, wodurch chemische Reaktionen ausgelöst werden. Diese Veränderungen nehmen mit steigender Bestrahlungsdosis zu. Die Zunahme verläuft allerdings nicht linear, da es zu Interaktionen der entstehenden Produkte mit anderen Inhaltsstoffen der Lebensmittel kommt. So z.B. werden freie Radikale in niedrigen Konzentrationen, d.h. bei geringen Bestrahlungsdosen, von Radikalfängern abgefangen, die jedoch mit steigenden Radikalkonzentrationen verbraucht werden, wodurch es zu einem steilen Anstieg der freien Radikale erst bei höheren Bestrahlungsdosen kommt (DIEHL, 1995).

Die eintreffenden Elektronen (Compton-Elektronen oder Elektronenstrahlen) verursachen im Lebensmittel *primäre Effekte*, d.h. sie lösen eine Ionisierung, eine Dissoziation oder eine Exzitation aus (POTTER, 1986, Abb.1).



**Abb. 1: Auswirkung der Strahlung am Beispiel eines Methanmoleküls**

Die durch die Ionisierung und die Dissoziation entstandenen Radikale können nun weiterreagieren und lösen sekundäre Effekte aus. Die entstandenen freien Elektronen

besitzen ebenfalls genügend Energie, um weitere Ionisierung, Dissoziation oder Exzitation zu initiieren (POTTER, 1986).

*Sekundäre Effekte* können entstehen, wenn die freien Radikale miteinander reagieren und dabei entweder rekombinieren oder dimerisieren:

Rekombination:  $\bullet\text{H} + \bullet\text{CH}_3 \rightarrow \text{CH}_4$  (am Beispiel des Methans)

Dimerisation:  $\bullet\text{CH}_3 + \bullet\text{CH}_3 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$

$\bullet\text{H} + \bullet\text{H} \rightarrow \text{H}_2$

Eine andere Möglichkeit ist, daß die freien Radikale mit Elektronen ( $\bullet\text{CH}_4^+ + e^- \rightarrow \text{CH}_4$ ) oder auch einfach mit anderen Lebensmittelinhaltsstoffen reagieren.

Die so entstehenden Produkte werden durch die Bestrahlung wieder primären Effekten unterzogen und es entstehen weitere freie Radikale, die wiederum reagieren und neue Produkte bilden. Somit werden eine Unzahl von Produkten gebildet, die dann zu stabilen Endprodukten, den radiolytischen Produkten, reagieren. Der ganze Prozeß, der nur einen Bruchteil von einer Mikrosekunde dauert, wird Radiolyse genannt. Veränderungen können aber auch noch nach einigen Tagen oder Monaten auftreten.

Diese Effekte sind stark vermindert, wenn ein Lebensmittel in tiefgefrorenem oder extrem trockenem Zustand bestrahlt wird, da die entstehenden freien Radikale sich nicht ausbreiten können. Sie bleiben dann als im Lebensmittel eingeschlossene Radikale bestehen (POTTER, 1986). Erst wenn man das Lebensmittel auftaut oder Feuchtigkeit in das Lebensmittel eindringt, finden die Radikale Reaktionspartner und reagieren ab. Dieser Umstand wird auch zum Nachweis von bestrahlten Lebensmitteln genutzt. Ein Ausschluß von Sauerstoff oder ein Zusatz von Radikalfängern kann ebenfalls die Auswirkungen der Strahlung minimieren (POTTER, 1986; DIEHL, 1995).

Die Reaktionsmechanismen in Lebensmitteln sind sehr komplex, da Lebensmittel aus einer Vielzahl von Verbindungen bestehen, die untereinander reagieren und teilweise auch protektive Effekte aufeinander ausüben. Daher sind Untersuchungen über die Auswirkungen der Bestrahlung an Einzelsubstanzen wenig aussagekräftig. (DIEHL, 1995) Gewöhnlich liegt die Konzentration der radiolytischen Produkte in einem mit ca. 1 kGy bestrahlten Lebensmittel unter 3 mg/kg (3 ppm) (IAEA, 1991).

Eine Auswirkung der Bestrahlung auf die Trockensubstanz oder auf den pH-Wert eines Lebensmittels ist nicht festzustellen.

## 5 AUSWIRKUNG DER BESTRAHLUNG AUF VERSCHIEDENE LEBENSMITTELINHALTSSTOFFE

### 5.1. Auswirkungen der Bestrahlung auf Wasser

Da Wasser in fast allen Lebensmitteln enthalten ist, sind die Auswirkungen der Bestrahlung auf Wasser von größter Bedeutung. Bei der Bestrahlung von Wasser entstehen folgende Produkte:  $\bullet\text{OH}$ ,  $e_{\text{aq}}^-$ ,  $\bullet\text{H}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  (aq: aqueous: bedeutet, daß das Elektron nicht frei im wässrigen Medium bestehen bleibt und daher an ein Wassermolekül assoziiert ist) (SILVERMAN, 1991).

$\bullet\text{OH}$ ,  $e_{\text{aq}}^-$  und  $\bullet\text{H}$  sind sehr reaktiv und reagieren sofort ab. Die einzigen stabilen Produkte der Wasserradiolyse sind  $\text{H}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}_2$ , die jedoch auch ihrerseits mit  $\bullet\text{OH}$  und  $e_{\text{aq}}^-$  reagieren können und somit zum größten Teil wieder verbraucht werden:

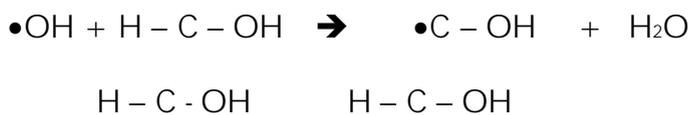


Entgegen allen Vermutungen ist daher die Produktion von Wasserstoffperoxid durch Bestrahlung ein wesentlich geringeres Problem als die Produktion der hochreaktiven Zwischenprodukte. Außerdem kann die Bildung von  $\text{H}_2\text{O}_2$  stark unterdrückt werden, wenn die Bestrahlung unter Ausschluß von Sauerstoff stattfindet (DIEHL, 1995).

Die radiolytischen Produkte des Wassers können mit allen anderen Inhaltsstoffen der Lebensmittel reagieren und so strahlungsspezifische Veränderungen hervorrufen. Sie sind auch für die Abtötung von Mikroorganismen verantwortlich (HASSELMANN und MARCHIONI, 1991).

## 5.2 Auswirkungen der Bestrahlung auf Kohlenhydrate

In der Anwesenheit von Wasser werden Kohlenhydrate hauptsächlich von  $\bullet\text{OH}$ -Radikalen angegriffen, die dem Molekül ein Wasserstoffatom entziehen und ein Wassermolekül bilden.



Je nachdem in welcher Position sich die  $\text{C}=\text{O}$  Bindung im Molekül befindet, wird eine Säure, ein Keton oder ein Aldehyd gebildet. Durch weitere Spaltung im Molekül kommt es dann zur Bildung weiterer Produkte, wie z.B. Malondialdehyd (HASSELMANN und MARCHIONI, 1991).

Wenn Kohlenhydrate in Gegenwart von Proteinen bestrahlt werden - dies ist meistens in Lebensmitteln der Fall - , sind die Veränderungen nicht sehr groß, da Proteine, und hier vor allem die Aminosäuren Cystein, Cystin, Methionin, Phenylalanin, Tyrosin und Histidin, eine gewisse schützende Wirkung ausüben.

Disaccharide und Polysaccharide weisen im wesentlichen die gleichen Reaktionen wie Monosaccharide auf. Zusätzlich können aber auch die glycosidischen Bindungen, die die Monosaccharide verbinden, gespalten werden. Auf diese Weise entstehen Dextrine, Maltose und Glucose (DIEHL, 1995). Dieser Abbau von Kohlenhydraten ist auch verantwortlich für das Weichwerden von Früchten und Gemüsen bei höheren Bestrahlungsdosen. Hier kommt es zu einem Abbau von Zellwandbestandteilen wie Pektin. Nicht immer muß dies ein Nachteil sein. So kann es z.B. zu erhöhten Saftausbeuten kommen oder zu einer Verkürzung sowohl der Trocknungs- als auch der Kochzeiten von Leguminosen (KILCAST, 1994).

### 5.3 Auswirkungen der Bestrahlung auf Proteine

Im Gegensatz zu den Kohlenhydraten werden die Proteine in wässriger Lösung vor allem von den gelösten Elektronen angegriffen, die die Radiolyse verursachen (DIEHL, 1995).

Vorherrschend ist die Desaminierung von Aminosäuren, die Decarboxylierung spielt eher eine untergeordnete Rolle (KHATTAK und KLOPFSTEIN, 1989).

Wie schon vorher erwähnt, haben einige Aminosäuren die Funktion von Radikalfängern. Diese Aminosäuren sind Cystein, Cystin, Methionin, Phenylalanin, Tyrosin und Histidin. Sie besitzen eine größere Bereitschaft, mit freien Radikalen zu reagieren als aliphatische Aminosäuren.

Durch Bestrahlung entstehen aus Cystein vor allem Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Alanin und Cystin. Die Bestrahlung von Cystin führt zu einer Spaltung der Disulfidbrücken, wohingegen aus Methionin folgende Produkte entstehen: entweder  $RS^{\cdot} + \bullet CH_3$  oder  $RS\bullet + ^{\cdot}SCH_3$ .

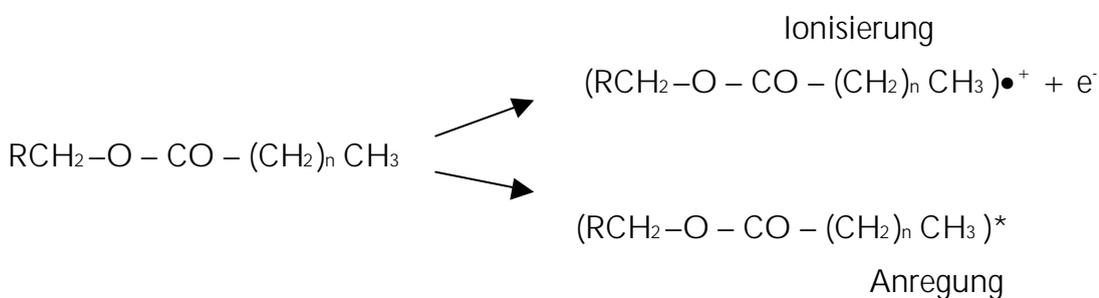
Die aromatischen Aminosäuren Phenylalanin und Tyrosin reagieren vor allem mit Hydroxylierung des aromatischen Ringes. Aus Phenylalanin entstehen o-, m- und p-Tyrosin, die in weiterer Folge durch Oxidation zu verschiedenen Isomeren des Dihydroxyphenylalanins (Dopa) reagieren. Im Fall des Tyrosins entsteht 3,4-Dopa, das dann durch Oxidation und Polymerisation zu melaninähnlichen Pigmenten reagiert. Histidin ist jene Aminosäure, die im weitaus größten Ausmaß mit einer Desaminierung auf Bestrahlung reagiert. Dabei liefern sowohl die Seitenkette als auch der Imidazolring Ammoniak.

In Proteinen ist die Bereitschaft dieser Aminosäuren, mit den Radikalen zu reagieren, herabgesetzt, da sie durch den komplexen Aufbau der Proteine geschützt werden. Bei der Bestrahlung von Proteinen kommt es vor allem zu einer Spaltung der C-N Bindungen und der Disulfidbrücken der Polypeptidketten. Der größte Teil der aufgenommenen Energie wird zu dieser Denaturierung verwendet, die aber viel geringer ist als bei einer Hitzebehandlung. Veränderungen an Aminosäuren treten kaum auf. Auch die Enzyme überstehen weitgehend diese Behandlung.

Metallionen von Eisen, Kupfer und Zink können, besonders wenn sie in einem Porphyrinring gebunden sind, die Reaktionen der Proteine verändern, indem sie neue Reaktionswege eröffnen (DIEHL, 1995).

#### 5.4 Auswirkungen der Bestrahlung auf Lipide

Da der größte Teil der in den Lebensmitteln enthaltenen Lipidfraktionen die Triglyceride sind, beschränken sich die durch die Bestrahlung entstehenden Veränderungen hauptsächlich auf diese Substanzen. Hierbei haben die radiolytischen Produkte des Wassers, im Gegensatz zu den Kohlenhydraten, an den Veränderungen nur einen sehr geringen Anteil. Der primäre Effekt der Bestrahlung liegt in der Bildung von Kationenradikalen und angeregten Molekülen durch die eintreffenden Elektronen oder Compton-Elektronen (Abb. 2).



R = Diglyceridrest des Moleküls

**Abb. 2: Effekt der Bestrahlung auf Lipide**

Vor allem die entstehenden Kohlenwasserstoffe und die 2-Alkylcyclobutanone sind von großer Bedeutung im Nachweis der Bestrahlung von fetthaltigen Lebensmitteln (DIEHL, 1995).

Direkt nach der Bestrahlung sind bestrahlte und unbestrahlte Lebensmittel anhand der Peroxidwerte nicht voneinander zu unterscheiden. Erst nach Lagerung unter Luftzutritt ist das bestrahlte Produkt durch höhere Peroxidwerte zu erkennen. Die Bestrahlung ist daher nicht direkt für die Peroxidproduktion verantwortlich. Erst Vorgänge, die nach der Bestrahlung ablaufen, führen zu diesen erhöhten Werten (WILSON-KAKASHITA et al., 1995).

## 6. AUSWIRKUNGEN DER BESTRAHLUNG AUF DIE ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGISCHEN EIGENSCHAFTEN EINES PRODUKTES

Die Veränderungen im ernährungsphysiologischen Wert eines bestrahlten Lebensmittels hängen stark von der Bestrahlungsdosis, der Art des Lebensmittels und der Temperatur sowohl bei Bestrahlung als auch bei Lagerung ab (IAEA, 1991).

### 6.1 Makronährstoffe

Schon in den 50er Jahren wurde festgestellt, daß die Bestrahlung, auch in weit höheren Dosen als die heute erlaubten 10 kGy, keine Auswirkungen auf die kalorische/energetische Ausnutzung der Hauptnährstoffe im allgemeinen, auf die Stickstoffbilanz oder auf die Verdaulichkeit hat. Großes Augenmerk wurde hierbei auf die Proteine gelegt, da sie nicht nur Energiequelle sind, sondern auch essentielle Aminosäuren zum Aufbau von Körperprotein liefern. Bei Fütterungsversuchen an Ratten wurde durch Bestrahlung von Hühnerfleisch mit 3 - 6 kGy keine Veränderung der "Protein efficiency ratio" (PER, Gewichtszunahme des Versuchstieres pro Gewichtseinheit aufgenommenen Proteins) festgestellt. Auch Versuche mit höheren Dosen (bis zu 58 kGy) bestätigten diese Ergebnisse.

Die Tabelle zeigt eine Untersuchung an einer Rattendiät, die mit 70 kGy behandelt wurde. Die Auswirkungen der Bestrahlung sind gering (DIEHL, 1995).

**Tab.: Auswirkung einer Bestrahlung auf die Proteinqualität einer Rattendiät (DIEHL, 1995)**

Dosis kGy	wahre Verdaulichkeit %	BW %	NPU %
0	85.6	80.5	68.9
5	83.6	75.8	63.5
10	86.5	81.7	70.6
25	87.0	78.1	68.0
30	84.8	77.3	65.4
70	85.3	76.4	65.2

BW: Biologische Wertigkeit

NPU: Net Protein Utilisation

Bis zu einer Bestrahlungsdosis von 10 kGy zeigen sich keine relevanten Proteinqualitätsverluste (DIEHL, 1995).

## **6.2 Mikronährstoffe - Vitamine**

Über die Vitaminverluste durch Bestrahlung gibt es recht unterschiedliche Beurteilungen in der Literatur. Meist werden diese Verluste von den Autoren überschätzt, da Untersuchungen an Vitaminlösungen durchgeführt werden, und der protektive Effekt der anderen Inhaltsstoffe eines Lebensmittels nicht berücksichtigt wird (HAWTHORN, 1989).

Für die Radiosensitivität der fettlöslichen Vitamine gilt:

Vitamin E > Vitamin A > Carotinoide > Vitamin D > Vitamin K

Die starken Verluste, die an Vitamin E und A durch Bestrahlung entstehen, können durch Bestrahlung bei tiefen Temperaturen stark vermindert werden. Außerdem sind stark Vitamin E-haltige Nahrungsquellen, wie Pflanzenfette, und Vitamin A-haltige, wie Milchprodukte, selten Kandidaten von Bestrahlung. Die anderen fettlöslichen Vitamine weisen bei Bestrahlung kaum Verluste auf.

Bei den wasserlöslichen Vitaminen ist das Thiamin am empfindlichsten. Danach folgen Vitamin B<sub>6</sub> und B<sub>2</sub>.

Bei manchen Produkten kann es auch zu leichten Vitamin C-Verlusten kommen; alle anderen wasserlöslichen Vitamine sind sehr stabil gegenüber Bestrahlung (DIEHL, 1995).

## **7 MIKROBIOLOGISCHE PRODUKTSICHERHEIT UND SCHUTZ VOR PARASITEN DURCH ANWENDUNG DER LEBENSMITTELBESTRAHLUNG**

Die Abtötung von Mikroorganismen und Insekten durch Bestrahlung basiert auf der Zerstörung der DNA, entweder direkt durch Bestrahlung (CLAVERO et al., 1994), oder indirekt durch die durch Bestrahlung verursachten freien Radikale des Wassers (SILVERMAN, 1991).

## 7.1 Bakterien

Bei den meisten Bakterien reicht eine Bestrahlung mit einer geringen bis mittleren Dosis meist aus, um ihre Zahl drastisch zu vermindern (KAMPELMACHER 1989). Die Bakterien, die heute als Hauptgründe für durch Lebensmittel übertragene Krankheiten gelten, und die gut mit Bestrahlung bekämpft werden können, sind: verschiedene Salmonella- und Campylobacter-Arten, Staphylococcus aureus, Shigella-Arten, Brucella-Arten, Yersinia enterocolitica, Vibrio parahaemolyticus und cholerae, verschiedene enteropathogene und enterotoxische Escherichia coli, Aeromonas hydrophila, und Edwardsiella tarda. Bei Cryptosporidium parvum und Vibrio vulnificus ist die Pathogenität noch nicht genau untersucht; sie sind aber auch durch Bestrahlung mehrheitlich abzutöten. Etwas schwieriger gestaltet es sich bei Clostridium botulinum, Clostridium perfringens und bei Bacillus cereus, die sehr stabil gegenüber Bestrahlung sind. So führt die Bestrahlung hier nur zu einer weniger starken Verminderung der Zahl der Bakterien als bei den anderen Arten. Die überlebenden Bakterien sind jedoch gegenüber Hitze, pH-Wert-Senkung, erhöhter Salzkonzentration oder Antibiotika viel anfälliger als vor der Bestrahlung. Das Risiko einer Selektion nach Bestrahlung, d.h., daß nach der Bestrahlung nur mehr diese resistenten pathogenen Keime auf dem Lebensmittel vorhanden sind und ungehindert wachsen können, ist aber nicht höher als bei Behandlung mit anderen nicht sterilisierend wirkenden Verfahren (KAMPELMACHER, 1989; DIEHL, 1995).

## 7.2 Hefen und Schimmelpilze

Im allgemeinen sind Hefen resistenter gegenüber Bestrahlung als Schimmelpilze.

Bei den Schimmelpilzen von besonderem Interesse sind Aspergillus flavus und Penicillium viridicatum, die das Aflatoxin produzieren. Sie werden bei einer Dosis von 1.4 kGy im Falle von Penicillium viridicatum bzw. einer Dosis von 1.7 im Falle von Aspergillus flavus am weiteren Wachstum gehindert (DIEHL, 1995). Bereits gebildetes Mycotoxin ist sehr resistent gegenüber Bestrahlung und kann mit den für Lebensmittel üblichen Dosen nicht zerstört werden (KUME et al., 1989).

### 7.3 Viren

Für den Menschen sehr gefährliche Viren, die durch kontaminierte Lebensmittel übertragen werden, sind jene, die Hepatitis und Poliomyelitis übertragen. Die Inaktivierung dieser Viren durch Bestrahlung ist eine exponentiale Funktion der Bestrahlungsdosis. Viren sind jedoch sehr resistent gegenüber Bestrahlung. Durch eine Dosis von 10 kGy kann nur eine Reduktion der Viren um 99% erreicht werden, was nicht sehr zufriedenstellend ist. Eine Kombination mit einer gleichzeitigen Hitzebehandlung tötet jedoch sämtliche Viren ab, wobei hier schon viel niedrigere Bestrahlungsdosen genügen (DIEHL, 1995).

### 7.4 Protozoa

Protozoa sind Einzeller, die im Boden und im Wasser oder als Parasiten in Tieren vorkommen. Im Zusammenhang mit der Bestrahlung von Lebensmitteln sind nur jene interessant, die menschenpathogen sind und über Lebensmittel übertragen werden. Dies sind einerseits *Entamoeba histolytica*, andererseits *Toxoplasma gondii*. *Entamoeba histolytica* ist der Erreger der Amoebenruhr. Die Cysten werden durch fäkal kontaminiertes Wasser oder durch rohe Früchte und Gemüse auf den Menschen übertragen. Eine Dosis von 250 Gy ist zur Abtötung aller Cysten ausreichend (DIEHL, 1995). *Toxoplasma gondii* kann sämtliche Säugetierzellen, die einen Kern enthalten, befallen. Im Erwachsenen verläuft die Infektion oft ohne Symptome. Gelegentlich treten grippeähnliche Symptome auf. Während der Schwangerschaft kann nun der Parasit von der Mutter auf das Kind übertragen werden, welches dann an Toxoplasmose erkrankt. Wenn das Kind überlebt, ist es meist geistig zurückgeblieben oder sehbehindert. Übertragen wird der Erreger häufig durch ungenügend gekochtes Fleisch (ROBERTS und MURRELL, 1993). Um die Infektiosität dieses Parasiten auszuschalten, reicht schon eine Dosis von 90 Gy. Zur Abtötung wird eine Dosis von 300 - 500 Gy empfohlen (DIEHL, 1995).

### 7.5 Parasitische Helminthen

Dazu zählen sämtliche Bandwürmer, aber auch Trichinen, die in Schweinefleisch gefunden werden. Vor allem in Afrika stellen Helminthen ein großes Problem dar. So z.B. beträgt die Infektionsrate von Rindern mit Bandwurmcysten in Zentralafrika

bereits 30 - 50% und es wird geschätzt, daß in manchen Regionen schon 20 - 30% der Bevölkerung mit dem Rinderbandwurm infiziert sind (DIEHL, 1995).

Schon der Konsum einer nach dem Kochen noch lebenden Bandwurmcyste reicht aus, um die Ausbildung eines Bandwurmes im menschlichen Darmtrakt zu verursachen. Wenn eine mit einem Bandwurm infizierte Person dessen Eier auf Lebensmittel überträgt, kann es beim Konsumenten dieses Lebensmittels zur Ausbildung von Cysten kommen, die sich zu 86% im Gehirn festsetzen.

Trichinen können durch nicht ausreichend erhitztes Schweinefleisch auf den Menschen übertragen werden. Im menschlichen Darm kommt es zur Ausbildung eines Nematoden, der Larven produziert und in das Blut abgibt. Diese Larven infizieren dann den Skelettmuskel.

Die Bekämpfung dieser Helminthen durch Bestrahlung ist relativ einfach, da schon Dosen unter 500 Gy ausreichen, um ihre Reifung zu verhindern, und diese somit ihre Infektiosität verlieren. Eine Abtötung wäre erst mit wesentlich höheren Dosen möglich. Diese ist jedoch nicht erforderlich, um eine Infektion zu verhindern (ROBERTS und MURRELL, 1993).

## **7.6 Insekten**

Hier sollen vor allem Getreideschädlinge und die Fruchtfliege, die Schäden an frischen Früchten und frischem Gemüse aus tropischen und subtropischen Gebieten verursacht, bekämpft werden.

Verwendet wurde früher eine Begasung mit Ethylendibromid, das aber aufgrund seiner Karzinogenität verboten wurde. Später wurde Methylbromid eingesetzt, das wiederum unter Verdacht steht, ozonschädigend zu wirken, und dessen Verwendung bis zum Jahr 2000 drastisch eingeschränkt werden soll. Die einzig wahre Alternative scheint dann die Bestrahlung zu sein, um große ökonomische Verluste zu vermeiden (MOY, 1993).

Die Radiosensitivität der Insekten hängt stark von ihrem Alter, ihrer Entwicklungsstufe und ihrem Geschlecht ab. Weibliche Tiere sind generell anfälliger als männliche. Vom

Ei über die Larve über die Puppe bis zum fertigen Tier nimmt die Radiosensitivität kontinuierlich zu (DIEHL, 1995).

Meist reichen aber schon sehr geringe Dosen aus, um die Insekten zu sterilisieren und somit die Vermehrung zu verhindern (MOY, 1993). Eine geringere Dosis, die nur zur Sterilisation des Weibchens führt, ist ebenfalls schon ausreichend und belastet das Lebensmittel weniger. So reicht eine Dosis von 500 Gy bei weitem aus, um in Lebensmitteln auch die resistantesten Insekten zu sterilisieren, und so über kurz oder lang ihr Absterben zu verursachen. Im Fall der Fruchtfliege würde hierzu schon eine Dosis von 250 Gy ausreichen (DIEHL, 1995).

## 8. TOXIKOLOGIE

Bis heute wurden unzählige Langzeitfütterungsversuche an Tieren durchgeführt, um die eventuelle Produktion von toxischen Produkten durch Bestrahlung zu untersuchen (HAWTHORN, 1989). Auch einige Versuche an Menschen und in vitro an Säugetierzellen wurden durchgeführt (DIEHL, 1995). All diese Versuche haben zu dem eindeutigen Ergebnis geführt, daß bestrahlte Lebensmittel keine toxischen Wirkungen haben. Die wenigen Studien, die Gegenteiliges zu beweisen scheinen, sind in der Zwischenzeit schon alle widerlegt worden (THAYER, 1994). Die Studien waren entweder nicht präzise durchgeführt worden, oder in der statistischen Auswertung äußerst ungenau. Einige Studien haben schwere Erkrankungen an den Tieren, die mit der bestrahlten Nahrung gefüttert wurden, beobachtet. Diese Erkrankungen wurden jedoch nicht ursächlich durch die Bestrahlung ausgelöst, sondern durch extreme Vitaminmangelerscheinungen, verursacht durch den Vitaminverlust bei der Bestrahlung in Verbindung mit einer sehr einseitigen Ernährung der Tiere (HAWTHORN, 1989).

Auch ein gesteigertes allergenes Potential der bestrahlten Lebensmittel konnte nicht beobachtet werden. Bei Bestrahlung von Milch wurde sogar eine Verminderung ihres allergenen Potentials gefunden.

Ebenfalls keine erhöhte Bildung von toxischen Produkten wurde bei Bestrahlung von Lebensmitteln, die Pestizidrückstände enthielten, beobachtet. Organochlorverbindungen werden sogar in ihrer Toxizität vermindert, da die Bestrahlung die Abspaltung eines Chloratoms bewirkt.

Zusatzstoffe sind, wenn sie im Lebensmittel enthalten sind, sehr resistent gegenüber Bestrahlung und bilden auch keine toxischen Metabolite. Was bereits für andere Lebensmittelinhaltsstoffe gesagt wurde, gilt auch für die Zusatzstoffe. In wässriger Lösung sind sie gegenüber Bestrahlung weit anfälliger und werden abgebaut (DIEHL, 1995).

## **9. ANALYSENMETHODEN ZUM NACHWEIS BESTRAHLTER LEBENSMITTEL**

Obwohl eine administrative Überwachung der lizenzierten Einrichtungen für die Bestrahlung von Lebensmitteln und die Kennzeichnung der auf diese Art behandelten Produkte im Grunde für die Kontrolle dieser Produkte ausreichen würde (ähnlich wie Produkte aus biologischer Landwirtschaft gekennzeichnet werden), ist es wünschenswert, auch die Lebensmittel selbst einer Prüfung zu unterziehen. Das könnte auch die Konsumenten, die der Behandlung von Lebensmitteln mittels ionisierender Strahlung skeptisch gegenüberstehen, beruhigen. Vor allem für den internationalen Handel mit Lebensmitteln sind sichere Nachweismethoden für die erfolgte Bestrahlung der Lebensmittel von enormer Bedeutung, da in vielen Ländern der Verkauf von so behandelten Lebensmitteln verboten ist und diese somit auch nicht importiert werden dürfen. Außerdem soll in jenen Ländern, in denen der Verkauf gestattet ist, durch richtige Kennzeichnung der bestrahlten Lebensmittel die Entscheidungsfreiheit des Konsumenten gewahrt werden.

Noch vor 15 Jahren gab es keine Möglichkeit, eine etwaige Bestrahlung von Lebensmitteln nachzuweisen. Inzwischen wurden auf diesem Gebiet enorme Fortschritte gemacht und eine Vielzahl von Nachweismethoden entwickelt. Keine einzige davon kann jedoch für sämtliche Lebensmittelarten, die bestrahlt werden, - mittlerweile sind es schon über 50 - angewendet werden.

Eine Nachweismethode sollte mehrere Kriterien erfüllen:

- 1.) Das für die Identifizierung verwendete Signal muß strahlungsspezifisch sein und sich von anderen Signalen deutlich abheben.
- 2.) Ein ähnliches Signal darf nicht durch andere Verarbeitungsprozesse, durch Verwendung anderer Spezies oder durch andere Wachstums- oder Lagerungsbedingungen entstehen.

- 3.) Das Signal darf sich weder durch Variation der Bestrahlungsparameter (Dosis, Temperatur, etc.) noch durch das Vorhandensein weiterer Inhaltsstoffe noch durch einen Weiterverarbeitungsprozeß verändern.
- 4.) Das Signal muß reproduzierbar sein.
- 5.) Das Signal muß auch noch nach längerer Lagerung stabil bleiben.
- 6.) Die Methode darf unter keinen Umständen falsch positive oder falsch negative Ergebnisse liefern.
- 7.) Die Methode muß schnell, einfach und billig sein, muß mit einem geringen Probenvolumen auskommen, keine komplizierten Instrumente erfordern und für möglichst viele Lebensmittelarten anwendbar sein.
- 8.) Die Schätzung der Bestrahlungsdosis sollte möglich sein.
- 9.) Die Methode sollte vor Gericht als Nachweismethode anerkannt sein.

In der Praxis ist es jedoch sehr schwer, alle diese Anforderungen zu erfüllen (DELINCÉE, 1993). In der EU wurden deswegen bisher erst 5 Methoden als Nachweismethoden anerkannt. Methoden, die nicht alle o.a. Kriterien erfüllen, werden als sog. Screeningmethoden eingesetzt, um verdächtige Proben auszusortieren, die dann mit genaueren Methoden, die folglich auch aufwendiger und teurer sind, untersucht werden.

Die am 10.6.1994 von der *Commission of the European Communities* anerkannten 5 Standardmethoden sind (RAFFI und KENT, 1996):

- 1.) Nachweis von bestrahlten knochenhaltigen Lebensmitteln mittels ESR Spektroskopie (CEN/TC 275/WG 8 N 38)
- 2.) Nachweis von bestrahlten zellulosehaltigen Lebensmitteln mittels ESR Spektroskopie (CEN/TC 275/WG 8 N 39)
- 3.) Nachweis bestrahlter Lebensmittel, die mineralische Verunreinigungen enthalten, mittels Thermolumineszenz (CEN/TC 275/WG 8 N 40)
- 4.) Nachweis bestrahlter fetthaltiger Lebensmittel mittels gaschromatographischer Analyse von flüchtigen Kohlenwasserstoffen (CEN/TC 275/WG 8 N 41)
- 5.) Nachweis bestrahlter fetthaltiger Lebensmittel mittels gaschromatographischer Analyse von 2-Alkylcyclobutanonen (CEN/TC 275/WG 8 N 42)

Im folgenden werden die wichtigsten Nachweismethoden präsentiert, die relativ gute Ergebnisse bei der Identifizierung von bestrahlten Lebensmitteln der ersten Generation liefern. Bei Produkten der zweiten Generation - das sind Produkte, in denen bestrahlte Zutaten enthalten sind - sind die Ergebnisse weniger zufriedenstellend. Allerdings ist ein Nachweis der Verwendung von bestrahltem Flüssigei in diversen Kuchen schon gelungen (DIEHL, 1995).

## **9.1 CHEMISCHE METHODEN**

Wenn fettreiche Lebensmittel bestrahlt werden, entsteht eine große Anzahl an flüchtigen Komponenten, die bei der Identifikation von bestrahlten Produkten als Marker dienen können (RAFFI und KENT, 1996), und die je nach Fettsäurezusammensetzung des Produktes ein charakteristisches Muster aufweisen. So entstehen radiolytische Produkte, wie gesättigte und olefinische Kohlenwasserstoffe, Aldehyde, Methyl- und Ethylester und zyklische Produkte (z.B. 2-Alkylcyclobutanone) (LEMBKE et al., 1995).

### **9.1.1. Nachweis von 2-Alkylcyclobutanonen**

Diese zyklischen Verbindungen haben die gleiche Zahl an Kohlenstoffatomen wie die Fettsäuren aus denen sie gebildet werden, und die Alkylgruppe befindet sich in einer Ringposition (STEVENSON, 1994).

1990 wurde eine Methode entwickelt, um in bestrahltem Hühnerfleisch 2-Dodecylcyclobutanon, das aus Palmitinsäure entsteht, nachzuweisen. Hühnerfleisch wurde hierbei nur als Modell für andere fetthaltige Lebensmittel gewählt (RAFFI und KENT, 1996). Die Bestimmung erfolgt mittels GC-MS.

In unbestrahlten Proben kann 2-Dodecylcyclobutanon nicht nachgewiesen werden (RAFFI und KENT, 1996), ebenso nicht in mikrobiell verdorbenen Proben (STEVENSON, 1992). Nach heutigem Wissen dürfte es auch nicht während des Kochprozesses entstehen. Die Nachweisgrenze liegt bei einer Bestrahlungsdosis von 0.2 kGy (RAFFI und KENT, 1996).

### 9.1.2. Nachweis von flüchtigen Kohlenwasserstoffen

Die Bestimmung der durch Bestrahlung von fetthaltigen Lebensmitteln entstehenden Kohlenwasserstoffe ist nach heutigem Stand der Wissenschaft die Methode der Wahl für Routineanalysen in Kontrolllabors, da auch der Kostenaufwand relativ gering ist (LEMBKE et al., 1995). Sie wird heute schon mit Erfolg zur Identifizierung von bestrahltem Fleisch, bestrahlten Fleischprodukten, Seetieren und Rohmilchprodukten, wie z.B. Rohmilchkäsen, angewendet (BERGAENTZLE et al., 1994).

Flüchtige Kohlenwasserstoffe entstehen nicht nur bei der Bestrahlung von Lebensmitteln durch die Spaltung von Fettsäureketten, sondern auch bei Erhitzung oder einfach durch Oxidation. Einige dieser Kohlenwasserstoffe scheinen sich jedoch nur bei Bestrahlung zu bilden (BERGAENTZLE et al., 1994), und zwar je nach Fettsäurezusammensetzung des Ausgangsproduktes (LEMBKE et al., 1995). Diese Kohlenwasserstoffe werden als Produkt einer Decarboxylierung, verursacht durch Reaktionen mit freien Radikalen, gebildet (MOREHOUSE u. KU, 1990).

Aus jeder  $C[N:M]$  Fettsäure mit N Kohlenstoffatomen und M Doppelbindungen entstehen 2 Hauptprodukte und zwar ein Alken mit der Formel  $C[N-1:M]$  (LESGARDS et al., 1993) mit einem Kohlenstoffatom weniger als die ursprüngliche Fettsäure (LEMBKE et al., 1995) und ein Alken mit der Formel  $C[N-2:M+1]$  (LESGARDS et al., 1993) mit 2 Kohlenstoffatomen weniger und einer Doppelbindung mehr (in  $C_1$ -Position) (LEMBKE et al., 1995).

Diese flüchtigen Kohlenwasserstoffe müssen vor der gaschromatographischen Analyse aus der Fettfraktion isoliert werden.

Bei vollständiger Extraktion und Kenntnis der genauen Fettsäurezusammensetzung kann die verwendete Strahlendosis ziemlich genau bestimmt werden, da die Bildung der Kohlenwasserstoffe linear zur Strahlendosis erfolgt (Korrelation  $> 99.8\%$ ).

Diese Kohlenwasserstoffe sind auch bei längerer Lagerung des Produkts äußerst stabil und die Bestrahlungsdosis kann daher auch noch nach einiger Zeit festgestellt werden (BERGAENTZLE et al., 1994).

Anggegeben wird der Kohlenwasserstoffgehalt meist als ng Kohlenwasserstoff pro mg Precursor Fettsäure (MOREHOUSE und KU, 1992).

## 9.2. ELEKTRONEN-SPIN-RESONANZ-SPEKTROSKOPIE

Wenn ionisierende Strahlung durch ein Material tritt, kann von Elektronen Energie absorbiert werden, die sie befähigt, sich von ihrem Kern zu lösen. Es entsteht somit ein Radikalkation und ein freies Elektron (GOODMAN et al., 1989). Diese freien Elektronen sind äußerst reaktionsfreudig und können a) sich wieder mit den entstandenen Radikalkationen verbinden und so in ihren ursprünglichen Zustand zurückkehren b) mit anderen Komponenten reagieren und so neue freie Radikale bilden oder c) in einer kristallinen oder polymeren Matrix, wie z.B. Knochen oder Chitin, stabilisiert werden (GLIDEWELL et al., 1993).

Die Reaktionen der Radikale untereinander führen jedoch meist schon nach Bruchteilen von Sekunden zum Verschwinden dieser neuen Radikalzentren (GOODMAN et al., 1989). In trockenen und harten Bestandteilen von Lebensmitteln bleiben einige dieser Produkte jedoch erhalten. Sie sind nachweislich strahlungsspezifisch und haben zum Teil eine Lebensdauer, die über die übliche Lagerzeit der Lebensmittel selbst hinausgeht. Diese Tatsache wird beim Nachweis bestrahlter Lebensmittel mittels Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie ausgenutzt (LINKE et al., 1993). Der Vorteil dieser Methode ist die Schnelligkeit und der nicht invasive Charakter (SCHREIBER et al., 1993).

ESR-Spektroskopie kann dort eingesetzt werden, wo die Lebensdauer der freien Radikale deutlich verlängert ist, wie das z.B. in Schalen von Nüssen, in Kernen von Obst und Gemüse, in chitinhaltigen Schalen von Seetieren, in Eierschalen, in Knochen oder in Trockenfrüchten der Fall ist (HELLE et al., 1992).

## 9.3. LUMINESZENZ METHODEN

Bestrahlung verursacht die Entstehung von positiven Ionen und freien Elektronen, die in den trockenen und festen Bestandteilen der Lebensmittel stabilisiert werden. Wenn nun Energie zugeführt wird, kommt es zu einer Rekombination der freien Elektronen und der Ionen, was zu einer Emission von Licht (RAFFI und KENT, 1996) im Bereich von 400 - 700 nm führt (GLIDEWELL et al., 1993). Die Energie kann entweder durch Hitze (*Thermolumineszenz*), durch Licht (*Photostimulierte Lumineszenz*) oder durch Lösung der Probe in einer Flüssigkeit (*Lyolumineszenz*) zugeführt werden. Die letzte Methode ergibt jedoch nur eine sehr schwache Lichtemission, die aber durch den

Zusatz von einem chemischen Verstärker, wie z.B. Luminol, angeregt werden kann (*Chemilumineszenz*) (DIEHL, 1995). Der Einsatz der Methoden richtet sich nach der zu untersuchenden Probe, z.B. zeigt Paprika keinen Chemilumineszenz-Effekt, weist aber eine hohe Thermolumineszenz-Intensität auf. Bei Wacholderbeeren verhält es sich umgekehrt (HEIDE et al., 1989).

### 9.3.1. Thermolumineszenz

Die Thermolumineszenz-Methode ist sehr einfach anzuwenden und kostengünstig. Sie ist optimal zur Identifizierung von bestrahlten Kräutern, Gewürzen und Gemüsen (DIEHL, 1995).

Zur Messung wird das trockene Material (ca. 3 - 20 mg) mit einer Geschwindigkeit von 5 - 10°C/sec erhitzt, bis die Endtemperatur von 300 - 400°C erreicht ist. Die dabei auftretende Lichtemission wird durch einen Detektor registriert und aufgezeichnet (DIEHL, 1995). Das Ergebnis wird in einem Graph ausgedrückt, in dem das emittierte Licht gegen die Temperatur oder gegen die Zeit, während der erhitzt wird, aufgetragen wird. Diese Kurve wird als Glühkurve bezeichnet (ODUKO und SPYROU, 1990).

Diese Lichtemission wird nicht durch das organische Pflanzenmaterial verursacht, sondern durch die den Pflanzen anhaftenden mineralischen Verunreinigungen (z.B. Quarz, Feldspat, ...), da dieses anorganische Material in der Lage ist, in seiner kristallinen Matrix Ladungsträger zu speichern, die dann durch die Hitzestimulation freigesetzt werden (SANDERSON et al., 1989).

### 9.3.2. Photostimulierte Lumineszenz

Bei der photostimulierten Lumineszenz wird Energie in Form von Licht zugeführt, um die in der kristallinen Matrix gefangene Energie freizusetzen (GLIDEWELL et al., 1993). Sie ist im Gegensatz zur Thermolumineszenz und zur Chemilumineszenz nicht invasiv und kann daher an der gleichen Probe mehr als einmal eingesetzt werden, was für eine Verifikation eines positiven Ergebnisses von Bedeutung sein könnte (SCHREIBER et al., 1993).

Bestrahlte Proben weisen hier eine anti-Stokes-Lumineszenz auf, bei der die Frequenz des emittierten Lichts höher ist als die des stimulierenden Lichts, was damit zu erklären ist, daß durch die Lichtstimulierung die Energie, die sich in den

eingeschlossenen Ladungsträgern befindet, freigesetzt wird. Folglich kann dieses Phänomen in unbestrahlten Proben nicht beobachtet werden.

Diese Methode hat ebenfalls eine hohe Spezifität und kann sowohl bei Gesamtproben als auch bei mineralischen Fraktionen angewandt werden (GLIDEWELL et al., 1993).

### **9.3.3. Chemilumineszenz**

Bei dieser Methode wird die eingeschlossene Energie durch Lösen der Probe in einer Flüssigkeit unter Mitwirkung eines chemischen Verstärkers freigesetzt.

1996 wurde von ANDERLE et al. in Österreich eine sehr vielversprechende Methode zur Identifizierung von bestrahlten Knochen und Seetier-Schalen entwickelt, die auf den Grundlagen der Chemilumineszenz aufbaut (ANDERLE et al., 1996). Andere Einsatzgebiete dieser Methode wären Kräuter und Gewürze, Milchpulver und Kakaopulver (SCHREIBER et al., 1993).

## 10. SCHLUSSFOLGERUNG

Anhand der vorliegenden Literatur wurde in dieser Arbeit gezeigt, daß die Befürchtungen vieler Konsumentenschützer hinsichtlich der Gefährlichkeit bestrahlter Lebensmittel unbegründet sind. Wenn gewisse Vorsichtsmaßnahmen bei der Bestrahlung von Lebensmitteln beachtet werden, stellen die Bestrahlung selbst wie auch der Verzehr bestrahlter Lebensmittel keinerlei Gefährdung für Mensch und Umwelt dar. Ganz im Gegenteil: Es konnte eine Vielzahl von Vorteilen nachgewiesen werden.

Die Ausbrüche vieler Krankheiten, die über Lebensmittel übertragen werden, könnten zahlenmäßig drastisch gesenkt werden. Außerdem könnten – ohne Zusatz von Fremdstoffen – schädlingsbedingte Lagerverluste eingeschränkt und die hygienische Qualität der Produkte stark verbessert werden.

Zudem wurde nachgewiesen, daß es in den Lebensmitteln bei Bestrahlung nur zu minimalen Veränderungen der Inhaltstoffe kommt und die ernährungsphysiologische Qualität der Lebensmittel in keiner Weise beeinträchtigt wird.

Dies und die Entwicklung von zuverlässigen Nachweismethoden lassen erwarten, daß es in absehbarer Zukunft zu einer Steigerung der Akzeptanz bestrahlter Lebensmittel innerhalb der Bevölkerung kommen wird.

## 11. Literaturverzeichnis

ANDERLE, H.; STEFFAN, I.; WILD, E.; HILLE, P. (1996): Radioly-Chemiluminescence of Bones and Seafood Shells – a New, Promising Method for the Detection of Food Irradiation? *Fresenius J Anal Chem* 354, 925 – 928.

BERGAENTZLE, M.; SANQUER, F.; HASSELMANN, C.; MARCHIONI, E. (1994): Detection of  $\gamma$ -Irradiated Raw-Milk Camembert Cheeses by Capillary Gas Chromatographic Analysis of Volatile Hydrocarbons. *Food Chem.* 51, 177 – 182.

CLAVERO, M. R. S.; MONK, J. D.; BEUCHAT, L. R.; DOYLE, M. P.; BRACKETT, R. E. (1994): Inactivation of *Escherichia Coli* O157:H7, *Salmonellae*, and *Campylobacter jejuni* in Raw Ground Beef by Gamma Irradiation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, 2069 – 2075.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION (1999) : Proposed draft revised general standard for irradiated foods (at step 3 of the procedure). CL 1999/32-FAC, November 1999. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

DELINCÉE, H. (1993): Control of Irradiated Food: Recent Developments in Analytical Detection Methods. *Radiat. Phys. Chem.* 42, 351 – 357.

DIEHL, J. F. (1995): *Safety of Irradiated Foods*, Marcel Dekker, Inc., New York.

EUROPÄISCHE KOMMISSION (1998): Opinion of the Scientific Committee on Food on the irradiation of eight foodstuffs (expressed on 17.09.1998). Brüssel.

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (1999): Richtlinie 1999/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Februar 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über mit ionisierenden Strahlen behandelte Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile. *Amtsblatt der Europäischen Union* L 066.

EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (1999): Richtlinie 1999/3/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Februar 1999 über die Festlegung einer Gemeinschaftsliste von mit ionisierenden Strahlen behandelten Lebensmitteln und Lebensmittelbestandteilen. *Amtsblatt der Europäischen Union* L 066.

GLIDEWELL, S. M.; DEIGHTON, N.; GOODMAN, B. A.; HILLMAN, J. R. (1993): Detection of Irradiated Food: A Review. *J Sci Food Agric* 61, 281 – 300.

GOODMAN, B. A.; McPHAIL, D. B.; DUTHIE, D. M. L. (1989): Electron Spin Resonance Spectroscopy of Some Irradiated Foodstuffs. *J Sci Food Agric* 47, 101 – 111.

HACKWOOD, S. (1991): The Irradiation Processing of Foods. In: *Food Irradiation* (THORNE, S. Hrsg.), Elsevier Science Publishers Ltd., Essex, 2 – 7.

HASSELMANN C.; MARCHIONI, E. (1991): Methods for Food Irradiation Detection. In: *Food Irradiation* (Thorne. S. Hrsg.), Elsevier Science Publishers Ltd., Essex, 130– 168.

HAWTHORN, J. (1989): The Wholesomeness of Irradiated Foods. In: *Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food. Conference Proceedings*, Geneva. IAEA, Vienna, 29 – 39.

HEIDE, L.; GUGGENBERGER, R.; BÖGL, K. W. (1989): Identification of Irradiated Spices with Luminescence Measurements: A European Intercomparison. *Radiat. Phys. Chem.* 34, 903 – 913.

HELLE, N.; MAIER, D.; LINKE, B.; SUCH, P.; BÖGL, K. W.; SCHREIBER, G. A. (1992): Elektronen-Spin-Resonanzmessungen mit einem Kompakt-ESR-Spektrometer: Schritte zum Routineeinsatz der ESR-Technik bei der Erkennung bestrahlter Lebensmittel. Bundesgesundhbl. 35, 331 – 336.

IAEA (1991): Facts about Food Irradiation.

KAMPELMACHER, E. H. (1989): Food Irradiation and its Contribution to Public Health. In: Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food. Conference Proceedings, Geneva. IAEA, Vienna, 47 – 58.

KHATTAK, A. B.; KLOPFENSTEIN, C. F. (1989): Effect of Gamma Irradiation on the Nutritional Quality of Grains and Legumes. II. Changes in Amino Acid Profiles and Available Lysine. Cereal Chem. 66, 171 – 172.

KILCAST, D. (1994): Effect of Irradiation on Vitamins. Food Chem. 49, 157 – 164.

KUME, T.; ITO, H.; SOEDERMAN, H.; ISHIGAKI, I. (1989): Radiosensitivity of Toxigenic *Aspergillus* Isolated from Spices and Destruction of Aflatoxins by Gamma-Irradiation. Radiat. Phys. Chem. 34, 973– 978.

LEMBKE, P.; BÖRNERT, J.; ENGELHARDT, H. (1995): Characterization of Irradiated Food by SFE and GC-MSD. J. Agric Food Chem. 43, 38 – 45.

LESGARDS, G.; RAFFI, J.; POULIQUEN, I.; CHAOUCH A.-A.; GIAMARCHI, PH.; PROST M. (1993): Use of Radiation-Induced Alkanes and Alkenes to Detect Irradiated Food Containing Lipids. J. Am. Oil Chem. Soc. 70, 179 – 185.

LINKE, B.; HELLE, N.; MAGER, M.; SCHREIBER, G. A.; BÖGL, K. W. (1993): BGA-Ringversuche zur Erkennung bestrahlter Lebensmittel: Elektronen-Spin-Resonanz-Messungen an bestrahltem Fleisch, Fisch und bestrahlten Nüssen. Bundesgesundhbl. 36, 359 – 362.

MOOG, M. P. (1989): Avis de l'Industrie Alimentaire sur l'Acceptation de l'Ionisation. In: Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food. Conference Proceedings, Geneva. IAEA, Vienna, 103 – 114.

MOREHOUSE, K. M.; KU, Y. (1990): A Gas Chromatographic Method for the Identification of Gamma-Irradiated Frog Legs. Radiat. Phys. Chem. 35, 337 – 341.

MOREHOUSE, K. M.; KU, Y. (1992): Gas Chromatographic and Electron Spin Resonance Investigations of  $\gamma$ -Irradiated Shrimp. J. Agric. Food Chem. 40, 1963 - 1971.

MOY, J.H. (1993): Efficacy of Irradiation vs. Thermal Methods as Quarantine Treatments for Tropical Fruits. Radiat. Phys. Chem. 42, 269– 272.

NAKAJIMA, H. (1989): Opening Address. In: Acceptance, Control of and Trade in Irradiated Food. Conference Proceedings, Geneva. IAEA, Vienna, 3 – 5.

ODUKO, J. M.; SPYROU, N.M. (1990): Thermoluminescence of Irradiated Foodstuffs. Radiat. Phys. Chem. 36, 603– 607.

POTTER, N. N. (1986): Food Science, The AVI Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut, 303 – 327.

RAFFI, J.J.; KENT, M. (1996): Methods of Identification of Irradiated Foodstuffs. In: Handbook of food analysis (Nollet, L.M.L., Hrsg). Marcel Dekker, Inc., New York, 1889 – 1906.

RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (1989): Richtlinie 89/397/EWG des Rates vom 14. Juni 1989 über die amtliche Lebensmittelüberwachung. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 186.

RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFTEN (1993): Richtlinie 93/99/EWG des Rates vom 29. Oktober 1993 über zusätzliche Maßnahmen im Bereich der amtlichen Lebensmittelüberwachung. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 290.

ROBERTS, T.; MURRELL, K. D. (1993): Economic Losses Caused by Food-Borne Parasitic Diseases. In: Cost-Benefit Aspects of Food Irradiation Processing. IAEA, Vienna, 51 – 75.

SANDERSON, D. C. W.; SLATER, C.; CAIRNS, K. J. (1989): Thermoluminescence of Foods: Origins and Implications for Detecting Irradiation. Radiat. Phys. Chem. 34, 915 – 924.

SCHREIBER, G.A.; HELLE, N.; BÖGL, K.W. (1993): Detection of Irradiated Food – Methods and Routine Applications. Int. J. Radiat. Biol. 63, 105 – 130.

SILVERMAN, G. J. (1991): Disinfection, Sterilization, and Preservation, (Block, S. S., Hrsg.) Verlag Lea & Febiger, Malvern, Pennsylvania, 566 – 579.

STEVENSON, M. H. (1992): Progress in the Identification of Irradiated Foods. Trends Food Sci. Technol. 3, 257 – 262

STEVENSON, M. H. (1994): Identification of Irradiated Foods. Fd. Technol. 48, 141 – 144.

THAYER, D. W. (1994): Wholesomeness of Irradiated Foods. Fd Technol. 48, 132 – 135.

WHO (1981): Wholesomeness of Irradiated Food, World Health Organization Technical Report Series 659. Geneva.

WHO (1999) : High-dose Irradiation : wholesomeness of food irradiated with doses above 10 kGy. Report of a joint FAO/IAEA/WHO Study Group. WHO technical report series No. 890, Genf.

WILSON-KAKASHITA, G.; GERDES, D. L.; HALL, W. R. (1995): The Effect of Gamma Irradiation on the Quality of English Walnuts (*Junglans regia*). Lebensm.-wiss. u. -technol. 28, 17-20.

XU, Z.; CAI, D.; HE, F.; ZHAO, D. (1993): Radiation Preservation and Test Marketing of Fruits and Vegetables. Radiat. Phys. Chem. 42, 253 – 257.

ZHANG, Z.; LIU, X.; LI, G.; YANG, Y.; TIAN, L. (1993): A Study on Storage and Preservation of Hsueh Pear with Radiation Technology. Radiat. Phys. Chem. 42, 331– 332.