

# Festkörperdosimetrie – 10 Jahre Routineeinsatz und Entwicklung

## Solid state dosimetry – 10 years of routine use and development

Ernst Piesch Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, Gesellschaft für Kernforschung, Karlsruhe

Herrn Prof. Dr. H. Kiefer zum 50. Geburtstag gewidmet.

### 1. Einleitung

Der vorliegende Beitrag berichtet am Beispiel eines zehnjährigen Einsatzes von Festkörperdosimetern im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFZ) über die Einsatzmöglichkeiten von Festkörperdosimetern innerhalb der Personenüberwachung sowie über die im praktischen Einsatz mit Festkörperdosimetern gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse. Zur Personenüberwachung stehen heute Phosphatglasdosimeter, Thermolumineszenzdosimeter und nichtfotografische Kernspurdetektoren zur Verfügung. Im Vergleich zum Filmdosimeter zeigen Festkörperdosimeter bessere dosimetrische Eigenschaften, vor allem eine bessere Meßgenauigkeit, eine geringere Energie- und Richtungsabhängigkeit und ein günstigeres Fadingverhalten. Die Unterteilung der beruflich strahlenexponierten Personen in einen Low-Risk- und einen High-Risk-Personenkreis läßt bei ersteren die Einführung einer kostenreduzierenden Langzeitdosimetrie, bei letzteren eine relativ aufwendige Ausrüstung mit einer für die jeweiligen Bestrahlungsverhältnisse am Arbeitsplatz optimalen Dosimeterkombination wünschenswert erscheinen.

### 2. Routineüberwachung mit Festkörperdosimetern

#### 2.1. Phosphatglasdosimetrie

Im KFZ werden seit 1963 Phosphatglasdosimeter anstelle von Filmdosimetern zur Personenüberwachung eingesetzt (Fig. 1). Im Gegensatz zur Thermolumineszenzdosimetrie waren die dosimetrischen Eigenschaften des Glases schon zu diesem Zeitpunkt bekannt [1]. Die Entwicklung einer perforierten kugelsymmetrischen Dosimeterkapsel, mit der Quantenstrahlung oberhalb 40 keV nachweisbar wurde, ermöglichte eine Anwendung des Glasdosimeters in größerem Umfange. In Ergänzung mit einem Weichstrahldosimeter können noch 15 keV nachgewiesen werden (Fig. 2) [2, 3].

Die Tatsache, daß zunächst keine Vergleichsmessungen mit dem altbewährten Filmdosimeter vorlagen und die günstige Meßgenauigkeit des neuen Dosimeters in Frage gestellt wurde, war Anlaß für umfangreiche Vergleichsmessungen in den darauffolgenden Jahren. Die an verschiedenen Stellen

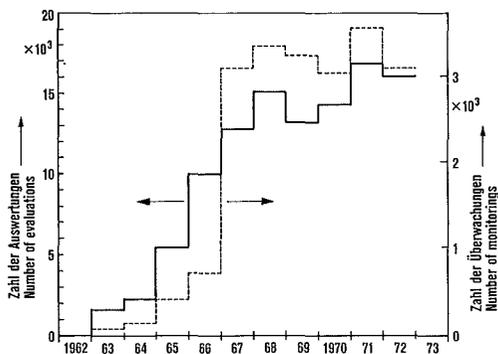


Fig. 1: Zahl der Personenüberwachungen (gestrichelt) mit Phosphatgläsern und der Auswertungen (ausgezogen) von Phosphatgläsern 1963–72 im KFZ  
 Fig. 1: Number of personnel monitorings (dashed lines) with phosphate glass dosimeters, and number of evaluation (full lines) of phosphate glass dosimeters carried out in 1963–1972 at the KFZ

### 1. Introduction

This paper reports, based on the example of ten years of use of solid state dosimeters at the Karlsruhe Nuclear Research Centre (KFZ), on the possibilities of use of solid state dosimeters for purposes of personnel monitoring, and on the experience and results gained in the practical use of solid state dosimeters. The solid state dosimeters now available for personnel monitoring include phosphate glass dosimeters, thermoluminescence dosimeters and nonphotographic nuclear track detectors. Compared with film dosimeters, solid state dosimeters possess better dosimetric properties, especially a better measuring accuracy, a lesser energy- and direction-dependence, and a more favourable fading performance. The subdivision of persons occupationally exposed to radiation into a low risk group and a high risk group makes it desirable to introduce, for the first group cost-reducing long-term dosimetry techniques and, for the second group, a relatively expensive range of dosimeter combinations optimally adapted for the particular radiation exposure conditions at the place of work.

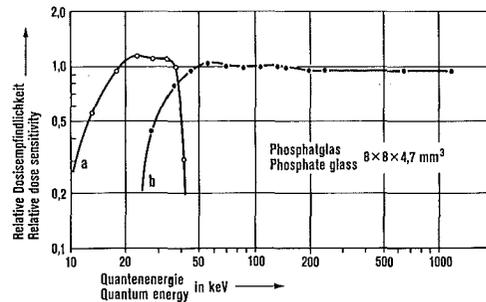


Fig. 2: Energieabhängigkeit der Dosimeteranzeige des Phosphatglas-Kugeldosimeter (a) and of the soft radiation dosimeter (b)  
 Fig. 2: Energy dependence of the dosimeter reading of the phosphate glass dosimeter (a) and of the soft radiation dosimeter (b)

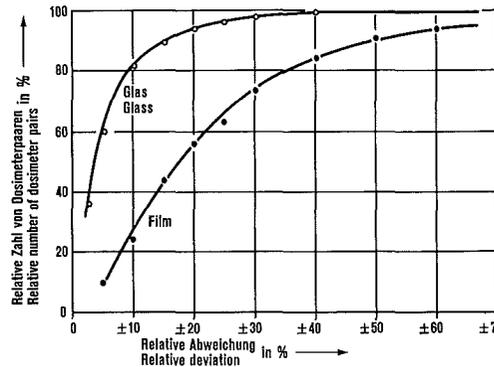


Fig. 3: Relative Anzahl der Glas- bzw. Filmdosimeterpaare, deren Meßwertdifferenz innerhalb des angegebenen Meßfehlers lag. Film- und Glasdosimeterpaare wurden gleichzeitig von einer Person innerhalb der Routineüberwachung in einem Isotopenlabor getragen  
 Fig. 3: Relative numbers of phosphate glass and film dosimeter pairs whose measured value difference was within the relative deviation shown. The film and glass dosimeter pairs were worn simultaneously by the same person in the course of routine monitoring in a radionuclide laboratory

durchgeführten Messungen bestätigten die günstige Energie- und Richtungsunabhängigkeit sowie die bessere Reproduzierbarkeit des Phosphatglas-Kugeldosimeters im Vergleich zum Filmdosimeter (Fig. 3) [4–7]. Nach einem umfangreichen Test [7] durch das damalige Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Karlsruhe wurden Glasdosimeter als amtliche Dosimeter anstelle des bisher eingesetzten Filmdosimeters in der Routineüberwachung eingesetzt und danach vom Länderausschuß für eine Personenüberwachung an Reaktoren und in Isotopenlaboratorien empfohlen.

Besonders hier war es seit Inkrafttreten der 1. SSVO erforderlich, ein Überschreiten der maximal zulässigen Dosis von 3 bzw. 5 rem mit einem genau anzeigenden Dosimeter zu überwachen und nach einem eventuellen Unfall auch höhere Dosen möglichst genau zu messen. Da bis heute nicht alle Dosimetermessstellen in der Lage sind, das für die jeweilige Überwachung optimale Dosimeter auf Wunsch des Strahlenschutzverantwortlichen oder der Aufsichtsbehörde auszuwerten, wurden zur Auswertung von Glasdosimetern auch Meßstellen in anderen Bundesländern herangezogen.

Die Einführung einer dreimonatigen bzw. halbjährlichen Auswerteperiode für den Personenkreis mit geringem Strahlenrisiko sowie die Direktanzeige der Jahresdosis vereinfachten den Arbeitsaufwand der Meßstelle, reduzierten die Überwachungskosten und verbesserten die Nachweisempfindlichkeit in der Routinedosimetrie. So werden im KFZ alle Mitarbeiter mit Glasdosimetern überwacht. Der Vorteil der Phosphatglasdosimetrie, neben monatlichen Zwischenablesungen eine langzeitige Dosisakkumulierung zuzulassen, ermöglicht schließlich eine Eigenauswertung durch den Benutzer vor allem auch in solchen Fällen, wenn eine sofortige Eintragung in den Strahlenschutzpaß erforderlich wird.

Bei der GKSS in Geesthacht wird das Glasdosimeter in Eigenüberwachung ausgewertet, eine jährliche Kontrollablesung ist durch eine amtlich autorisierte Meßstelle vorgesehen.

In der Bundesrepublik wurden im Jahre 1972 etwa 15% der beruflich strahlenexponierten Personen mit Glasdosimetern überwacht, allein im KFZ über 3000 Personen. Zusätzliche

## 2. Routine monitoring with solid state dosimeters

### 2.1. Phosphate glass dosimetry

At the KFZ, phosphate glass dosimeters are being used for personnel monitoring since 1963, instead of film dosimeters (Fig. 1). In contrast to thermoluminescence dosimetry, the dosimetric properties of phosphate glass were already known at that time [1]. The development of a perforated, spherically symmetrical dosimeter capsule, making it possible to detect radiation with quantum energies above 40 keV, opened the way to a large scale use of glass dosimeters. Quantum energies down to 15 keV can be detected in conjunction with a soft radiation dosimeter (Fig. 2) [2, 3].

The fact that, at first, no comparative measurements with conventional film dosimeters were available, and that doubts were cast on the measuring accuracy of the new dosimeter, prompted extensive comparative measurements in the years which followed. These measurements, carried out at various centres, confirmed the favourable energy- and direction-independence and the better measurement reproducibility of the phosphate glass spherical dosimeter in comparison with the film dosimeter (Fig. 3) [4–7]. After extensive testing [7] by the then Land Institute for Work Safety and Work Medicine, Karlsruhe, glass dosimeters were accepted as official dosimeters for routine personnel monitoring, instead of the formerly used film dosimeters, and were then recommended by the Lands Committee for personnel monitoring at reactor facilities and in radionuclide laboratories.

After the promulgation of the First Radiation Protection Ordinance (RPO 1) it became necessary, for these occupational groups in particular, to be able to monitor, with an accurately measuring dosimeter, that the maximum permissible dose (3 rem or 5 rem, as applicable) was not exceeded and, in the event of an accident, to be also able to measure higher doses as accurately as possible. As the number of dosimeter evaluation centres, capable of evaluating dosimeters optimal for each particular kind of monitoring as desired by those in charge of radiation protection or by the supervisory authorities, is still limited, evaluation centres in other Lands

Tab. 1: Mittlere Jahresdosis pro Person in den verschiedenen Anlagen des KFZ Karlsruhe, gemessen mit Phosphatglasdosimeter

| Anlage<br>Facility   | Zahl der Personen<br>Number of persons |      |      |      |      | Mittlere Jahresdosis<br>Mean yearly dose [mrem] |      |      |      |      |
|--|--|------|------|------|------|---|------|------|------|------|
|  | 1968                                   | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 | 1968  | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 |
| Reaktorbetrieb<br>Reactor operation                            | 230                                    | 273  | 255  | 251  | 299  | 365   | 302  | 367  | 271  | 376  |
| Beschleuniger<br>Accelerator                                   | 57                                     | 55   | 60   | 56   | 53   | 266   | 370  | 370  | 424  | 273  |
| Dekontamination<br>Decontamination                             | 74                                     | 103  | 109  | 123  | 151  | 559   | 693  | 465  | 753  | 1144 |
| Strahlenschutz<br>Radiation protection                         | 58                                     | 67   | 61   | 58   | 58   | 408   | 217  | 328  | 310  | 501  |
| Chemische Institute<br>Chemistry institutes                    | 142                                    | 223  | 225  | 254  | 270  | 145   | 207  | 250  | 244  | 256  |
| Physikalische Institute<br>Physics institutes                  | 307                                    | 479  | 443  | 507  | 516  | 105   | 85   | 87   | 91   | 95   |
| Biol. u. medizin. Institute<br>Biology and medicine institutes | 54                                     | 68   | 60   | 72   | 62   | 75  | 74   | 71   | 78   | 81   |
| Sonstige Überwachung<br>Other monitoring                       | 1828                                   | 1569 | 1572 | 1671 | 1200 | 82  | 70   | 79   | 83   | 89   |
| MZFR<br>Multi-Purpose Research<br>Reactor                      | 46                                     | 123  | 128  | 132  | 135  | 1291  | 86   | 122  | 87   | 73   |
| Vorsorgungsbetriebe<br>Ancillary operations                    | —                                      | —    | —    | —    | 285  | —   | —    | —    | —    | 190  |

Table 1: Mean yearly dose per person in various facilities of the KFZ Karlsruhe, measured with phosphate glass dosimeters

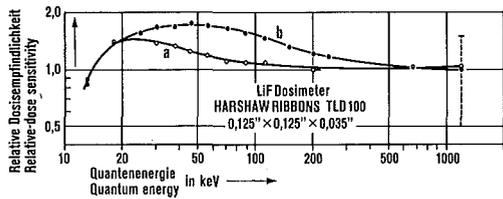


Fig. 4: Energieabhängigkeit der Dosimeteranzeige eines LiF-Dosimeters bei Bestrahlung Freiluft (a) und an der Vorderseite eines Alderson-Menschenphantoms (b). Ohne Sekundärelektronen-Gleichgewicht bei 1,2 MeV

Fig. 4: Energy dependence of the dosimeter reading of a LiF dosimeter irradiated in free air (a) and on the front side of an Alderson human dummy (b), without secondary electron equilibrium for 1.2 MeV

Auswertungen von Dosimetern erfolgen hier auch im Auftrag auswärtiger Stellen. Ergebnisse der innerhalb der routinemäßigen Personenüberwachung gemessenen Jahresdosis sind in Tab.1 wiedergegeben. Zur Langzeitüberwachung der Umgebung des KFZ werden Phosphatglasdosimeter ( $\gamma$ -Dosis) an über 260 Meßstellen sowie LiF-Dosimeter ( $\beta + \gamma$ -Dosis) ausgelegt [34, 35].

### 2.2. Thermolumineszenzdosimetrie

Die geringe Größe des LiF-Dosimeters – wegen der geringen Energieabhängigkeit wird auf ein Energiekompensationsfilter verzichtet (Fig.4) – bestimmt den Einsatz innerhalb der Personenüberwachung zur  $\beta$ -Dosimetrie und zur Fingerdosimetrie. In Ergänzung zum Phosphatglasdosimeter werden im KFZ seit 1968 LiF-Dosimeter der Größe  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  zur Messung der Oberflächendosis von  $\beta$ -Strahlung sowie zur Fingerdosimetrie eingesetzt. Entsprechend den jeweiligen Arbeiten mit Radionukliden hat man die Wahl zwischen einem Fingerdosimeter zur Befestigung an der Fingerkuppe, einem Fingerringdosimeter aus Edelstahl sowie einem Armbanddosimeter zur Messung der ( $\beta + \gamma$ )-Dosis.

Im Vergleich zu dem von den Personendosimetermeßstellen eingesetzten Fingerringdosimeter [8] bieten die hier benutzten Dosimeter die Möglichkeit einer Dosimeterkennzeichnung und einer  $\beta$ -Dosis-Messung in  $7\text{ mg/cm}^2$  Gewebetiefe. In den Dekontaminationsbetrieben des KFZ wird zusätzlich zum Phosphatglasdosimeter zur  $\beta$ -Dosimetrie ein mit  $7\text{ mg/cm}^2$  bzw. mit  $500\text{ mg/cm}^2$  abgedecktes LiF-Dosimeterpaar getragen. Vorteil einer  $\beta$ -Dosimetrie mit LiF ist unter anderem der große Meßbereich, der beim Film nur bis zu dem zweifachen Wert der maximal zulässigen Jahresdosis reicht.

$^6\text{LiF}$ - und  $^7\text{LiF}$ -Dosimeterpaare können zur Messung von  $\gamma$ -Strahlung und thermischen Neutronen vorteilhaft in gemischten Strahlungsfeldern eingesetzt werden (Abschnitt 3.3). Die hohe Empfindlichkeit von  $\text{CaF}_2 : \text{Dy}$ -Dosimetern ermöglicht Dosismessungen unter  $1\text{ mR}$ . Ein natürlicher Strahlenpegel von  $10\ \mu\text{R/h}$  kann nach einer Expositionszeit von 6 Tagen auf etwa  $\pm 10\%$  genau ermittelt werden (siehe auch [10]). Für das energieabhängige Dosimeter wird ein Energiekompensationsfilter benutzt, welches eine Dosismessung oberhalb  $35\text{ keV}$  innerhalb  $\pm 25\%$  ermöglicht (Fig.5). Mit diesem Dosimeter werden im KFZ Kurzzeitmessungen eines erhöhten Strahlenpegels in der Umgebung kerntechnischer Anlagen durchgeführt [11]. Ein temperaturabhängiges Fading muß insbesondere bei längerer Expositionszeit berücksichtigt werden. Meßwerte ohne Energiekompensationsfilter liegen bis zu einem Faktor 3 höher als die von Glas- bzw. LiF-Dosimetern.

### 2.3. Erfahrungen

Die wichtigsten dosimetrischen Eigenschaften des Phosphatglasdosimeters und des LiF-Dosimeters sind in Tab.2 wiedergegeben. Kalibriermessungen bei der Physikalisch-Techni-

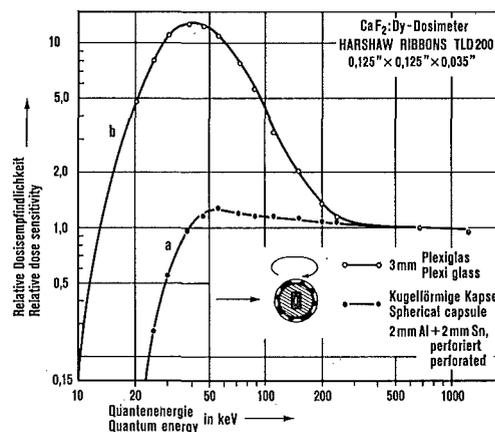


Fig. 5: Energieabhängigkeit der Dosimeteranzeige eines  $\text{CaF}_2 : \text{Dy}$ -Dosimeters mit Kugelskapselung (a) und ohne Energiekompensationsfilter (b)

Fig. 5: Energy dependence of the dosimeter reading of a  $\text{CaF}_2 : \text{Dy}$  dosimeter with spherical encapsulation (a) and without an energy compensation filter (b)

of the German Federal Republic have also been called in for the evaluation of glass dosimeters. The introduction of a three-monthly evaluation period for the low radiation risk group of personnel occupationally exposed to radiation, and the direct reading of the accumulated yearly dose, have

Tab. 2: Dosimetrische Eigenschaften von Phosphatglas- und LiF-Dosimetern  
Table 2: Dosimetric properties of phosphate glass and LiF dosimeters

|  | Phosphatglas<br>(Kugeldosimeter)<br>Phosphate glass<br>(dosimeters spherical)                        | LiF<br>(7 mg/cm <sup>2</sup> )  |
|--|--|---|
| Detektorgröße<br>Detector size   | 8×8×4,7 mm <sup>3</sup>  | 3×3×1 mm <sup>3</sup>   |
| Dosisbereich (linear)<br>Dose range  | 10 ... 3×10 <sup>6</sup> mrem  | 1 ... 3×10 <sup>5</sup> mrem  |
| Meßwertkorrektur<br>Measured value correction  | Vordosis ca. 50 mrem<br>pre-dose   | Dunkelstrom ±2 mR<br>Dark current   |
| Fading   | 10% in 10 a  | ca. < 10% in 1 a  |
| Meßgerätekonstanz<br>Measuring instrument drift  | < ±1%  | ± 1,5% (Leuchtquelle)<br>(Light source)<br>± 3,5% (Gerät)<br>(Instrument) |
| Chargenstreuung<br>batch deviation   | < ±0,5%  | < ±5%   |
| Meßgenauigkeit<br>Measuring accuracy   |  |   |
| Test   | ±3%  | ±10%  |
| mit Detektorkalibrierung<br>with detector calibration  |  | ± 3,5%  |
| + Gerätekalibrierung<br>+ instrument calibration   |  | ± 2,5%  |
| Routine  | ±15%   | ± 40%   |
| mit Energieabhängigkeit<br>with energy-dependence<br>(40 keV ... 1,2 MeV)  | ±35%   | + 40%   |
|  | (Glas 3,7 mm×6 mm<br>mit Tantalfilter<br>[8]) · (Glass 3,7 mm×<br>6 mm, with tantalum filter<br>[8]) | (in 500 mg/cm <sup>2</sup> )  |
| Empfindlichkeit für<br>thermische Neutronen<br>(Meßwert für 10 <sup>10</sup> cm <sup>-2</sup> )<br>Sensitivity for thermal<br>neutrons<br>(Measured value<br>for 10 <sup>10</sup> cm <sup>-2</sup> ) | FD-1: 10 rem<br>RPL-V: 1,2 rem   | TLD 600: 1000 rem<br>TLD 100: 213 rem<br>TLD 700: 1,3 rem                 |
| Auswertegerät<br>Evaluation instrument   | Toshiba FGD-3b   | Harshaw 2000  |

schen Bundesanstalt in Braunschweig sowie Vergleichsmessungen innerhalb der Routineüberwachung mit Dosimeterpaaren ergaben für das Phosphatglas-Kugeldosimeter eine Meßgenauigkeit von  $\pm 15\%$  [7, 4]. IAEA-Vergleichsmessungen mit dem Phosphatglas-Kugeldosimeter zur Kalibrierung von Bestrahlungsanlagen wurden mit einer Meßgenauigkeit von  $\pm 3\%$  durchgeführt [12].

Durch den Einsatz von Glasdosimetern anstelle von Filmdosimetern wurde das Personal an Reaktoren erstmals mit einem Unfalldosimeter ausgerüstet. Im Gegensatz zu dem bis dahin benutzten Kernspurfilm kann das Glas als Aktivierungsdetektor nach einem Kritikalitätsunfall auch thermische und schnelle Neutronen nachweisen. Die Leistungsfähigkeit einer solchen Neutronenmessung wurde im Rahmen eines IAEA-Forschungsvorhabens bei internationalen Vergleichsmessungen an der Kritikalitätsanlage in Valduc, am Health Physics Research Reactor in Oak Ridge sowie am Reaktor in Vinča erprobt [13, 14].

Glasdosimeter bieten im Vergleich zu LiF vor allem nach einem Unfall die Möglichkeit, die Messung jederzeit zu wiederholen, das Dosimeter durch eine einfache Kennzeichnung zu identifizieren und die  $\gamma$ -Dosis im gemischten Strahlungsfeld genau zu messen. Die Neutronenempfindlichkeit von  ${}^7\text{LiF}$  macht hingegen eine getrennte Korrektur des Meßwertes gegenüber thermischen, mittelschnellen und schnellen Neutronen erforderlich [14]. Glasdosimeter wurden u. a. anstelle von Ionisationskammern als annähernd umgebungsäquivalente Meßsonden zur Messung der  $\gamma$ -Aufheizung in Reaktoren eingesetzt [15, 16].

Im Vergleich zum Film- und LiF-Dosimeter ist das Phosphatglas durch seine Kapselung unempfindlich gegenüber  $\beta$ -Strahlung, aber auch unempfindlich gegenüber Oberflächenkontaminationen, so daß Fehlmessungen bis zu Aktivitäten im  $\mu\text{Ci}$ -Bereich auszuschließen sind. Als nachteilig anzusehen sind die individuelle Vordosis des Glases sowie Einflüsse einer eventuellen Glasverschmutzung, die bei einem routinemäßigen Waschvorgang erst Dosismessungen oberhalb 40 mrem ermöglichen.

Die einfache Fluoreszenzanregung des Glases bedingt eine störungsfreie Routineauswertung, ein Vorteil, den man bei gleichzeitiger Benutzung eines TLD-Auswertegerätes zu schätzen lernt. Im Vergleich zum TLD-Auswertegerät sind hier weder hochempfindliche Multiplier und Elektrometer noch Zeitgeber bzw. Temperaturregler vorhanden, deren Störanfälligkeit unter Umständen schon bei neuen Geräten einen monatelangen Ausfall des Gerätes bewirken kann. Ein Auswechseln der Quecksilber-Hochdrucklampe zählt zur routinemäßigen Wartung des Glasauswertegerätes.

Ebenso einfach erfolgt die Gerätekalibrierung mit einem Kalibrierglas. Die Eichlichtquelle bei TLD-Auswertegeräten überprüft zwar die Empfindlichkeit des Multipliers, nicht jedoch die Gesamtmeßempfindlichkeit während des Ausheizvorganges.

Eine Meßgenauigkeit von  $\pm 2,5\%$  ist beim LiF-Dosimeter nur mit einem hohen Kalibrieraufwand realisierbar, beispielsweise durch gleichzeitige Auswertung von mehr als 10 Kalibrierdosimetern.

Im Gegensatz zum Glasdosimeter zeigen LiF-Dosimeter einer Fertigungsserie Exemplarabweichungen der Dosimeterempfindlichkeit bis zu  $\pm 5\%$  (individuelle Kalibrierung des Einzeldosimeters). Beim Auswerten des LiF-Dosimeters werden bis zu 4% des Meßwertes nicht gelöscht. Eine ausreichende Meßgenauigkeit erzielt man daher nur durch genaue Einhaltung des Regenerierungsprozesses (400 °C während 1 h und 100 °C während 2 h) sowie einer Wärmebehandlung bei 100 °C vor der Auswertung zur Reduzierung des Fadings.

simplified the work and reduced the work load on the evaluation centres, reduced the cost of monitoring, and improved detection sensitivity in routine dosimetry. At the KFZ, for example, all members of the staff are monitored with glass dosimeters. Finally, the fact that phosphate glass dosimeters, besides monthly interim readings, also allow long-term dose accumulation, makes it possible for the user to evaluate the dosimeter himself, this being particularly advantageous in cases where an immediate entry in the radiation protection pass is required.

At the GKSS (Company for the Utilisation of Nuclear Energy in Ship Construction and Ship Propulsion) in Geesthacht, glass dosimeters are evaluated at the Company's own monitoring centre with a yearly check at an officially authorised evaluation centre.

In the German Federal Republic as a whole, about 15% of all persons occupationally exposed to radiation were monitored in 1972 with glass dosimeters, this includes over 3000 staff members of the KFZ alone. Additional dosimeters were evaluated at the KFZ for other organisations. The results of yearly dose measurements carried out in 1968–1972 as part of routine personnel monitoring are summarised in Table 1. KFZ has also installed phosphate glass dosimeters (gamma dose) at over 260 locations, as well as LiF dosimeters (beta + gamma dose), for long-term monitoring of the environment.

## 2.2. Thermoluminescence dosimetry

The low energy-dependence of LiF dosimeters (Fig. 4) makes it possible to use them without an energy compensation filter. As a result, LiF dosimeters can be made quite small, and are consequently used in the field of personnel monitoring for beta dosimetry and for finger dosimetry. At the KFZ, LiF dosimeters measuring 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  1 mm have been in use since 1968 for measuring surface doses of beta radiation, and for finger dosimetry, thus supplementing phosphate glass dosimeters. Depending on the particular kind of work with radionuclides, LiF dosimeters are available as finger dosimeters for attaching to fingertips, as finger ring dosimeters in stainless steel, and as bracelet dosimeters for measuring the beta + gamma dose.

In comparison with the finger ring dosimeter used by the personnel monitoring services, the dosimeters used at the KFZ offer the possibility of dosimeter identification marking and make it possible to measure beta doses at a tissue depth of 7 mg/cm<sup>2</sup>. Personnel working in the decontamination facilities of the KFZ wear, in addition to the phosphate glass dosimeter, an LiF dosimeter pair of which one detector is covered with 7 mg/cm<sup>2</sup> and the other with 500 mg/cm<sup>2</sup>, for beta dosimetry. One of the advantages of beta dosimetry with LiF is the wide measurement range, whereas that of film dosimeters extends to only twice the maximum permissible annual dose.

In mixed radiation fields,  ${}^6\text{LiF}$  and  ${}^7\text{LiF}$  dosimeter pairs can be used advantageously for measuring gamma radiation and thermal neutrons (see Section 3.3).

The high sensitivity of  $\text{CaF}_2 : \text{Dy}$  dosimeters makes it possible to measure doses of less than 1 mR. Thus, a natural radiation background of 10  $\mu\text{R/h}$  can be determined with an accuracy of about  $\pm 10\%$  within an exposure time of 6 days (see also [10]). This dosimeter is energy-dependent and is therefore used with an energy compensation filter which makes it possible to carry out, above 35 keV, dose measurements with an accuracy of about  $\pm 25\%$  (Fig. 5). This dosimeter is used at the KFZ for short-term measurements of raised background radiation levels in the vicinity of nuclear engineering facil-

Die nur einmal mögliche Auswertung des Dosimeters macht eine Überprüfung des Meßwertes bzw. eine Sicherstellung der Meßwertinformation durch Ausschreiben der Glow-Kurve erforderlich. Eine Supralinearität der Dosimeteranzeige tritt oberhalb 300 R auf; oberhalb 1000 R führen Strahlendefekte zu einer Verringerung der Dosisempfindlichkeit. Regenerierte, gewaschene LiF-Dosimeter haben im Gegensatz zum Phosphatglas keine individuelle Vordosis. Die Schwankungen des Multiplier-Dunkelstromes  $[(10 \pm 2) \text{mrem}]$  bestimmen u. a. die Reproduzierbarkeit der Messung. Der relativ hohe Arbeitsaufwand, bedingt durch die Kalibrierung des Meßgerätes, die umständliche Handhabung und Regenerierung der Dosimeter läßt nur einen geringen Auswertumfang zu (etwa 1000 Personenüberwachungen pro Person bei monatlicher Auswertung). Im Jahre 1972 wurden im KFZ 5000 Thermolumineszenzdosimeter ausgewertet.

#### 2.4. Entwicklungsstand

Die Messung der Fluoreszenzintensität nicht nur im Gesamtglas, sondern auch in Teilbereichen des Phosphatglases [17] bietet für eine Personenüberwachung neue Gesichtspunkte. Das Dosimeter besitzt damit auch die Eigenschaften eines Analysators, welcher zusätzliche Aussagen über das Strahlungsfeld (Energie, Richtung) liefert. Innerhalb der Routinedosimetrie kann die Fluoreszenzmessung im Gesamtglas erfolgen. Eine zusätzliche differentielle Auswertung des Glases ist nur bei hohen Dosen nach einem Zwischenfall erforderlich. Die Ausmessung der Tiefendosisverteilung im Glas läßt sich außerdem in der Röntgentechnik zur Ermittlung der Halbwertschicht bzw. der vollständigen Schwächungskurve im Glas heranziehen.

Spezielle Dosimeterkapselungen zur Direktanzeige der Organodosi [18] zeigen bei Bestrahlung am Menschphantom günstigere Eigenschaften – zum Teil sogar eine dosisrichtige Anzeige auch bei Bestrahlung der Phantomrückseite – als konventionelle Dosimeter zur Messung der Oberflächendosis. Bei gleichzeitiger Anwendung der differentiellen Fluoreszenzmessung werden eine Analyse des Strahlungsfeldes sowie eine Dosismessung bis zu 15 keV ermöglicht.

Die Direktanzeige der Energiedosis in den kritischen Organen ist um mindestens eine Größenordnung genauer als eine Korrektur der mit dem Dosimeter angezeigten Oberflächendosis unter Zugrundelegung fragwürdiger Abschätzungen des Strahlungsfeldes (Energie, Richtung). Die Vorteile einer Direktmessung der Körperdosis sowie einer Phantomkalibrierung des Personendosimeters können hier nicht näher erläutert werden (siehe auch [9, 36]). Der Einfluß des Körpers auf die Dosimeteranzeige eines relativ energieunabhängigen Dosimeters ist am Beispiel eines LiF-Dosimeters in Fig. 4 wiedergegeben. Eine von der Körperorientierung unabhängige Dosimeteranzeige ist heute für eine Bestimmung der Körperdosis bei einem Unfall (geforderte Meßgenauigkeit  $\pm 30\%$ ) unerläßlich.

Die Entwicklung neuer Gläser mit geringer Energieabhängigkeit (Yokota FD-7 Glas [20] bzw. Gläser auf Fluoridbasis [21]) sowie eines automatischen Glasdosimeterauswertegerätes für die Messung von Quantenstrahlung oberhalb 15 keV [22] verdeutlichen die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten der Glasdosimetrie. Bei Einführung automatischer Auswertegeräte ist mit einem umfangreichen Einsatz von Phosphatgläsern bzw. LiF-Dosimetern in der Routinedosimetrie zu rechnen. Wenn auch beide Dosimeterarten gleichwertige dosimetrische Eigenschaften aufweisen, so läßt sich beim Glasdosimeter sowohl eine Nachmessung als auch eine kostensparende Langzeitüberwachung mit der Möglichkeit einer Zwischenauswertung durchführen.

ities [11]. This dosimeter is subject to temperature-dependent fading which must be taken into account, particularly with long durations of exposure. If this dosimeter is used without an appropriate energy compensation filter, its readings are higher by a factor of up to 3 than corresponding measurements of phosphate glass or LiF dosimeters.

#### 2.3. Accumulated experience

The most important dosimetric properties of phosphate glass dosimeters and of LiF dosimeters are summarised in Table 2. Calibration measurements carried out at the Federal Physical and Engineering Establishment in Braunschweig, and comparative measurements carried out with dosimeter pairs in the course of routine monitoring, have shown for phosphate glass spherical dosimeters a measuring accuracy of  $\pm 15\%$  [7, 4]. IAEA comparative measurements with phosphate glass dosimeters for calibration of irradiation facilities were carried out with an accuracy of  $\pm 3\%$  [12].

Replacement of film dosimeters by glass dosimeters made it possible, for the first time, to equip reactor personnel with an accident dosimeter. In contrast to the formerly used nuclear track film, phosphate glass also serves as an activation detector after a criticality accident, detecting thermal and fast neutrons. The effectiveness of these dosimeters as neutron detectors has been tested in international intercomparison measurements, in connection with an IAEA research project, at the criticality facility in Valduc, at the Health Physics Research Reactor in Oak Ridge, and at the reactor in Vinča [13, 14].

Compared to LiF dosimeters, phosphate glass dosimeters offer the possibility, particularly important after an accident, of repeating the measurement at any time, of identifying the dosimeter by a simple marking, and of accurately measuring the gamma dose in a mixed radiation field. The neutron sensitivity of  $^7\text{LiF}$ , on the other hand, necessitates separate corrections of the readings in respect of thermal, epithermal and fast neutrons [14]. Glass dosimeters are also used, for example, instead of ionisation chambers, as approximately environment-equivalent measuring detectors for measuring the gamma-induced heating up in reactors [15, 16].

Compared to film dosimeters and to LiF dosimeters, phosphate glass dosimeters, owing to their encapsulation, are insensitive to beta radiation but, by the same token, they are also insensitive to superficial contamination, so that spurious measurements up to activities in the  $\mu\text{Ci}$  range are excluded. A disadvantage is the individual pre-dose of the glass and effects of possible fouling of the glass; these effects, assuming a routine washing procedure, allow dose measurements only above 40 mrem.

The simplicity of the procedure for exciting fluorescence of the glass ensures disturbance-free routine evaluation; this advantage is particularly appreciated by those with experience in the use of a TLD evaluation instrument. Compared to the TLD evaluation instrument, the evaluation of phosphate glass requires neither highly sensitive multipliers and electrometers nor timers and temperature regulators the malfunction-proneness of which may be the cause of even a new instrument being out of commission for months at a time. Periodic replacement of the high pressure mercury lamp is part of the routine maintenance of the glass dosimeter reader.

Calibration of the instrument, by means of a calibration glass, is equally simple. With TLD evaluation instruments, by contrast, the calibration light source does test the sensitivity of the multiplier, but not the overall measurement sensitivity during the baking-out process.

**Tab. 3: Unkosten einer Langzeitdosimetrie mit Phosphatglasdosimetern im Vergleich zur derzeitigen Filmdosimeterüberwachung**

**Table 3: Costs of long-term dosimetry with phosphate glass dosimeters in comparison with current costs of film dosimetry monitoring**

| Anwendung<br>Use | Dosimeter-<br>auswertung<br>Dosimeter<br>evaluation   | Arbeitsaufwand für<br>10 000 Personenüberwachungen      |  |
|------------------|---|---|--|
|                  |   | Arbeitsaufwand<br>Labour at the<br>evaluation<br>centre | Unkosten pro<br>Jahr und Person<br>Costs per year<br>per monitored<br>person |
| Glas<br>Glass    | Routine-,<br>Routine,<br>Unfall-,<br>accident,<br>Aktivierungs-<br>dosimeter<br>activation<br>dosimeter | 10 % monatlich<br>monthly                               | 1. Jahr:<br>First year:<br>DM 58,40  |
|                  | 90 % jährlich<br>yearly   | 1 Person<br>technician                                  | 2. Jahr:<br>Second year:<br>DM 8,40  |
| Film             | Routine-<br>dosimeter   | 100 %<br>monatlich<br>monthly                           | 1. Jahr:<br>First year:<br>DM 53,80<br>2. Jahr:<br>Second year:<br>DM 48,-   |

Dosimeterauswertung DM 4,-; Anschaffungspreis für Glasdosimeter DM 25,-, für Filmplakette DM 5,80.

Dosimeter evaluation DM 4,-; purchase price: DM 25,- for glass dosimeters, DM 5,80 for film packets.

Die Aufteilung der beruflich strahlenexponierten Personen in einen Low-Risk- und einen High-Risk-Personenkreis läßt bei mehr als 90% der überwachten Personen jährlich einmal eine Auswertung des Dosimeters sinnvoll erscheinen. Zur Überwachung von 10 000 Personen mit Glasdosimetern wäre dann eine einzige Arbeitskraft, d. h. 90 Messungen pro Tag, erforderlich (Tab. 3).

### 3. Neutronendosimetrie

#### 3.1. Aktivierungsdetektoren

Das von allen Mitarbeitern im KFZ mit dem Phosphatglasdosimeter getragene Unfalldosimeter enthält als Aktivierungsdetektoren Au, Au in Cd, Cu und In in Cd sowie S. Die Ausnutzung der Neutronenaktivierung von Phosphor im Phosphatglas ermöglicht eine Trennung der Aktivierungsanteile sowohl thermischer und mittelschneller als auch schneller Neutronen durch selektive Messung der  $\beta$ -Aktivität von  $^{32}\text{P}$  bzw.  $^{31}\text{Si}$  bei zweimaliger Ausmessung des Glases [23].

Zur Verbesserung des Nachweises mittelschneller Neutronen wurde Arsen als geeigneter Aktivierungsdetektor ausgewählt. Es wurde der  $(n, \gamma)$ -Wirkungsquerschnitt bestimmt und transparente Arsensulfidgläser sowie ein silberaktiviertes Phosphatglas mit As-Zusatz innerhalb der IAEA-Vergleichsmessungen erprobt [24]. As-Gläser ermöglichen Aussagen über das Neutronenspektrum, aber auch über die totale Neutronenfluenz.

Zur Messung der  $\beta$ -Aktivität von Aktivierungsdetektoren wurden in einem Flüssig-Szintillationspektrometer für Tritiummessung optimale Meßbedingungen erzielt. Hierbei erfolgt die Ausmessung transparenter Detektoren über eine Direktmessung des  $\beta$ -induzierten Čerenkov-Lichtes, die Messung der Aktivierungsdetektoren zwischen zwei Plastikdetektoren.

#### 3.2. Kernspurdetektoren

Die ungünstigen dosimetrischen Eigenschaften des Kernspurfilmes, vor allem die Energieabhängigkeit der Äquivalentdosisanzeige von  $\pm 60\%$  im Energiebereich 0,7 bis 14 MeV

**Tab. 4: Dosimetrische Eigenschaften von Neutronendetektoren**

**Table 4: Dosimetric properties of neutron detectors**

| Detektor · Detector   | Energie<br>Energy         | Anzeige* · Reading                              |
|---|---------------------------|---|
| KODAK NTA Film  | > 0,7 MeV                 | $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}/\text{rem}^{**}$ |
| $^{237}\text{Np}$ + Makrofol<br>(40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )   | > 0,75 MeV                | $4 \text{ cm}^{-2}/\text{rem}^{**}$             |
| $^{232}\text{Th}$ + Makrofol<br>(0,05 mm Folie)<br>(0,05 mm foil) | > 1,2 MeV                 | $37 \text{ cm}^{-2}/\text{rem}^{**}$            |
| Makrofol E<br>(Rückstoßkerne)<br>(Recoil nuclei)                  | > 1 MeV                   | $430 \text{ cm}^{-2}/\text{rem}^{**}$           |
| Albedo Dosimeter  | 100 keV . .<br>. . 14 MeV | 0,5 R/rem                                       |
| $^6\text{LiF}$  | $n_{\text{th}}$           | 1000 R ***                                      |
| $^7\text{LiF}$  |                           | 1,3 R ***                                       |

\* Fluenz-Dosis-Faktor  $2,86 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}/\text{rem}$   
Fluence/dose factor

\*\* Spuren  $\text{cm}^{-2}/\text{rem}$  · Tracks  $\text{cm}^{-2}/\text{rem}$

\*\*\* Neutronenfluenz  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$   
Neutron fluence

With LiF dosimeters, a measurement accuracy of  $\pm 2,5\%$  can only be achieved with laborious calibration, e.g., by simultaneous evaluation of more than 10 calibration dosimeters.

Contrary to phosphate glass dosimeters, LiF dosimeters of the same manufacturing batch show individual fluctuations of the dosimeter sensitivity by up to  $\pm 5\%$  (individual calibration of each dosimeter). When a LiF dosimeter is evaluated, up to 4% of the measured dose may fail to be extinguished. Sufficient measuring accuracy can therefore only be achieved by rigorous compliance with the annealing process conditions (400 °C for 1 hour, followed by 100 °C for 2 hours) and by heat treatment at 100 °C before evaluation in order to reduce fading.

The fact that a LiF dosimeter can be evaluated only once makes it necessary to re-check the measured value and/or to secure the measured value information by plotting out the glow curve. A supra-linearity of the dosimeter reading begins above 300 R, whereas above 1000 R there occurs radiation damage resulting in a reduction of the dose sensitivity. In contrast to phosphate glass dosimeters, regenerated and washed LiF dosimeters have no individual pre-dose. The reproducibility of measurements with LiF dosimeters depends, amongst other factors, on fluctuations of the multiplier dark current, amounting to  $(10 \pm 2)$  mrem. The relatively laborious procedure, entailing calibration of the evaluation instrument and involved handling and regeneration of the dosimeters, limits the evaluation possibilities to about 1000 personnel monitorings per laboratory technician, assuming monthly evaluation. At the KFZ, 5000 thermoluminescence dosimeters were evaluated in 1972.

#### 2.4. Current development level

The possibility of measuring the intensity of the fluorescence not only in the entire phosphate glass cube but also in partial areas of the bead [17] opens new avenues in the field of personnel monitoring. The dosimeter thus possesses additionally the properties of an analyser providing supplementary information on the radiation field (energy, direction). For

[25], die hohe  $\gamma$ -Empfindlichkeit, das Fading und der kleine Dosisbereich sind bei nichtphotographischen Kernspurdetektoren nicht vorhanden (Tab. 4).

Detektorkombinationen von  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  in Kontakt mit Makrofolien dienen zur Bestimmung von Neutronenspektren in der Orts- bzw. Unfalldosimetrie [14, 23, 26, 27] sowie zur Tiefendosisverteilung im Menschphantom [33] (Fig. 6). Die im KFZ verwendeten Spaltfragmentdetektoren sind in einer  $40\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$  dicken Schicht elektrolytisch auf einem Edelstahlträger aufgetragen und werden in Kontakt mit einer  $12\text{-}\mu\text{m}$ -Makrofolie in Sandwichanordnung in einer Detektorhalterung benutzt. Die Auszählung der Kernspuren auf einer Fläche von etwa  $1\ \text{cm}^2$  erfolgt über eine elektrische Entladung im Funkenzähler.

Von einem Einsatz insbesondere von Th in der Routineüberwachung wurde bisher wegen des zu hohen  $\gamma$ -Untergrundes abgesehen.  $^{237}\text{Np}$  mit der günstigsten Energieschwelle bei  $0,75\ \text{MeV}$  erfordert andererseits zur Erzielung einer ausreichenden Nachweisempfindlichkeit Schichtdicken von etwa  $1\ \text{mg}/\text{cm}^2$ , was dem Vielfachen der Freigrenze entspricht.

Zur Bestimmung der Fingerdosis wurde ein Neutronenfingerdosimeter entwickelt [26, 28], welches eine  $0,05\ \text{mm}$  dicke Th-Folie in Kontakt mit Makrofolien in einer konkaven Edelstahlhalterung enthält und Dosismessungen oberhalb  $100\ \text{mrem}$  ermöglicht (Fig. 7). Das Dosimeter wird eingesetzt, wenn die zu erwartende Neutronen-Äquivalentdosisleistung wesentlich höher ist als die  $\gamma$ -Oberflächen-Dosisleistung der Th-Folie von  $1\ \text{mrem}/\text{h}$ . Umfangreiche Kalibrierungen mit  $^{252}\text{Cf}$ -Neutronen und  $(\alpha, n)$ -Neutronen in Glove-Boxen sowie Erfahrungen im Routineinsatz zeigen die Notwendigkeit einer solchen Personenüberwachung (siehe Tab. 5).

Als einfachster und billigster Detektor zur Messung schneller Neutronen oberhalb  $1\ \text{MeV}$  dient eine Kunststoffolie aus Polycarbonat. Neutroneninduzierte Rückstoßkerne und  $\alpha$ -Teilchen können in Makrofol E zur Zeit nur mikroskopisch oberhalb einer Dosis von  $0,5\ \text{rad}$  nachgewiesen werden. Bei den IAEA-Vergleichsmessungen wurde die Einsatzmöglichkeit eines Kunststoffgürtels für die Unfalldosimetrie getestet (Fig. 8) [24, 14]. Zur Ermittlung der Körperorientierung im Strahlungsfeld werden nach einem Kritikalitätsunfall Folien aus dem Gürtel herausgestanzt und ausgewertet.

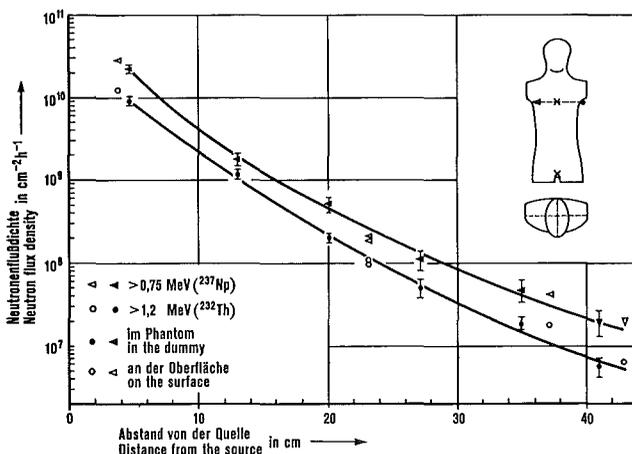


Fig. 6: Flußdichte schneller Neutronen, gemessen mit Spaltfragmentdetektoren, in einem Alderson-Menschphantom,  $^{252}\text{Cf}$ -Neutronenquelle an der Körperoberfläche. Quellstärke  $1,4 \cdot 10^9\ \text{s}^{-1}$

Fig. 6: Flux density of fast neutrons, measured with fission fragment detectors inside an Alderson human dummy, with a  $^{252}\text{Cf}$  neutron source on the surface of the dummy. Source strength  $1,4 \cdot 10^9\ \text{s}^{-1}$

routine dosimetry, fluorescence measurements in the entire glass are sufficient. A supplementary differential evaluation of the glass is only necessary for high doses, after an accident. In addition, plotting the dose distribution in depth by the X-ray technique makes it possible to determine the half-value layer and/or complete attenuation curve in the glass.

Special dosimeter encapsulations for direct reading of the dose in individual organs [18] have shown in irradiation experiments on a human phantom more favourable properties than conventional dosimeters for measuring the surface dose, in some cases even a correct dose reading when the incidence of the irradiation was on the back of the phantom. With additional use of differential fluorescence measurements it is possible to analyse the radiation field and to measure doses down to the  $15\ \text{keV}$  energy level.

Direct readings of the absorbed dose in critical organs are more accurate by at least one order of magnitude than corrections of the surface dose measured by the dosimeter, based on dubious estimates of the radiation field (energy, direction). The advantages of direct measurements of the body dose, and of a phantom calibration of personnel monitoring dosimeters, cannot be discussed here in detail (see also [9, 36]). The effects of the human body on the dosimeter reading of a relatively energy-independent dosimeter are illustrated in Fig. 4 as an example for LiF dosimeter. A dosimeter reading independent of the orientation of the body in the radiation field is nowadays considered indispensable for determining the body dose after an accident (required measuring accuracy  $\pm 30\%$ ).

The development of new glass types with a low energy dependence (Yokota FD-7 glass [20] and glasses on a fluoride basis [21]), and of an automatic glass dosimeter evaluation system for measuring radiation with a quantum energy above  $15\ \text{keV}$  [22], illustrate the future development possibilities of glass dosimetry. Once automatic evaluation systems are introduced, we may expect a considerable increase in the use of phosphate glass dosimeters and of LiF dosimeters for routine dosimetry. Although these two dosimeter types have approximately equivalent dosimetric properties, it should be noted that glass dosimeters allow re-check measurements as well as cost-saving long-term monitoring with the possibility of carrying out intermediate evaluations.

With the classification of persons occupationally exposed to radiation into a low risk group and a high risk group, it is reasonable to carry on a yearly dosimeter evaluation for over  $90\%$  of the monitored personnel. This means that a laboratory technician evaluating 90 dosimeters per day is sufficient for monitoring 10 000 occupationally exposed personnel (Table 3).

### 3. Neutron dosimetry

#### 3.1. Activation detectors

The accident dosimeter, carried by all KFZ personnel together with the phosphate glass dosimeter, contains as activation detectors Au, Au in Cd, Cu and In in Cd, and S. Furthermore, the neutron activation of the phosphorus in the phosphate glass makes it possible to separate the activation contributions of thermal and epithermal as well as of fast neutrons by selective measurement of the beta activity of  $^{31}\text{Si}$  and of  $^{32}\text{P}$  in two measurements of the activity of the glass [23].

A suitable activation detector for better detection of epithermal neutrons is arsenic. The  $(n, \gamma)$  reaction cross-section has been determined, and transparent arsenic sulfide glasses



Fig. 7: Neutronen-Fingerdosimeter  
Fig. 7: Neutron finger dosimeter

Die mikroskopische Auszählung von Kernspuren wurde mit dem Interferenzkontrastverfahren nach Nomarski durch Ausnutzung einer Kontrasterhöhung im farbigen Bilduntergrund verbessert [29]. Dieses Verfahren ist insbesondere zum Nachweis von Rückstoßkernen vorteilhaft anwendbar.

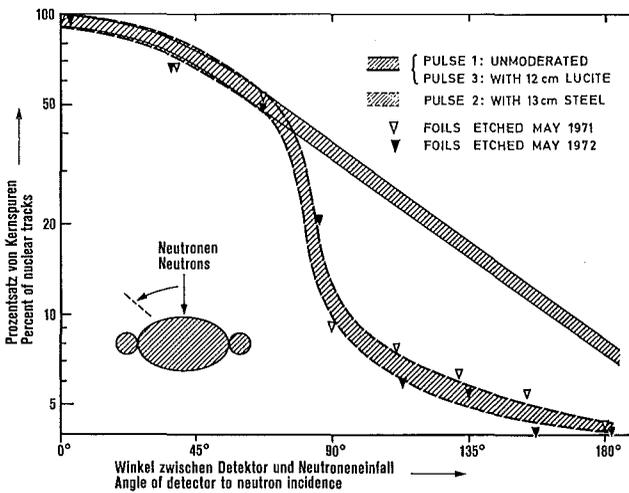


Fig. 8: Relative Anzahl neutroneninduzierter Rückstoßkerne in einem Makrofol-Plastikgürtel nach einer Phantombestrahlung am HPRR in Oak Ridge in Abhängigkeit von der Richtung des Strahleneinfalles.

Fig. 8: Relative number of neutron-induced recoil nuclei in a Makrofol plastic belt after a dummy irradiation at the HPRR in Oak Ridge, plotted against the angle of the detector to the neutron incidence

as well as a silver-activated glass with arsenic content, have been tested in connection with the IAEA program of comparative measurements [24]. Arsenic glasses provide information on the neutron spectrum as well as on the total neutron fluence.

Optimal conditions for measuring the beta activity of activation detectors have been achieved in a liquid scintillation spectrometer for tritium measurements. With this technique, transparent detectors are evaluated by direct measurement of the beta-induced Čerenkov light, whereas opaque activation detectors are measured between two plastic detectors.

### 3.2. Nuclear track detectors

The unfavourable dosimetric properties of the nuclear track film, especially the energy dependence of the dose equivalent reading by as much as about 60% in the energy range from 0,7 to 14 MeV [25], the high gamma sensitivity, the fading, and the narrow dose range, are not found in non-photographic nucleare track detectors (Table 4).

Detector combinations of  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$ , in contact with Makrofol foils, are used for determining neutron spectra in local and accident dosimetry [14, 23, 26, 27] and for determining dose distributions in depth in the human dummy [33] (Fig. 6). The fission fragment detectors used at the KFZ are produced electrolytically, in a layer thickness of  $40\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , onto a stainless steel carrier, and are held in contact with a Makrofol foil in a sandwich arrangement in a detector holder. The nuclear tracks are counted over an area of about  $1\ \text{cm}^2$  by means of an electric discharge in a spark counter.

The use of thorium has been avoided so far, particularly in routine monitoring, because of the excessively high gamma background.  $^{237}\text{Np}$  has a favourable energy threshold of 0,75 MeV, but the layer thickness required for achieving a sufficient detection sensitivity is about  $1\ \text{mg}/\text{cm}^2$ , this being several times higher than the freely permissible limit.

For measuring finger doses a neutron finger ring dosimeter has been developed [26, 28] containing a 0,05 mm thick thorium foil in contact with Makrofol foils in a concave stainless steel holder, which makes it possible to measure doses above 100 mrem (Fig. 7). This dosimeter is used when the expected neutron dose equivalent rate is substantially higher than the 1 mrem/h gamma surface dose rate of the thorium foil. Extensive calibrations with  $^{252}\text{Cf}$  neutrons and with  $(\alpha, n)$

Tab. 5: Fingerdosis bei der Handhabung von Neutronenquellen

| Neutronenquelle<br>Neutron source | Quellstärke<br>Source intensity<br>$\text{s}^{-1}$ | Art der Arbeit   |
|-----------------------------------|--|--|
| $^{241}\text{Am-Be}$              | $3 \times 10^6$                                    | Transport einer Legierung vom Schmelztiegel in den Behälter  |
| $^{244}\text{Cm}$                 | $6,9 \times 10^5$                                  | Probenherstellung für die Spektrographie                     |
| $^{241}\text{AmO}_2$              | $7 \times 10^4$                                    | Herstellung von $\text{AmO}_2\text{-Al}$ -Gemisch            |
| $^{241}\text{Am-Be}$              | $10^6$   | Transport von einer Glove-Box zur anderen                    |
| $^{238}\text{Pu-Be}$              | $2 \times 10^7$                                    | Transport einer Legierung vom Schmelztiegel in den Behälter  |
| $^{238}\text{Pu-Be}$              | $2 \times 10^7$                                    | Öffnen des Behälters auf einer Drehbank                      |
| $^{238}\text{Pu-Be}$              | $2 \times 10^7$                                    | Zuschweißen, Transport und Dichtigkeitsprüfung des Behälters |
| $^{244}\text{Cm-Be}$              | $1,8 \times 10^7$                                  | Ausschleusen aus Glove-Box (Sacktechnik)                     |

Table 5: Finger dose in handling neutron sources

| Kind of work  | Fingerdosis · Finger dose |                         |
|---|---------------------------|-------------------------|
|   | links<br>left<br>mrem     | rechts<br>right<br>mrem |
| Transport of an alloy from the melting crucible into the container      | 1300                      | 1450                    |
| Preparing a sample for spectrography                                    | 240                       | 200                     |
| Preparing an $\text{AmO}_2/\text{Al}$ mixture                           | 100                       | 0                       |
| Transport from one glovebox into another                                | 100                       | 90                      |
| Transport of an alloy from the melting crucible into the container      | 780                       | 1260                    |
| Opening the container on a turning bench                                | 190                       | 570                     |
| Welding shut, Transport and testing the leak-tightness of the container | 980                       | 1990                    |
| Taking out through the glovebox lock (Back technique)                   | 150                       | 70                      |

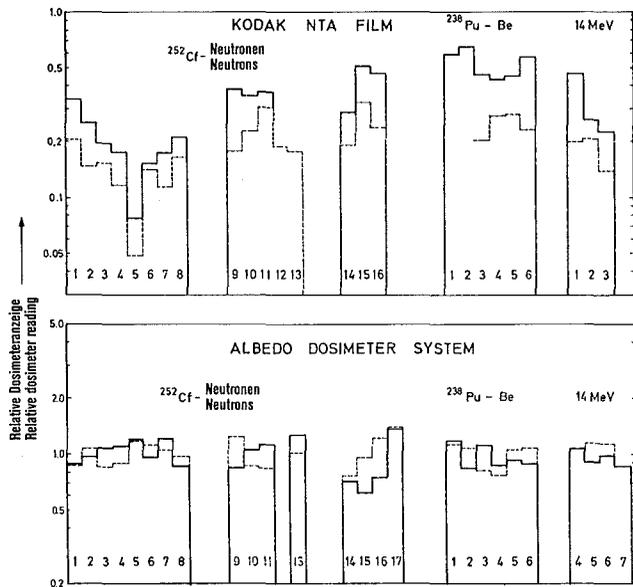


Fig. 9: Relative Dosimeteranzeige des Kernspurfilmes und des Albedo-Neutronendosimeters nach einer Phantombestrahlung mit  $^{252}\text{Cf}$ -,  $^{238}\text{Pu}$ -Be- und 14-MeV-Neutronen unter  $0^\circ$  (—) und  $90^\circ$  (· · ·), bezogen auf die Anzeige eines Rem-Counters.  $^{252}\text{Cf}$ -Quelle ohne (1) bzw. mit 5 cm Abschirmung von Pb (2), Al (3), Fe (4), PVC (6), Beton (8) und 16 cm Fe (5) bzw. 11 cm PVC (7). Meßorte mit hohem Rückstreuanteil

Fig. 9: Relative dosimeter readings of the nuclear track film and of the albedo neutron dosimeter after a dummy irradiation with  $^{252}\text{Cf}$ -,  $^{238}\text{Pu}$  and 14 MeV neutrons at an incidence angle of  $0^\circ$  (—) and  $90^\circ$  (· · ·), referred to the readings of a rem-counter.  $^{252}\text{Cf}$  source without (1) and with 5 cm shielding of Pb (2), Al (3), Fe (4), PVC (6), concrete (8), 16 cm Fe (5) and 11 cm PVC (7). Measurement points with a high fraction of backscattering

### 3.3. Albedo-Neutronendosimetrie

LiF-Albedo-Dosimeter werden im KFZ in allernächster Zeit als Ersatz für den Kernspurfilm in der Routineüberwachung eingesetzt. Dieses Dosimeter zeigt trotz seiner Überempfindlichkeit im Energiebereich thermischer und mittelschneller Neutronen sehr günstige Eigenschaften für den Nachweis schneller Neutronen an  $^{252}\text{Cf}$ , ( $\alpha$ , n)- und 14-MeV-Neutronenquellen [27, 30, 32]. Umfangreiche Vergleichsmessungen mit Kernspurdetektoren (NTA-Film,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) und einem Rem-Counter zeigten, daß der Einfluß rückgestreuter Neutronen aus der Umgebung sowie der Einfluß einer Energie- und Richtungsabhängigkeit bei einem Albedo-Dosimetersystem innerhalb  $\pm 30\%$  liegt (Fig. 9) [31]. Eine Verbesserung der bisher verwendeten Borkapselung soll günstigere Einsatzmöglichkeiten an Reaktoren ermöglichen.

Die Vorteile der Albedo-Dosimetrie gegenüber Kernspurdetektoren liegen in der einfachen Auswertung, der Meßgenauigkeit ( $\pm 3\%$ ), dem Meßbereich (20 mrem bis oberhalb 1000 rem), dem Nichtvorhandensein einer Energieschwelle (dosisäquivalenter Nachweis für Neutronen von 100 keV bis 14 MeV). Nachteilig ist die aufwendige Meßmethode, die mehrere  $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ -Dosimeterpaare sowie evtl. das Tragen eines Dosimetergürtels erforderlich macht.

### 4. Einsatzmöglichkeiten innerhalb der Personenüberwachung

Bei der im KFZ mit Festkörperdosimetern durchgeführten Personenüberwachung wurden folgende Gesichtspunkte angestrebt:

- Sinnvolle Auswahl eines geeigneten Dosimeters nach den speziellen Erfordernissen des Arbeitsplatzes (Strahlenart, Energie) und der Art der Tätigkeit: anstelle des fehleranfälligen Filmdosimeters das »Dosimeter der Wahl«.

neutrons in glove boxes, and experience accumulated in routine use, show the need for this kind of personnel monitoring (see Table 5).

The simplest and cheapest detector for measuring fast neutrons with energies above 1 MeV is a plastic foil of polycarbonate. At present, tracks of neutron-induced recoil nuclei and alpha particles can be detected in Makrofol E only by microscopic examination and only at doses above 0,5 rad. In the IAEA program of comparative measurements, the possibility of use of a plastic belt for accident dosimetry was investigated (Fig. 8) [24, 14]. After a criticality accident, individual foils are taken out of the belt and evaluated, to determine the orientation of the body in the radiation field at the time of the accident.

The technique of counting the nuclear tracks under the microscope has been improved by the interference contrast method according to *Nomarski*, making use of contrast enhancement in the coloured image background [29]. This method is particularly suitable for detecting tracks of recoil nuclei.

### 3.3. Albedo neutron dosimeters

At the KFZ it is intended to replace shortly the nuclear track film dosimeters, now used in routine monitoring, by LiF albedo dosimeters. These dosimeters, despite their hypersensitivity in the energy range of thermal and epithermal neutrons, show in tests with  $^{252}\text{Cf}$ , ( $\alpha$ , n) and 14 MeV neutron sources very favourable properties for the detection of fast neutrons [27, 30, 32]. Extensive comparative measurements with nuclear track detectors (NTA film,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) and with a rem-counter have shown that, with an albedo dosimeter system, the combined effects of backscattered neutrons from the environment, and of the energy- and direction-dependence, do not exceed  $\pm 30\%$  (Fig. 9) [31]. An improvement of the boron encapsulation used so far is expected to result in better possibilities of use in reactors.

The advantages of albedo dosimetry in comparison with nuclear track detectors lie in simple evaluation, satisfactory measuring accuracy ( $\pm 3\%$ ), wide measuring range (from 20 mrem to over 1000 rem) and absence of an energy threshold (dose equivalent detection of neutrons from 100 keV to 14 MeV). A disadvantage is the laborious measuring procedure which necessitates several  $^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$  dosimeter pairs, and sometimes the wearing of a dosimeter belt.

### 4. Possibilities of use for personnel monitoring

The personnel monitoring with solid state dosimeters practised at the KFZ pursues the following objectives:

- Rational selection of a suitable dosimeter depending on the particular conditions at the place of work (radiation type, energy) and on the kind of work, i.e., of the "dosimeter of choice" instead of the error-prone film dosimeter.
- Complete detection, for all staff members, of the genetically significant yearly dose, including the natural radiation background at the place of work.
- Complete detection of a possible accident dose at the place of work.
- Determination of the mean occupational radiation dose for a particular group of people (mean yearly dose per person).
- Advantages of a better measurement accuracy, as well as cost saving, by introducing long-term dosimetry for the low radiation risk group of personnel (40 mrem/a, about 1/10th of the cost of monthly monitoring).

Tab. 6: Die im KFZ benutzten Festkörperdetektoren

| Dosimeter   | Anwendung<br>(Strahlenart/Energie)                         |
|---|--|
| <b>Routinedosimetrie</b>  |  |
| - Phosphatglas-Kugeldosimeter   | $\gamma$ -Strahlung > 40 keV                               |
| + Weichstrahldosimeter  | bzw. > 15 keV  |
| - LiF-Dosimeter mit 7 mg/cm <sup>2</sup>  | ( $\beta + \gamma$ )-Oberflächendosis                      |
| - LiF-Dosimeter mit 500 mg/cm <sup>2</sup>  | $\gamma$ -Strahlung > 15 keV                               |
| - LiF-Albedodosimeter   | Neutronen > 100 keV bis<br>14 MeV<br>(sowie $n_{th}/n_m$ ) |
| <b>Teilkörperdosimetrie</b>   |  |
| - LiF-Fingerdosimeter,<br>Fingerringdosimeter oder Arm-<br>banddosimeter mit 7 mg/cm <sup>2</sup> | ( $\beta + \gamma$ )-Oberflächendosis                      |
| - Neutronenfingerdosimeter<br>mit <sup>232</sup> Th   | Neutronen > 1,2 MeV  |
| <b>Ortsdosimetrie<br/>(Umgebungsüberwachung)</b>  |  |
| - Phosphatglas-Kugeldosimeter   | $\gamma$ -Dosis nach 1 Jahr                                |
| - LiF-Dosimeter mit 7 mg/cm <sup>2</sup>  | ( $\beta + \gamma$ )-Dosis nach 3 Monaten                  |
| - CaF <sub>2</sub> -Dosimeter in Kugelkapsel  | $\gamma$ -Dosis nach 1 Woche                               |
| <b>Neutronen-Unfalldosimetrie</b>   |  |
| - Phosphatglas-Kugeldosimeter   | $n_{th} + n_m, n_{sch}$                                    |
| - Aktivierungsdetektoren-Kassette   | Au, In, Cu, S  |
| - Spaltfragmentdetektoren mit<br><sup>237</sup> Np, <sup>232</sup> Th, <sup>238</sup> U           | Neutronen > 0,75 MeV; > 1,2 MeV<br>> 1,5 MeV               |
| - Plastikdetektor (Rückstoßkerne)   | Neutronen > 1 MeV  |

- Bei allen Mitarbeitern vollständige Erfassung der genetisch signifikanten Jahresdosis einschließlich der natürlichen Strahlenbelastung am Arbeitsplatz.
- Vollständige Erfassung der Unfalldosis am Arbeitsplatz.
- Ermittlung der mittleren beruflichen Strahlenbelastung für einen bestimmten Personenkreis (mittlere Jahresdosis pro Person).
- Vorteile einer besseren Meßgenauigkeit sowie einer Kosteneinsparung durch Einführung einer Langzeitdosimetrie beim Personenkreis mit geringem Strahlenrisiko (40 mrem/a, etwa 1/10 der Kosten einer monatlichen Überwachung).
- Für den High-Risk-Personenkreis bessere Nachweismöglichkeiten bei höheren Strahlenbelastungen durch Einsatz mehrerer Detektoren (Direktmessung der Körperdosis, Richtungsunabhängigkeit durch Meßmethode oder Dosimetergürtel).
- Lückenlose Erfassung der Körperdosis für alle Strahlenarten und Energiebereiche vor allem im Hinblick auf eine Ganzkörperbelastung.

Die Erprobung neuer Detektoren und Meßmethoden und deren Einführung in der Routinedosimetrie führten im KFZ zu einer Verbesserung der Routineüberwachung. Heute stehen anstelle des Filmdosimeters Dosimeterkombinationen zur Verfügung, die dosimeterspezifische Fehlmessungen ausschließen und damit eine erhöhte Sicherheit bei der Überwachung des Arbeitsplatzes sowie bei der Messung von Unfalldosen gewährleisten (Tab. 6). Jede Detektorart bietet besondere Vorteile für eine Personenüberwachung. Durch die Auswahl optimaler Dosimeter soll dieser Vorteil möglichst vollständig ausgenutzt werden. Kleine LiF-Dosimeter und Phosphatglasdosimeter zeigen keineswegs die vorzüglichen dosimetrischen Eigenschaften (Meßgenauigkeit, Reproduzierbarkeit, Energie- und Richtungsunabhängigkeit, Dosimeter-

Table 6: The solid state dosimeters used at the KFZ

| Dosimeter  | Use (radiation type and energy)                                  |
|--|--|
| <b>Routine dosimetry</b>   |  |
| - Phosphate glass spherical dosimeters   | $\gamma$ radiation > 40 keV                                      |
| + Soft radiation dosimeters  | $\gamma$ radiation > 15 keV                                      |
| - LiF dosimeters with 7 mg/cm <sup>2</sup>   | ( $\beta + \gamma$ ) surface dose                                |
| - LiF dosimeters with 500 mg/cm <sup>2</sup>   | $\gamma$ radiation > 15 keV                                      |
| - LiF albedo dosimeters  | Neutrons > 100 keV to 14 MeV<br>(as well as $n_{th}/n_{epith}$ ) |
| <b>Body part dosimetry</b>   |  |
| - LiF finger dosimeters, finger ring dosimeters or bracelet dosimeters with 7 mg/cm <sup>2</sup> | ( $\beta + \gamma$ ) surface dose                                |
| - Neutron finger dosimeters with <sup>232</sup> Th   | Neutrons > 1,2 MeV   |
| <b>Area dosimetry<br/>(environment monitoring)</b>   |  |
| - Phosphate glass spherical dosimeters   | $\gamma$ dose after 1 year                                       |
| - LiF dosimeters with 7 mg/cm <sup>2</sup>   | ( $\beta + \gamma$ ) dose after 3 months                         |
| - CaF <sub>2</sub> dosimeters in spherical capsules  | $\gamma$ dose after 1 week                                       |
| <b>Neutron accident dosimetry</b>  |  |
| - Phosphate glass spherical dosimeters   | $n_{th} + n_m, n_{sch}$  |
| - Activation detector cassette   | Au, In, Cu, S  |
| - Fission fragment detectors with<br><sup>237</sup> Np, <sup>232</sup> Th, <sup>238</sup> U      | Neutrons > 0,75 MeV; > 1,2 MeV;<br>> 1,5 MeV                     |
| - Plastic detectors (recoil nuclei)  | Neutrons > 1 MeV   |

- Better detection possibilities at higher radiation levels for the high risk group of personnel, by the use of several detectors (direct measurements of the body dose, direction-independence thanks to the measuring method or a dosimeter belt).
- Gapless detection of the body dose for all types of radiation and energy ranges, especially in respect of a whole body burden.

The trying out of new detectors and new measuring methods, and their introduction into routine dosimetry, resulted at the KFZ in an improvement of routine monitoring. There are now available, instead of the film dosimeter, dosimeter combinations which exclude dosimeter-specific measuring errors and thus ensure greater reliability in monitoring places of work and in measuring accident doses (Table 6). Each detector type offers particular advantages for personnel monitoring. These advantages should be utilised as fully as possible by the selection of dosimeters optimally suitable for particular tasks. Small size of LiF dosimeters and phosphate glass dosimeters do not possess by any means the outstanding dosimetric properties (measuring accuracy, reproducibility, energy- and direction-independence, dosimeter identification marking) which are commonly attributed to the "normal dosimeter" (see also Table 2). In the 1950s, combinations of these detectors with the film dosimeter were required to satisfy the needs of accident dosimetry. At present, however, such combinations cannot be considered satisfactory because they represent an expensive compensation of the unfavourable dosimetric properties of the film dosimeter and, as far as the requirements of accident dosimetry are concerned, they only simulate a greater measuring accuracy. A combination of various dosimeters for the monitoring of high risk personnel is both necessary and desirable, but it is only rational if use is made of detectors with an optimal measuring accuracy.

kennzeichnung), welche man dem »Normaldosimeter« zuschreibt (s. auch Tab. 2). So waren in den fünfziger Jahren Kombinationen dieser Detektoren mit dem Filmdosimeter zur Verwirklichung einer Unfalldosimetrie erforderlich, sie sind heute jedoch unbefriedigend, weil sie einen sehr kostenaufwendigen Ausgleich der ungünstigen dosimetrischen Eigenschaften des Filmdosimeters darstellen und hinsichtlich der Erfordernisse eine Unfalldosimetrie letztlich nur eine höhere Meßgenauigkeit vortäuschen. Eine Kombination verschiedener Dosimeter ist für eine Überwachung des High-Risk-Personenkreises notwendig und erstrebenswert, jedoch nur sinnvoll, wenn Detektoren mit einer optimalen Meßgenauigkeit eingesetzt werden.

An dieser Stelle danke ich meinen langjährigen Mitarbeitern Fr. M. Reddmann, Fr. I. Hofmann, Fr. B. Baur sowie Herrn E. Lachmann und Herrn B. Burgkhardt, welche die Hauptlast der Routine- und Entwicklungsarbeiten zu tragen haben. (Eingegangen am 28. 6. 1973)

#### Literatur - References

- [1] Kiefer, H., R. Maushart, E. Piesch: Atompraxis **11** (1965) 88. — Piesch, E.: Atompraxis **10** (1964) 268
- [2] Piesch, E.: Direct Information 17/64, 1964
- [3] Maushart, R., E. Piesch: Int. Conf. Lumin. Dosim., Stanford, Bericht CONF-650637 (1965)
- [4] Piesch, E.: Proc. ENEA Symposium Stockholm, 1967, S. 151; Bericht KFK-825 (1968)
- [5] Becker, K.: Health Physics **14** (1968) 17
- [6] Yokota, R., et al.: Health Physics **19** (1970) 316
- [7] Maier, E., I. Narrag: Bericht BMwF-FBK (1968) 68
- [8] Regulla, D.: Der Radiologe **11** (1971) 78
- [9] Piesch, E.: in Topics in Radiation Dosimetry, New York: Academic Press 1972, p. 461-532
- [10] Burgkhardt, B., E. Piesch: Kerntechnik **14** (1972) 128
- [11] Burgkhardt, B., E. Piesch, M. Winter: Proc. IRPA Congress, Washington 1973, to be published
- [12] Dorofeev, G. A., S. Somasundaram: Proc. IAEA-Symp. New Rad. Detectors, Vienna 1971, 59
- [13] Piesch, E.: Bericht KFK-1462 (1971)
- [14] Piesch, E.: Bericht KFK-1635 (1972)
- [15] Scharmer, K., H. G. Eckert: Bericht KFK-1064 (1969)
- [16] Doerfel, H.: Bestimmung der  $\gamma$ -Heizung in schnellen kritischen Anordnungen mit Phosphatgläsern. Diplomarbeit, Univ. Karlsruhe 1972
- [17] Kiefer, H., E. Piesch: Atompraxis **15** (1969) 19; Bericht KFK-1323 (1970)
- [18] Piesch, E.: Health Physics, **15** (1968) 145. — Proc. Int. Conf. Lum. Dosim., Gatlinburg 1968, p. 783
- [19] Piesch, E.: Health Physics **13** (1967) 759; Tagung »Strahlenschutz am Arbeitsplatz«, 1972; Bericht KFK-1638, S. 207
- [20] Yokota, R., et al.: Health Physics **20** (1971) 662
- [21] Käs, H. H.: Atomkernenergie **20** (1972) 75
- [22] Dade, M., A. Hoegl, R. Maushart: Proc. Int. Conf. Lum. Dosim., Risø 1972, p. 693
- [23] Piesch, E.: Proc. IAEA-Symp. Neutron Monit. 1966, p. 471
- [24] Piesch, E.: Proc. IAEA-Symp. New Develop. Rad. Detect., Vienna 1971, p. 399
- [25] Piesch, E.: Atompraxis **9** (1963) 179. — Direct Information 4/64, 1964
- [26] Burgkhardt, B., E. Piesch, K. Bujs, J. Vaane: Tagung »Strahlenschutz am Arbeitsplatz«, 1972; Bericht KFK-1638, S. 195
- [27] Piesch, E., B. Burgkhardt, J. Vaane: Bericht KFK-1666 (1972)
- [28] Bujs, K., J. P. Vaane, B. Burgkhardt, E. Piesch: Proc. IAEA-Symp. Neutron Monit., Vienna 1972, to be published
- [29] Piesch, E.: Zeiss Informationen **18** (1970) 58; Proc. Int. Conf. Nuclear Track Registr. Clermont-Ferrand (1969), Vol. 1, III. 66
- [30] Piesch, E., B. Burgkhardt: Proc. IAEA Symp. Neutron Monit., Vienna 1972, to be published
- [31] Piesch, E., B. Burgkhardt: Proceedings IRPA Congress Washington 1973, to be published
- [32] Burgkhardt, B., E. Piesch: Tagung »Strahlenschutz am Arbeitsplatz«, 1972; Bericht KFK-1638, S. 195
- [33] Burgkhardt, B., E. Piesch: Proc. Jahrestagung Fachverband für Strahlenschutz, Bern 1973, to be published
- [34] Maushart, R., E. Piesch, M. Winter: Bericht KFK-551 (1967)
- [35] Winter, M.: Proc. IAEA-Symp. Rapid Methods Environment, München 1971, p. 525
- [36] Piesch, E.: Bericht KFK-1829 (1973)

