

KfK 4303
März 1988

**Erprobung eines
Albedoneutronendosimetrie-
systems:
TLD-Kalibrier- und Meßverfahren,
Neutronenkalibrierung,
dosimetrische Eigenschaften,
Routineanwendung**

E. Piesch, B. Burgkhardt
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 4303

Erprobung eines Albedoneutronendosimetriesystems:
TLD-Kalibrier- und Meßverfahren, Neutronenkalibrierung,
dosimetrische Eigenschaften, Routineanwendung

E. Piesch und B. Burgkhardt

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht über ein Albedodosimetriesystem zur Messung der Neutronen-Äquivalentdosis in der Personenüberwachung gibt einen Überblick über die Meß- und Kalibriermethode, die dosimetrischen Eigenschaften und die Ergebnisse eines Routineeinsatzes. Das verwendete Zweikomponenten-Albedodosimeter besteht aus einer universellen Borplastikkapselung, deren Beta- und Albedoneutronenfenster jeweils an das automatische TLD-System des Herstellers Alnor, Harshaw, Panasonic und Vinten angepaßt ist und die neben dem TL-Detektor auch einen Kernspurdetektor aufnehmen kann.

Das universelle Albedodosimetersystem wurde innerhalb eines BMU-Vorhabens von vier amtlichen Meßstellen auf seine Eignung in der Personenüberwachung untersucht. Im Vordergrund stand hierbei die Meß- und Kalibriervorschrift für das TLD-System, das Meßverfahren zur Ermittlung der Photonen- und Neutronen-Äquivalentdosis in der Routineüberwachung sowie die Kalibrierung des Personendosimeters in Streustrahlungsfeldern. Die Erprobung ergab Einsatzmöglichkeiten in den Anwendungsbereichen Kernreaktoren - Linearbeschleuniger mit schwerer Abschirmung (N1), Brennstoffzyklus, Umgang mit spaltbarem Material, Kritikalität (N2), Radionuklidquellen (N3) und hochenergetische Teilchenbeschleuniger (N4). Die Meßunsicherheit durch Energieabhängigkeit liegt in den einzelnen Anwendungsbereichen innerhalb eines Faktors 2. Für Bestrahlungen aus dem vorderen Halbraum wird die Meßgröße $H'(10)$ ausreichend richtungsunabhängig angezeigt.

Der Bericht gibt die Ergebnisse eines mehrjährigen Einsatzes innerhalb der Routinedosimetrie sowie die Ergebnisse von Kalibrierbestrahlungen in rückstreuarmen Neutronenfeldern sowie in Streustrahlungsfeldern wieder. Nach Abschluß der Erprobung wurde das Albedodosimeter amtliches Neutronenpersonendosimeter in der BRD, welches das bisherige Neutronenfilmdosimeter ersetzt und die getrennte Bestimmung der Äquivalentdosis von harter Betastrahlung, Photonenstrahlung und Neutronen ermöglicht.

Test of an albedo neutron dosimetry system: TLD calibration and readout procedure, neutron calibration, dosimetry properties, routine application

ABSTRACT

The presented report concerning an albedo dosimetry system for measuring the neutron dose equivalent in personnel monitoring gives an overview of the measurement and calibration method, the dosimetric properties and the results of routine application. The two-component albedo dosimeter in use consists of an universal boron-loaded plastic encapsulation, the beta and albedo neutron windows of which are adopted to the corresponding TLD system of the manufacturers Alnor, Harshaw, Panasonic and Vinten. Beside the TLD detectors the capsule may contain also track etch detectors.

Within a BMU project the universal albedo dosimeter system was investigated by four governmental measurement services in the FRG with respect to its qualification for personnel monitoring with emphasis in the readout and calibration procedures for the TLD system, the evaluation technique for the estimation of the photon and neutron dose equivalent in routine monitoring and the calibration of the personnel dosimeter in stray neutron fields. The test has shown the readiness of the system to act in the application areas of nuclear power reactors and linacs behind heavy shieldings (N1), in the fuel element cycle, use of fissile materials, criticality (N2), use of radionuclide sources (N3), high energy particle accelerators (N4). The uncertainty due to energy dependence was found to be within a factor of 2 for a single application area. In the case of irradiations from the front half space the dose equivalent $H'(10)$ is indicated sufficiently independent of the direction of the radiation incidence.

The report presents the results of several years application in routine dosimetry and the results of calibration exposures in neutron fields of low scattered neutrons as well as in stray radiation fields. After completion of the test the albedo dosimeter became the official neutron personnel dosimeter in the FRG which replaces the so far used neutron film dosimeter and allows for the separate estimation of the dose equivalent of hard beta radiation, photon radiation and neutrons.

	Seite
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung des Vorhabens und durchgeführte Arbeiten	2
3. Beschreibung des Meßverfahrens und des Dosimetriesystems	5
3.1 Meßverfahren der Albedoneutronendosimetrie	5
3.2 Universelle Albedokapselung	7
4. TLD-Meßverfahren zur Neutronenmessung	10
4.1 Vorbereitung des Dosimetriesystems	10
4.1.1 Optimierung der Geräteparameter	10
4.1.2 Chargenkalibrierung	12
4.2 Kalibrierung des Dosimetriesystems	13
4.2.1 Korrektur der Anzeigen	13
4.2.2 Kalibrierfaktor für Photonen	13
4.2.3 Normierter Chargenkalibrierfaktor für Photonen	14
4.2.4 Ermittlung einer Neutronenanzeige	14
4.2.5 Normierter Chargenkalibrierfaktor für Neutronen	15
4.2.6 Kalibrierfaktor zur Ermittlung einer Neutronen- Äquivalentdosis	15
4.3 Routineauswertung	17
4.3.1 Photonen-Äquivalentdosis	17
4.3.2 Neutronen-Äquivalentdosis	17
4.4 Bestimmung der empirischen Standardabweichung der Dosismessung	20
4.5 Rechnerunterstützte Auswertung von TL-Dosimetern	21
5. Kalibriervorschrift für das Dosimetriesystem innerhalb der Routineüberwachung	25
5.1 Feldkalibrierung des Albedodosimeters	25
5.2 Kalibrierfaktor für verschiedene Anwendungsbereiche	27
5.3 Kalibrierfaktor unter Berücksichtigung des Meßwert- verhältnisses $M_N(a)/M_N(i)$	29

5.4	Kombination mit Kernspurdetektor	31
5.5	Interpretation der Dosimeteranzeige in der Personen- dosimetrie	34
6.	Ergebnisse von Kalibrier- und Feldbestrahlungen	36
6.1	Kalibrierbestrahlung 1984	36
6.2	Kalibrierbestrahlung 1986	38
6.3	Kalibrierbestrahlung am HPRR in Oak Ridge	43
6.4	Photonen-Kalibrierbestrahlungen	44
7.	Erprobung innerhalb der Personenüberwachung	47
7.1	Erprobung durch KfK (Alnor-System)	47
7.2	Erprobung durch MPA (Harshaw-System)	51
7.3	Erprobung durch GSF (Panasonic-System)	53
8.	Dosimetrische Eigenschaften des Albedodosimetriesystems	53
8.1	Allgemeines	53
8.2	Meßbereich, untere Nachweisgrenze	54
8.3	Chargenhomogenität in Voranzeige und Ansprechvermögen	56
8.4	Gamma-Diskriminierung	60
8.5	Detektor-Körperabstand	60
8.6	Energieabhängigkeit für Neutronenstrahlung	64
8.7	Energieabhängigkeit für Beta- und Photonenstrahlung	67
8.8	Richtungsabhängigkeit	67
8.9	Zufällige Komponente der Meßunsicherheit	70
8.10	Systematische Meßunsicherheit der Feldkalibrierung	70
9.	Zusammenfassung	71
10.	Literaturverzeichnis	76
Anhang A	Beschreibung der Auswertetechnik zur Neutronendosis- messung mit verschiedenen TLD-Systemen	85
A1	Einleitung	85
A2	Auswertetechnik für das TLD-System Alnor	85

A3 Auswertetechnik für das TLD-System Harshaw	91
A4 Auswertetechnik für das TLD-System Panasonic	95
A5 Auswertetechnik für das TLD-System Vinten	97
Anhang B	100
Merkblatt über die Anwendung des Albedodosimeters innerhalb der amtlichen Personenüberwachung	100
Anhang C	103
Neutronen-Photonen-Äquivalentdosisleistungen in Strahlungs- feldern der Anwendungsbereiche N1 bis N4	103
Anhang D	106
Kriterien für eine Personendosimetrie mit Albedoneutronen- dosimetern	106
Anhang E	109
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen (weitere Formelzeichen siehe Abschnitt 4)	109

1. EINLEITUNG

Die Personendosimetrie von Neutronen beruhte jahrzehntelang auf dem Nachweis von Rückstoßprotonen im Kernspurfilm (1-9).

Als Alternative für den Kernspurfilm in der Routineüberwachung werden heute Albedodosimeter angesehen, die über eine indirekte Messung der im Körper des Dosimeterträgers moderierten Neutronen eine Aussage über die Neutronen-Äquivalentdosis gestatten. Nach Verbesserung der Meß- und Kalibriermethode werden diese Photonen-Neutronendosimeter zunehmend in der Routineüberwachung eingeführt (10-28).

Innerhalb des BMU-Forschungsvorhabens „Erprobung eines Albedoneutronendosimeters“ wurde ein im KfK entwickeltes universelles Albedoneutronendosimeter auf seine Eignung innerhalb der amtlichen Personenüberwachung untersucht¹⁾. An dem Vorhaben beteiligten sich vier amtliche Meßstellen mit fünf verschiedenen TLD-Systemen. Ziel des Vorhabens war die Übernahme und Optimierung des Meß- und Kalibrierverfahrens zur Ermittlung einer Neutronen-Äquivalentdosis in Streustrahlungsfeldern sowie der probeweise Einsatz des Neutronendosimeters innerhalb der Routineüberwachung. Ein einheitliches Kalibrierprogramm ermöglichte die Bestimmung des Ansprechvermögens für die verschiedenen TL-Dosimetriesysteme gegenüber thermischen Neutronen und unmoderierten bzw. moderierten Cf-252-Neutronen und die Durchführung von Feldkalibrierungen in Streustrahlungsfeldern an Reaktoren und im Brennstoffzyklus.

Beim Einsatz des Albedodosimeters in der Routineüberwachung wird zur Bestimmung der Neutronendosis zwischen vier verschiedenen Anwendungsbereichen unterschieden. Das zugrundegelegte Kalibrierverfahren in Streustrahlungsfeldern ermöglicht die Bestimmung ortsabhängiger Kalibrierfaktoren und ist Grundlage zur Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis mit Albedodosimetern in der Personendosimetrie. In Strahlungsfeldern hoher wechselnder Neutronenenergie insbesondere an hochenergetischen Teilchenbeschleunigern kann der Albedodetektor mit einem Kernspurdetektor - einer Polykarbonat-Folie - kombiniert werden, der eine Neutronen-Äquivalentdosismessung oberhalb einer Neutronenenergie von 3 MeV zuläßt.

1) Mit Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Vorhaben St.Sch 835. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

In einem getrennten Bericht wird das Verfahren der Feldkalibrierung ausführlich beschrieben und Beispiele von Feldkalibrierungen für die sogenannten Anwendungsbereiche N1 bis N4 gegeben (28).

Besondere Bedeutung kommen der Erprobung innerhalb der Routineüberwachung und den dort erzielten Ergebnissen zu, die zeigen, daß an verschiedensten Arbeitsplätzen signifikante Neutronendosen, u.U. auch Dosisüberschreitungen auftreten können, die mit den bisherigen Meßverfahren nicht nachweisbar waren.

Ein Merkblatt, das gemeinsam von den amtlichen Meßstellen erstellt wurde, faßt schließlich die besonderen Gesichtspunkte zusammen, die vom Anwender, der Aufsichtsbehörde und der Meßstelle bei Einsatz des Dosimeters in der Routineüberwachung zu beachten sind.

Nach Abschluß des Vorhabens hat der Länderausschuß für Atomkernenergie auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse Ende 1986 empfohlen, diese Neutronendosimeter anstelle des bisherigen Neutronenfilmdosimeters innerhalb der amtlichen Personenüberwachung in der BRD einzusetzen.

2. ZIELSETZUNG DES VORHABENS UND DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

Amtliches Personendosimeter zur Überwachung der Ganzkörperexposition von Photonen- und Neutronenstrahlung war bisher das Filmdosimeter, das in etwas abgeänderter Bauart zur Neutronenüberwachung mit einem Kernspurfilm (Kodak NTA) kombiniert wurde. Kernspurfilme werden seit über 25 Jahren zum Nachweis schneller Neutronen im Energiebereich von etwa 1 MeV bis 14 MeV eingesetzt (2,3,7,14). Innerhalb der Personenüberwachung stand deshalb der Einsatz des Neutronendosimeters an Beschleunigern sowie beim Umgang mit radioaktiven Neutronenquellen im Vordergrund. Messungen des Neutronenspektrums in Streustrahlungsfeldern insbesondere an Reaktoren zeigten schon früh, daß Kernspurfilme hier nicht einsetzbar sind. Weitere wesentliche Nachteile des Kernspurfilms beruhen auf einer hohen Photonenempfindlichkeit, einem kleinen Dosisbereich und vor allem auf das hohe von Umgebungstemperatur und Luftfeuchte abhängige Fading, das auch durch sauerstofffreies Einschweißen des Filmes unter Stickstoffatmosphäre in eine Aluminium-Kunststoffolie nicht ganz verhindert werden kann (6,7,9).

Albedodosimeter sind Personendosimeter, die in einer speziellen Kapselung Thermolumineszenzdetektoren (TL-Detektoren) zum Nachweis thermischer Neutronen enthalten, deren Anzeige zur Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis herangezogen wird. Das Albedodosimeter bietet die Möglich-

keit, Neutronen über den gesamten interessierenden Energiebereich zu registrieren. Langjährige Untersuchungen durch KfK haben gezeigt, daß die relativ hohe Energieabhängigkeit der Dosisanzeige im Energiebereich oberhalb 10 keV in den hier interessierenden Streustrahlungsfeldern signifikant herabgesetzt werden kann, wenn anlagenspezifische Kalibrierfaktoren zur Ermittlung der Neutronendosis herangezogen werden (16,19-22,26-28). Verbesserungen der Kalibrier- und Meßtechnik führten bei KfK bereits 1981 zur Entwicklung eines neuen Albedodosimeters. Diese universelle Dosimeter-Kapselung eignet sich für den Einsatz von 5 verschiedenen TLD-Systemen mit automatischer Auswertung (24,25).

Zielsetzung des BMU-Vorhabens war die Erprobung dieses Albedoneutronendosimeters innerhalb der amtlichen Personenüberwachung, die Übernahme neuerer im KfK entwickelter Meß- und Kalibrierverfahren für Albedoneutronendosimeter zum Nachweis von Neutronen sowie der probeweise Einsatz des Neutronendosimeters durch vier amtliche Meßstellen. Im Rahmen der Erprobung sollte die Eignung des Meßverfahrens bzw. der verschiedenen TLD-Systeme für eine amtliche Photonen-Neutronenpersonenüberwachung geprüft werden. Der Einsatz innerhalb der Personenüberwachung sollte insbesondere auch zeigen, in welchen Neutronenfeldern das Albedodosimeter eingesetzt werden kann. Am Ende des Vorhabens war zu entscheiden, ob das Albedodosimeter innerhalb der amtlichen Personenüberwachung das bisher eingesetzte Neutronenfilmdosimeter ersetzen kann, das in Streustrahlungsfeldern keine Neutronendosisanzeige erwarten läßt.

Entsprechend dem Arbeitsplan wurden im einzelnen folgende Aufgaben bearbeitet:

- Übernahme des von KfK entwickelten Meßverfahrens und der universellen Albedodosimeterkapselung durch die Meßstellen. Diese Dosimeterkapselung ist für mindestens 4 kommerzielle automatische TLD-Systeme einsetzbar.
- Erprobung durch die beteiligten Meßstellen jeweils unter Verwendung des TLD-Systems ihrer Wahl.
- Optimierung und Festlegung der Auswertetechnik für die jeweiligen TLD-Systeme mit automatischer Auswertung unter besonderer Berücksichtigung des individuellen Ansprechvermögens und der Voranzeige der Detektoren im Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Trennung der Neutronen- und Photonenanzeige.
- Durchführung eines für alle beteiligten Meßstellen einheitlichen Kalibrierprogrammes für die TLD-Systeme, u.a. im thermischen Beam und im rück-

streuarmen Kalibrierfeld von unmoderierten und moderierten Cf-252-Neutronen.

- Kalibrierung der von den beteiligten Meßstellen bei Feldkalibrierungen als Phantom- und Referenzdosimeter benutzten 30 cm Polyäthylenkugel, in deren Zentrum die TL-Detektoren der jeweiligen Dosimetriesysteme verwendet werden.
- Feldkalibrierungen in Streustrahlungsfeldern.
- Erprobung des Dosimeters innerhalb der Personenüberwachung durch die vier beteiligten Meßstellen unter den besonderen Gesichtspunkten einer Personenüberwachung mit monatlichem Dosimeterwechsel in den Anwendungsbereichen Reaktoren, Brennstoff-Kreislauf, radioaktive Neutronenquellen und Beschleuniger.
- Klärung der Frage, ob die verschiedenen TLD-Systeme insbesondere bei automatischer Auswertung der Detektoren zum Neutronennachweis innerhalb einer Routineauswertung geeignet sind.
- Feststellung, ob das Albedodosimeter für eine amtliche Personenüberwachung geeignet ist.
- Erarbeitung von Empfehlungen für einen Einsatz innerhalb der amtlichen Personenüberwachung.

An der Erprobung des Albedodosimeters beteiligen sich folgende Meßstellen

- Personendosismeßstelle Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, MPA, Dortmund (TLD-System der Firma Harshaw)
- Auswertungsstelle für Strahlendosimeter der Gesellschaft für Umweltforschung, GSF, Neuherberg (TLD-System der Firma Panasonic)
- Strahlenmeßstelle, Senator für Gesundheit und Umweltschutz, Berlin (TLD-System der Firma Harshaw)
- Meßstelle für Festkörperdosimeter, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, KfK, Karlsruhe (TLD-Systeme der Firma Alnor und Vinten).

3. BESCHREIBUNG DES MESSVERFAHRENS UND DES DOSIMETRIESYSTEMS

3.1 Meßverfahren der Albedoneutronendosimetrie

Für Personenüberwachungen in Neutronenstrahlungsfeldern wird ein einfaches ausreichend empfindliches Neutronendosimeter benötigt, welches die Neutronen-Äquivalentdosis insbesondere schneller Neutronen aber auch von Neutronen im Energiebereich unterhalb 500 keV nachweisen kann. Diesen Zweck erfüllen Albedoneutronendosimeter.

Neutronen werden im Körper des Dosimeterträgers insbesondere durch elastische Streuung an Wasserstoffkernen moderiert und zurückgestreut. Die aus dem Körper des Dosimeterträgers austretenden Neutronen (sog. Albedoneutronen, bevorzugt thermische und/oder mittelschnelle Neutronen) werden in einer besonders dafür vorgesehenen Dosimeterkapselung mit Detektoren für thermische Neutronen (Albedodetektoren) unmittelbar an der Körperoberfläche nachgewiesen.

Der Nachweis von Albedoneutronen erfolgt bevorzugt über die Kernreaktion ${}^6\text{Li}(n,\alpha) {}^3\text{H}$ bzw. ${}^{10}\text{B}(n,\alpha) {}^7\text{Li}$ in Thermolumineszenzdetektoren. Albedodosimeter dienen zur Ermittlung eines relativen Dosismeßwertes. Meßwert ist die integrierte Anzeige der Lichtmenge, die beim Aufheizen des TL-Detektors ausgesandt wird.

Albedoneutronendosimeter mit TL-Detektoren sind gleichzeitig auch Gammadosimeter. Zur Trennung des Gammadosisanteiles werden jeweils Dosimeterpaare, beispielsweise neutronen- und gammaempfindliche ${}^6\text{LiF}$ -Detektoren und nur gammaempfindliche ${}^7\text{LiF}$ -Detektoren eingesetzt. Die Differenz der Meßwertanzeigen ergibt den Meßwert durch Neutronen.

Der Meßwert durch Neutronen ist wegen der systembedingten Energieabhängigkeit der Detektoranzeige nicht unmittelbar ein Maß der Neutronen-Äquivalentdosis. Die Energieabhängigkeit des Albedodetektors wird beispielsweise in Abb. 25 wiedergegeben (siehe Abschnitt 8.6). Das Neutronenansprechvermögen des Albedodosimeters ist darüberhinaus von der Detektorart, der Auswertemethode, der Strahleneinfallrichtung und dem Abstand zur Körperoberfläche abhängig.

Im Hinblick auf die Richtungsabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens wird an der Körperoberfläche bei frontaler Einstrahlung (Bezugsbedingung) eine maximale Dosisanzeige erwartet. Die Richtungsabhängigkeit der Meßwertanzeige ist in ausgeprägter Weise von der Neutronenenergie und den Streustrahlungsanteilen am Meßort abhängig. Im Streustrahlungsfeld wird bei lateralem Strahleneinfall etwa 50 % der Frontalanzeige erwartet.

Die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens ist eine systembedingte Größe, die nur innerhalb geringer Grenzen durch das Material und die Konstruktion der Dosimeterkapselung sowie die Anordnung der Detektoren in der Kapselung variiert werden kann (26). Wegen der Energieabhängigkeit des Albedoansprechvermögens können Kalibrierbestrahlungen, die in einem rückstreuarmen Referenzstrahlungsfeld an einer Cf-252-Quelle gemacht wurden, nicht unmittelbar in Streustrahlungsfeldern angewandt werden, da hier insbesondere der Anteil moderierter und rückgestreuter Neutronen aus der Umgebung von Ort zu Ort variiert. Aufgrund der Ergebnisse von Feldkalibrierungen (siehe Kapitel 5) kann aber der Meßwert des Albedodosimeters einem Ortsdosismesswert zugeordnet werden. Anstelle des Dosimeterträgers wird zur Kalibrierung ein entsprechendes Phantom herangezogen.

Wegen der Abhängigkeit des Kalibrierfaktors von der jeweiligen Anlage und dem jeweiligen Meßort erfordert die Anwendung von Albedodosimetern in der Routineüberwachung in größerem Umfang Kalibrierbestrahlungen zur Ermittlung örtlicher Kalibrierfaktoren. Mit Hilfe von Feldkalibrierungen können folgende Angaben gemacht werden:

- Ermittlung des örtlichen Kalibrierfaktors für die Aufenthaltsorte der Person.
- Gültigkeit eines mittleren Kalibrierfaktors für einen Anwendungsbereich bzw. eine Anlage, in welcher der Kalibrierfaktor innerhalb eines Faktors 2 als konstant angesehen werden kann.
- Ermittlung der Korrelation zwischen der örtlichen Änderung des Kalibrierfaktors und dem Meßwertverhältnis von zwei neutronenempfindlichen Detektoren in der Albedokapsel (siehe Abschnitt 3.2), um eine vom Aufenthaltsort und der betreffenden Anlage annähernd unabhängige Anzeige der Neutronendosis zu ermöglichen.

Die gewonnenen Kalibrierfaktoren sind typisch für einen Anwendungsbereich (siehe Abschnitt 5.2) und lassen sich auf verschiedene Anlagen bzw. Dosimetriesysteme übertragen.

Die Meßunsicherheit der Neutronendosisbestimmung innerhalb der Personenüberwachung wird im wesentlichen bestimmt durch

- Fehlereinflüsse bei der Ermittlung und Vorgabe eines örtlichen Kalibrierfaktors im Streustrahlungsfeld, insbesondere durch die systematische Meßunsicherheit bei der Bestimmung der Äquivalentdosis vor Ort,
- die Gammadiskriminierung des Albedodosimeters, die vom Dosisverhältnis H_{γ}/H_n sowie von der mittleren Energie des Neutronenspektrums abhängt,

- die Qualität des Auswertegerätes, des Dosimetermaterials und der Auswertemethode bei Thermolumineszenzdosimetern insbesondere im Hinblick auf die Meßunsicherheit an der unteren Nachweisgrenze,
- Fading und Strahlenschäden im Detektor.

3.2 Universelle Albedokapselung

Die zuvor routinemäßig eingesetzte Albedodosimeterkapselung war wegen der ungünstigen Anordnung der Einzeldetektoren und der sich daraus ergebenden umständlichen Auswertung für einen größeren Einsatz in der Personenüberwachung wenig geeignet (10-16). Es erschien daher erforderlich, eine einfache Albedodosimeterkapselung insbesondere für TLD-Systeme mit automatischer Auswertung zu entwickeln, welche flache Dosimeterkarten bzw. Kapselungen mit vier Detektoren verwenden¹⁾.

Bei der Konstruktion des hier eingesetzten Albedodosimeters (Abb. 1 und 2) wurden in Bezug auf die Optimierung der dosimetrischen Eigenschaften folgende Gesichtspunkte verwirklicht:

- Die Dosimeterkapselung aus Borkarbid-Plastik kann zwei TLD600/TLD700-Detektorpaare (siehe Fußnote Abschnitt 4.1.1) aufnehmen, um Albedoneutronen sowie thermische Neutronen aus dem Strahlungsfeld getrennt nachzuweisen (Zweikomponenten-Dosimeter).
- Die universelle Albedodosimeterkapselung ist in vier verschiedenen Ausführungen für die automatischen TLD-Systeme der Hersteller Alnor, Harshaw, Panasonic und Vinten erhältlich.
- Ein Detektor hinter einem „Beta-Fenster“ an der Vorderseite der Kapselung mißt bevorzugt thermische Neutronen aus dem Strahlungsfeld.
- Der Albedodetektor zum Nachweis der Albedoneutronen ist in der Kapselung hinter einem „Albedoneutronenfenster“ geeigneter Größe an der dem Körper zugewandten Seite angeordnet.
- Die Größe des Albedoneutronenfensters wurde an die verschiedenen TLD-Systeme angepaßt, um den Einfluß des Detektor-Körperabstandes auf die Meßwertanzeige zu verringern.

1) Die Entwicklung der universellen Albedodosimeterkapselung wurde im Rahmen eines Technologie-Transfer-Vorhabens der KfK durchgeführt

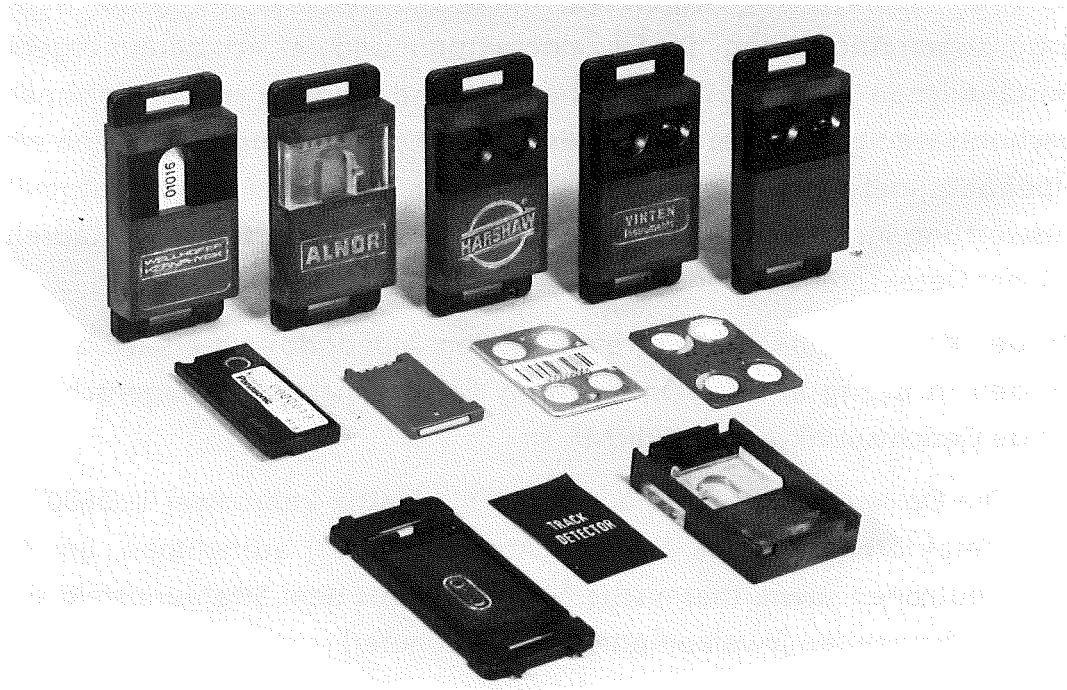


Abb. 1 Universelles Albedoneutronendosimeter für die automatischen TLD-Systeme Alnor, Harshaw, Panasonic (Wellhöfer Kernphysik) und Vinten

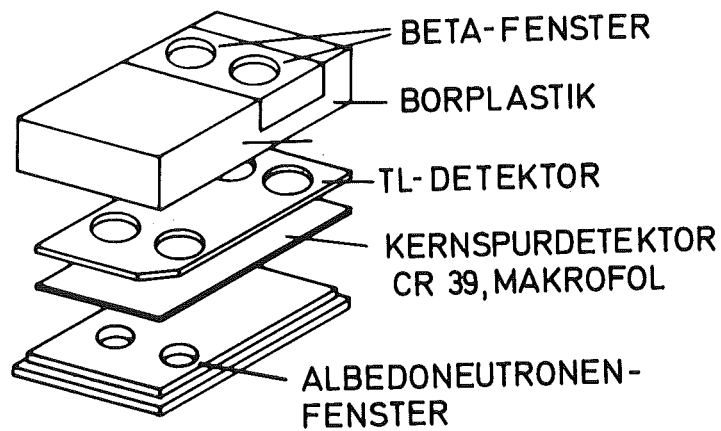


Abb. 2 Aufbau des universellen Beta-, Gamma-, Neutronendosimeters mit TL-Albedodetektoren und einem Kernspurdetektor

- Der Albedodetektor zeigt annähernd gleiches Ansprechvermögen für thermische Neutronen und Neutronen im Energiebereich von etwa 100 keV, der in Streustrahlungsfeldern am häufigsten anzutreffen ist.
- Das TLD-System kann mit einem Kernspurdetektor kombiniert werden.
- Das universelle Beta-/Gamma-/Neutronendosimeter erlaubt die getrennte Messung der Hautdosis und der Ganzkörperdosis von Photonen- und Beta-Strahlung.

4. TLD-MESSVERFAHREN ZUR NEUTRONENMESSUNG

4.1 Vorbereitung des Dosimetriesystems

4.1.1 Optimierung der Geräteparameter

Innerhalb des Forschungsvorhabens beteiligten sich vier amtliche Meßstellen unter Verwendung von fünf TLD-Systemen an der Erprobung des Dosimeters. Als TL-Detektoren wurden ${}^6\text{LiF}/{}^7\text{LiF}$ oder ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7/{}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ verwendet. Im einzelnen wurden folgende Systeme eingesetzt

- das Alnor-Auswertesystem 1313D bei der KfK Karlsruhe,
- das Harshaw Auswertesystem 2080/2000C bei der MPA Dortmund Applerbeck,
- das Panasonic-Auswertesystem UD700 bei der GSF Neuherberg,
- das Vinten-Auswertesystem 813 B1 bei der KfK Karlsruhe,
- das Pitman-Toledo-Auswertesystem Typ 651 für Handauswertung unter Verwendung von Alnorkapseln bei der Strahlenmeßstelle in Berlin.

Die TL-Glowkurven nach Neutronenbestrahlung unterscheiden sich im allgemeinen von TL-Glowkurven nach Gammabestrahlung. Im Hinblick auf eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit von Anzeige und Voranzeige ist deshalb eine entsprechende Optimierung des TLD-Systems erforderlich. Tab. 1 zeigt, in welchem Umfang Fehlereinflüsse bei der Auswertung von TL-Detektoren reduziert werden müssen. Entsprechende Beispiele einer Optimierung sind für verschiedene Dosimetriesysteme im Anhang 1 wiedergegeben.

Die Anzeige durch Neutronen beruht auf einer Differenzbildung der Meßwertanzeigen von TLD600/TLD700-Detektoren¹⁾. Im Gegensatz zur Photonendosimetrie ist es in der Albedodosimetrie erforderlich, die individuelle Voranzeige eines jeden Detektors zu berücksichtigen. Die unkorrigierte Voranzeige A_{0i} des i -ten Dosimeters (siehe Abschnitt 4.2.1) ergibt sich zunächst durch Ausmessung der unbestrahlten Gesamtcharge unmittelbar nach entsprechender Regenerierung. Erfolgt die Regenerierung im Auswertegerät, kann u.U. die unmittelbar nach der Auswertung erfolgte Zweitauswertung zur Voranzeigen-subtraktion der vorausgegangenen Messung herangezogen werden. Eventuell müssen Detektoren mit zu hoher Voranzeige aus der Charge entfernt werden, insbesondere dann, wenn die erforderliche Meßgenauigkeit an der unteren Nachweisgrenze nicht mehr erreicht wird.

1) Hier und im weiteren Textteil stellvertretend auch für andere Dosimeterkombinationen

Tab. 1 Reduzierung von Fehlereinflüssen bei der Auswertung von TL-Detektoren

Voranzeige

- Sicherstellung der vollständigen Regenerierung zur Vermeidung hoher Restdosen nach Vorbestrahlung,
- Optimierung der maximalen Auswertetemperatur mit bestrahlten und unbestrahlten Dosimetern zur Verringerung der Voranzeige,
- Anpassung der Laborbeleuchtung an die Lichtempfindlichkeit der Detektoren (insbesondere Teflondosimeter bei Regenerierung im Auswertegerät),
- regelmäßige Kontrolle der Heizkontaktfläche zum TLD (Heizfinger, Heizpfanne) im Hinblick auf Veränderung, insbesondere Verschmutzung der Oberfläche. (Bei Handauswertegeräten sind platiniierte Heizpfannen empfehlenswert),
- Kontrolle der Dunkelstromerhöhung während der Auswertung z.B. durch starke Erwärmung des Gerätes (Multiplier),
- Selektion fehlerhafter Detektoren hoher Voranzeige.

Individuelles Ansprechvermögen

- Eindeutige Dosimeterzuordnung durch Kennzeichnung der Detektoren bzw. der Karte,
- optimierter Ausheizzyklus mit konstanter Maximaltemperatur und Aufheizrate. Besonders kritisch bei TLD600 wegen unterschiedlicher Neutronen- und Gammaempfindlichkeit von Glowpeak 5 und Glowpeak 6,
- Bestimmung des individuellen Ansprechvermögens möglichst für ^6Li - und ^7Li -Detektoren zusammenhängend in der Reihenfolge ihrer Verwendung, dadurch bestmögliche Korrektur des Ansprechvermögens für die Differenzbildung.

Auswertung

- Kalibrierung des Auswertegerätes bzw. des Dosimetriesystems mit 10 Kalibrierdosimetern der Teilcharge (n) und Kontrolle durch Bestimmung der Standardabweichung der 10 Meßwerte,
- zusätzliche Kontrolle des optimierten Heizzyklus (Glowkurve) bei der jeweiligen Auswertung durch Verwendung eines mit Neutronen bestrahlten ^6Li -Detektors,
- Messung, Bewertung und u.U. Abspeicherung der Glowkurve.

4.1.2 Chargenkalibrierung

Der Meßwert der Äquivalentdosis H_i ergibt sich nach einer Kalibrierbestrahlung aus der korrigierten Anzeige M_i (siehe Abschnitt 4.2.1) und dem individuellen Kalibrierfaktor N_i des i -ten Dosimeters (siehe Abschnitt 4.2.2) zu

$$H_i = N_i \cdot M_i \quad (1)$$

N_i wird für jeden Detektor der Gesamtcharge aller TLD600- und TLD700-Detektoren (siehe Fußnote Abschnitt 4.11) mittels einer Kalibrierbestrahlung mit Cs-137-Photonen bestimmt. Es ist hierbei von Vorteil, die jeweils für ein Dosimeter vorgesehenen TLD600- und TLD700-Detektoren unmittelbar hintereinander auszuwerten. Mit dem jeweiligen Ansprechvermögen R_i gilt

$$N_i = 1/R_i \quad (2)$$

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, den dimensionslosen normierten Kalibrierfaktor n_i des i -ten Dosimeters einzuführen; n_i ist der Quotient des Kalibrierfaktors N_i des i -ten Dosimeters und des Kalibrierfaktors $N(n)$ des Systems, der sich aus dem arithmetischen Mittelwert einer Teilcharge (n) von TLD700 Detektoren ergibt:

$$n_i = N_i/N(n) \quad (3)$$

Bei mehreren Chargen wird der normierte Kalibrierfaktor n_j bzw. n_k der Detektoren (j) bzw. (k) einer nur photoneneempfindlichen Charge (X) bzw. einer photonen- und neutroneneempfindlichen Charge (Y) (z.B. TLD700 und TLD600) grundsätzlich auf den Mittelwert einer Teilcharge (x) bzw. (y) bezogen. Innerhalb der Routineauswertung ist es jedoch zweckmäßig, auf die Referenz-Teilcharge (n) von TLD700-Detektoren zu beziehen, da dann bei der Auswertung der Detektorpaare eines Dosimeters nur ein Bezugswert zugrundegelegt wird. Das verschiedene Photoneneansprechvermögen der Teilchargen (x) und (y) kann durch einen weiteren normierten Charge-Kalibrierfaktor $n_Y(x)$ bzw. $n_Y(y)$ berücksichtigt werden, der auf eine Teilcharge (n) bezogen ist (siehe Abschnitt 4.2.3). Beispielsweise gilt

$$n_j = N_j(X)/N(x) = N_j(X)/n_Y(x) \cdot N(n) \quad (4)$$

Nach den bisherigen Erfahrungen stimmen die normierten Kalibrierfaktoren nach Neutronenbestrahlung n_{ni} mit denen nach Photonenebestrahlung n_{yi} innerhalb der Meßgenauigkeit überein:

$$n_i = n_{yi} \approx n_{ni} \quad (5)$$

Hierbei wird für alle Detektoren einer Charge eine gleiche Isotopenzusammensetzung von Li-6 bzw. B-10 und gleiche Detektorbauart (Transparenz, Korngröße etc.) vorausgesetzt (siehe auch Abschnitt 8.3).

4.2 Kalibrierung des Dosimetriesystems

4.2.1 Korrektur der Anzeigen

Die unkorrigierte Anzeige A_i des i -ten Dosimeters setzt sich zusammen aus den unkorrigierten Teilanzeigen durch die Akkumulierung der interessierenden Dosis A_a , die Voranzeige A_o und u.U. eine Bestrahlung während des Dosimetertransportes A_t , die natürliche Strahlung bei Lagerung A_b bzw. infolge interner Eigenbestrahlung A_e (z.B. durch Tritium aufgrund einer hohen Neutronenvorbestrahlung) zu

$$A_i = A_{ai} + A_{oi} + A_{ti} + A_{bi} + A_{ei}. \quad (6)$$

Die Teilanzeige A_b läßt sich z.B. aus dem Erwartungswert der Ortsdosisleistung durch natürliche Strahlung und der Expositionszeit berechnen. Wenn die Teilanzeigen nicht mit anderen Meßverfahren bestimmt werden konnten, sind Teilchargen von Kontrolldosimetern dafür vorzusehen. Die Teilanzeigen A_b durch natürliche Strahlung und A_t durch den Transport können z.B. gemeinsam mit einem mitlaufenden Kontrolldosimeter ermittelt werden. Auch die individuelle Voranzeige A_{oi} kann u.U. durch den Mittelwert $A_o(u)$ einer Teilcharge (u) ersetzt werden, die unmittelbar nach Regenerierung ausgewertet wird.

Im Falle $A_t = A_e = A_b = 0$ und keiner weiteren Korrektur, wie z.B. Fading, gilt für die interessierende korrigierte Anzeige M_i des i -ten Dosimeters

$$M_i = A_{ai} = A_i - A_{oi} \quad (7)$$

4.2.2 Kalibrierfaktor für Photonen

Die Bestimmung des Kalibrierfaktors des Dosimetriesystems $N_Y(n)$ erfolgt unmittelbar vor jeder Auswertung der Routinedosimeter durch Bestrahlung der Teilcharge (n) mit Cs-137-Photonen auf etwa $H_{Yr} = 10$ mSv. Der Mittelwert der Anzeigen $A(n)$ der TLD700-Detektoren der Teilcharge (n) ergibt nach entsprechender Korrektur der Voranzeige $A_o(u)$ der regenerierten unbestrahlten Teilcharge (u) derselben Charge den Kalibrierfaktor des Systems zu

$$N_Y(n) = \frac{H_{Yr}}{A(n) - A_o(u)} = \frac{H_{Yr}}{M(n)} \quad (8)$$

4.2.3 Normierter Chargenkalibrierfaktor für Photonen

Das unterschiedliche mittlere Photonenansprechvermögen für verschiedene Chargen, bei der Kalibrierung repräsentiert durch die Teilchargen (x) und Teilchargen (y) der Chargen (X) bzw. (Y) (z.B. TLD700 und TLD600 mit $x = 1; 2, \dots$ und $y = 0, 1; 0, 2$), wird mit einem dimensionslosen chargenspezifischen Kalibrierfaktor $n_V(x)$ bzw. $n_V(y)$ korrigiert. Diese errechnen sich aus den entsprechenden Kalibrierfaktoren $N_V(n)$ und $N_V(x)$ bzw. $N_V(y)$ der zum Vergleich verschiedener Chargen heranzuziehenden Referenz-Teilcharge (n) und der interessierenden Teilchargen $n(x)$, zu

$$n_V(x) = \frac{N_V(x)}{N_V(n)} = \frac{n_i \cdot M_i(n)}{n_j \cdot M_j(x)} \quad (9)$$

Analoges gilt für die Bestimmung von $n_V(y)$ für die TLD600-Chargen.

4.2.4 Ermittlung einer Neutronenanzeige

Für ein Albedodetektorpaar ergibt sich die Neutronenanzeige M_n aus der Meßwertdifferenz der korrigierten Anzeigen des neutronen- und gammaempfindlichen Detektors M_k (z.B. TLD600) bzw. des gammaempfindlichen Detektors M_j (z.B. TLD700) ohne Berücksichtigung des Photonenkalibrierfaktors der unterschiedlichen Chargen zu

$$M_{ni} = M_k(Y) - M_j(X) \quad (10)$$

$M_j(X)$ und $M_k(Y)$ sind korrigierte Anzeigen der Detektoren der Chargen (X) bzw. (Y), aus denen die Teilchargen (x) und (y) zur Ermittlung eines Chargenkalibrierfaktors entnommen wurden (siehe Abschnitt 4.2.3).

Unter Berücksichtigung der normierten Photonenkalibrierfaktoren für die verschiedenen Chargen (X) und (Y) sowie der individuellen Kalibrierfaktoren für die Detektoren (j) und (k) ergibt sich

$$M_{ni} = \left[n_V(y) \cdot n_k \cdot M_k(Y) - n_V(x) \cdot n_j \cdot M_j(X) \right] \quad (11)$$

Wird das Ansprechvermögen der TLD600 und TLD700 Detektoren einheitlich auf die Referenzcharge (n) bezogen, dann sind die chargenspezifischen Unterschiede des Ansprechvermögens von TLD600 und TLD700 bereits im individuellen Kalibrierfaktor n_j bzw. n_k enthalten. Damit wird $n_V(x) = n_V(y) = 1$ und die Formeln (11), (16) und (20) vereinfachen sich entsprechend.

4.2.5 Normierter Chargenkalibrierfaktor für Neutronen

Zur Kalibrierung des Dosimetriesystems ist eine Kalibrierbestrahlung mit Photonen ausreichend. Eine zusätzliche Neutronenbestrahlung zur Bestimmung von N_n für Neutronen ist im allgemeinen nur einmal erforderlich. Die Chargen (Y) können u.U. ein unterschiedliches relatives Neutronenansprechvermögen zeigen, so daß dann ein relativer Kalibrierfaktor für jede Detektorcharge zu bestimmen ist.

Änderungen in der Bauart der Detektoren (Isotopenzusammensetzung, Körnung, Abdeckung, Transparenz) können bei verschiedenen Chargen zu Änderungen des relativen Neutronenansprechvermögens führen. Analog zur Kalibrierfaktorbestimmung bei Photonen wird auch hier für die TLD600-Detektoren ein relativer dimensionsloser chargenspezifischer Kalibrierfaktor $n_n(y)$ für Neutronen eingeführt. Dieser ermittelt sich nach gemeinsamer Neutronenbestrahlung auch bei unbekanntem Spektrum bzw. Neutronenfluß, z.B. in einem stark moderierten Neutronenfeld (Cf-252-Quelle in 5 cm Polyethylen) aus den korrigierten Anzeigen einer Referenz-Teilcharge $M_n(r)$ und der interessierenden Charge $M_n(y)$ zu

$$n_n(y) = \frac{N_n(y)}{N_n(r)} = \frac{M_n(r)}{M_n(y)} \quad (12)$$

Dieser Kalibrierfaktor zur Berücksichtigung von Chargen mit unterschiedlichen Neutronenansprechvermögen wird bei der Ermittlung der Neutronen-Äquivalentdosis benötigt (siehe Abschnitt 4.2.6)

4.2.6 Kalibrierfaktor zur Ermittlung einer Neutronen-Äquivalentdosis

Zur Bestimmung des Neutronenkalibrierfaktors ist eine Phantombestrahlung in einem Referenzfeld erforderlich. Wegen der Energie- und Richtungsabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Kalibrierung in einem standardisierten Neutronenstrahlenfeld einer Cf-Quelle durchzuführen, deren Neutronenspektrum zur Anpassung an die in der Personendosimetrie vorkommenden Streustrahlungsfelder einen ausreichend hohen „isotropen“ Streustrahlungsanteil energiearmer Neutronen enthält (z.B. Kalibrierung mit der Primärstandardquelle der PTB in Raummitte, 80 cm über Boden). Dieses Feld soll einen Vergleich aller Dosimetriesysteme und eine langfristige Anbindung an ein definiertes Streustrahlungsfeld ermöglichen.

Der Neutronenkalibrierfaktor N_{nr} ergibt sich aus dem Referenzwert der Neutronen-Äquivalentdosis H_{nr} im Referenz-Strahlungsfeld und der entsprechenden Neutronenanzeige M_{nr} des Albedodetektorpaars mit dem j-ten TLD700-Detektor und dem k-ten TLD600-Detektor der Referenz-Teilchargen (n) bzw. (r) zu

$$N_{nr}(r) = \frac{H_{nr}}{M_{nr}} \quad (13)$$

Hierbei ermittelt sich M_{nr} aus Gl. (11) (siehe Abschnitt 4.2.4)

Für den Einsatz von Albedodosimetern in der Personenüberwachung muß der Kalibrierfaktor im jeweiligen Streustrahlungsfeld bekannt sein. Innerhalb der Routineüberwachung wird je nach Anwendungsbereichen N1 bis N4 ein relativer Neutronenkalibrierfaktor n_N verwendet, der z.B. mit der Referenz-Teilcharge (r) ermittelt wird und sich aus dem Quotienten des Kalibrierfaktors N_{nN} im interessierenden Streustrahlungsfeld und demjenigen im Neutronen-Referenzstrahlungsfeld N_{nr} ergibt

$$n_N = \frac{N_{nN}(r)}{N_{nr}(r)} \quad (14)$$

Hierbei ist $N = 1$ bis 4 entsprechend den Anwendungsbereichen N1 bis N4. Innerhalb eines Anwendungsbereiches wird hierbei n_N als festgelegter Wert oder bei Verwendung einer anlagenspezifischen Kalibrierkurve als ortsabhängiger Wert benützt (siehe Abschnitt 5.2).

In der Routinedosimetrie kann eine laufende Neutronenkalibrierung durch eine Photonenkalibrierung ersetzt werden, wenn die Auswertebedingungen langfristig unverändert bleiben bzw. eine entsprechende Kontrolle der Neutronenanzeige möglich ist (z.B. qualitativer Glowkurvenvergleich nach Photonen- und Neutronenbestrahlung). Dazu muß der Neutronenkalibrierfaktor auf den jeweiligen Photonenkalibrierfaktor bezogen werden. Der normierte dimensionslose Konversionsfaktor ergibt sich zu

$$n_{nr} = \frac{N_{nr}(r)}{N_Y(n)} \quad (15)$$

Das relative Neutronenansprechvermögen $R_n(r)/R_Y(n) = 1/n_{nr}$ eines mit Photonenstrahlung kalibrierten Dosimetriesystems wird zum Ergebnisvergleich von Feldkalibrierungen und zur Darstellung anlagenspezifischer Kalibrierkurven herangezogen (siehe Abschnitt 5.2).

4.3. Routineauswertung

4.3.1 Photonen-Äquivalentdosis

Vor der Routineauswertung der TLD600/TLD700-Chargen (X) und (Y) werden mit den Referenz-Teilchargen (n) und (u) der Kalibrierfaktor des Systems $N_Y(n)$ und die mittlere Voranzeige $A_o(u)$ bestimmt. Die Meßwertanzeige $M_j(X)$ ergibt sich aus der unkorrigierten Anzeige zu $M_j = A_j - A_o$. Die Photonen-Äquivalentdosis ergibt sich aus dem korrigierten Meßwert des neutronenunempfindlichen Detektors mit der Position (i) in der Albedo-Kapselung (z.B. TLD700) unter Berücksichtigung des Kalibrierfaktors $N_Y(n)$ des Systems sowie der normierten Kalibrierfaktoren $n_Y(x)$ und n_j der Charge (X) bzw. des Detektors (j) zu

$$H_{vj} = N_Y(n) \cdot n_Y(x) \cdot n_j \cdot M_j(X) \quad (16)$$

4.3.2 Neutronen-Äquivalentdosis

Die Neutronen-Äquivalentdosis ergibt sich aus der Differenz der korrigierten Meßwertanzeigen M_{ni} des jeweiligen Dosimeterpaares in der Position (i) der Albedodosimeterkapselung unter Berücksichtigung des Neutronenkalibrierfaktors $N_{nr}(r)$ für das Referenz-Strahlungsfeld zu

$$H_{ni} = N_{nr}(r) \cdot M_{ni} \quad (17)$$

Wird der Neutronenkalibrierfaktor ersetzt durch den normierten Kalibrierfaktor n_{nr} und den Photonenkalibrierfaktor des Systems $N_Y(n)$ (siehe Abschnitt 4.2.6, Gl. (15)), so ergibt sich die Anzeige der Neutronen-Äquivalentdosis zu

$$H_{ni} = n_{nr} \cdot N_Y(n) \cdot M_{ni} \quad (18)$$

Bei Verwendung beliebiger Chargen (Y) (z.B. TLD600) anstelle der Referenzchargen ist der normierte Kalibrierfaktor $n_n(y)$ zur Korrektur des unterschiedlichen Neutronenansprechvermögens der jeweiligen Charge (Y) anzuwenden. Für den Einsatz des Albedodosimeters in einem beliebigen Neutronenstrahlungsfeld ist ein zusätzlicher auf das Referenzfeld bezogener relativer Neutronenkalibrierfaktor n_N mit $N=1$ bis 4 entsprechend den Anwendungsbereichen N1 bis N4 anzuwenden (siehe Abschnitt 4.2.6, Gl. (14)). Die Neutronen-Äquivalentdosis innerhalb der Routineüberwachung ergibt sich zu

$$H_{ni} = n_N \cdot n_{nr} \cdot n_n(y) \cdot N_Y(n) \cdot M_{ni} \quad (19)$$

Wie in Abschnitt 4.2.4 näher erläutert, setzt sich die Neutronenanzeige M_{ni} zusammen aus der korrigierten Anzeige $M_k(Y)$ eines neutronen- und gammaempfindlichen Detektors (k) (z.B. TLD600) der Charge (Y) und der korrigierten Anzeige $M_j(X)$ eines gammaempfindlichen Detektors (j) (z.B. TLD700). Hierbei sind die normierten Photonenkalibrierfaktoren der jeweiligen Chargen und Einzeldetektoren zu berücksichtigen. Aus Gl. (19) ergibt sich

$$H_{ni} = n_N \cdot n_{nr} \cdot n_n(y) \cdot N_Y(n) \cdot [n_Y(y) \cdot n_k \cdot M_k(Y) - n_Y(x) \cdot n_j \cdot M_j(X)] \quad (20)$$

Hierbei ist

- H_{ni} Neutronen-Äquivalentdosis ermittelt aus der Meßwertdifferenz der Detektoren (j) und (k) eines Detektorpaares (i) (z.B. TLD600 und TLD700)
- $M_j(X),$
 $M_k(Y)$ Korrigierte Anzeige nach Subtraktion einer Voranzeige des gammaempfindlichen Detektors (j) einer Charge (X) bzw. des neutronen- und gammaempfindlichen Detektors (k)
- M_{ni} Anzeige durch Neutronenstrahlung für ein Detektorpaar (i)
- $N_Y(n)$ Photonen-Kalibrierfaktor für das Dosimetriesystem in Einheiten der Photonen - Äquivalentdosis ermittelt mit der Referenz-Teilcharge (n) mit $N_Y = 1/R_Y$. Hierbei ist N_Y bzw. R_Y der arithmetische Mittelwert des Kalibrierfaktors bzw. des Ansprechvermögens der Referenz-Teilcharge (n) gegenüber Gammastrahlung
- $N_n(r)$ Neutronen-Kalibrierfaktor für das Dosimetriesystem im jeweiligen
 $N_{nN}(r)$ Neutronenstreustrahlungsfeld bzw. in einem Strahlungsfeld des
 $N_{nr}(r)$ Anwendungsbereiches N oder im Referenzstrahlungsfeld einer Cf-252-Neutronenquelle zur Ermittlung der Neutronen-Äquivalentdosis aus der Neutronenanzeige M_{ni} des Detektorpaares (i) mit $N_n(r) = 1/R_n$.
- n_{nr} normierter Neutronenkalibrierfaktor für das Dosimetriesystem definiert als Quotient des Neutronenkalibrierfaktor $N_{nr}(r)$ im Referenzstrahlungsfeld einer Cf-252-Neutronenquelle und dem Photonen-Kalibrierfaktor $N_Y(n)$
- $n_Y(x)$ normierter Photonen-Kalibrierfaktor für die Chargen (X) bzw. (Y)
 $n_Y(y)$ definiert beispielsweise als der Quotient des Kalibrierfaktors $N_Y(x)$ und $N_Y(n)$ der Teilchargen (x) bzw. der Referenz-Teilcharge (n)

- $n_n(y)$ normierter Neutronenkalibrierfaktor für die Chargen (Y) definiert als der Quotient des Kalibrierfaktors $N_n(y)$ und $N_n(r)$ der Teilcharge (y) und der Referenz-Teilcharge (r)
- n_N relativer Kalibrierfaktor für Neutronen mit $N=1$ bzw. 4 für die Anwendungsbereiche N1 bis N4 mit $n_N = N_{nN}(r)/N_{nr}(r)$
- n_j, n_k normierter Photonen-Kalibrierfaktor für die Detektoren (j) und (k) der Chargen (X) und (Y) beispielsweise mit $n_j = N_j(X)/N_Y(x)$ (siehe Abschnitt 4.1.3)

Die Ermittlung der Neutronen-Äquivalentdosis vereinfacht sich in folgenden Sonderfällen:

- Bei Verwendung einer einzigen Charge (Y), z.B. TLD600, wird $n_n(y) = 1$
- Bei Selektierung der Detektoren hinsichtlich des individuellen Kalibrierfaktors wird $n_k = n_j = 1$
- Bei gleichem Photonen-Kalibrierfaktor für die Chargen (X) und (Y) wird $n_Y(y) = n_Y(x) = 1$. Dies trifft auch zu, wenn das Ansprechvermögen der Chargen (X) und (Y) auf die Referenzcharge (n) bezogen wird (siehe Abschnitt 4.2.4)

Tab. 2 Chargenkalibrierfaktor, Voranzeigen und Standardabweichung für TLD600/TLD700, Chargen aus unterschiedlicher Herstellung

Detektor ¹⁾	Nr.	Lieferdatum	Rel. Ansprechvermögen ³⁾		Voranzeige $N_Y M_o$ (mSv)	Empirische Standardabweichung ³⁾	
			$N_Y(n)/N_Y(x)$	$N_n(r)/N_n(y)$		s(u) (mSv)	B (%)
TLD700	n	07/82	1	0	0,06	0,02	1,5
TLD600	r	07/83	1,04	1	0,04	0,02	1,5
TLD700	1	11/74	1,04	0	0,06	0,03	2,5
TLD600	2	11/74	1,1	1,2	0,07	0,03	3,0
TLD700	3	06/85	1,08	0	0,06	0,02	3,0
TLD600	4	06/85	0,93	1	0,10	0,02	2,5
TLD700 ²⁾	5	12/86	0,53	0	0,08	0,03	1,5
TLD600 ²⁾	6	12/86	0,48	1,7	0,13	0,02	2,0

1) TLD600/TLD700-Detektoren 0,9 mm dick

2) TLD-Detektoren 0,4 mm dick

3) s(u) ist die Streuung der Voranzeige $N_Y M_o$ innerhalb der Teilcharge (x) bzw. (y)
B die relative empirische Standardabweichung $s(H_r)/H_r$ mit Kalibrierdosis H_r

Bei der täglichen Routineauswertung unterschiedlicher Chargen ist es ausreichend, das Dosimetriesystem nur mit der Referenz-Teilcharge (n) zu kalibrieren. Auf eine laufende Neutronenkalibrierung kann hierbei verzichtet werden (siehe

Abschnitt 4.2.6). Als Beispiel für das hier vorgeschlagene Kalibrierverfahren werden in Tab. 2 die normierten Kalibrierfaktoren für ein Alnor-Dosimetriesystem wiedergegeben.

4.4. Bestimmung der empirischen Standardabweichung der Dosismessung

Die Standardabweichung der Dosismessung ergibt sich aus dem arithmetischen Mittelwert M_i von 10 Messungen mit Detektoren der Teilcharge (b) und dem Kalibrierfaktor der Teilcharge (b) zu

$$s = \frac{N_Y(b)}{9} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (M_i - M_i)^2} \quad (21)$$

Wird ein individueller Photonenkalibrierfaktor n_i für den Detektor (i) berücksichtigt, dann gilt

$$s = \frac{N_Y(b)}{9} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{10} (n_i M_i - M_i)^2} \quad (22)$$

Zur Ermittlung der empirischen Standardabweichung der Dosismessung als Funktion der Dosis werden für eine beliebige in der Routine eingesetzte Charge jeweils 10 Detektoren der bestrahlten Teilcharge (b) und der unbestrahlten Teilcharge (u) herangezogen (29-31).

Die Standardabweichung $s(u)$ der unbestrahlten Teilcharge (u) ist für ein Dosimetriesystem ein konstanter Wert und unabhängig von der Dosis. Die Standardabweichung s bestrahlter Detektoren wächst hingegen proportional mit steigender Dosis. Oberhalb einer Dosis von etwa $2000 \cdot s(u)$ ist die relative Standardabweichung $s' = s/H$ ebenfalls konstant. Die Teilcharge (b) wird deshalb mit der Referenzdosis H_{Yr} in diesem Dosisbereich bestrahlt. Hierbei ergibt sich

$$B = \frac{s(H_{Yr})}{H_{Yr}} \quad (23)$$

Bei Kenntnis von $s(u)$ und $s(b)$ läßt sich für eine beliebige Dosis H die empirische Standardabweichung für die entsprechende Charge ermitteln. Bei Subtraktion der Voranzeige setzt sich die Standardabweichung $s(H)$ der Äquivalentdosisanzeige H zusammen aus der Standardabweichung der Voranzeige $s(u)$ und der Standardabweichung bei Bestrahlung $s(b) = s'(b) \cdot H_{Yr} = B \cdot N_Y \cdot M_j$. Es gilt hierbei

$$s(H_j) = \sqrt{s_j^2(u) + B_j^2 \cdot N_j^2 \cdot M_j^2} \quad (24)$$

für die Dosisanzeige H_j von TLD700 und

$$s(H_k) = \sqrt{s_k^2(u) + B_k^2 \cdot N_k^2 \cdot M_k^2} \quad (25)$$

für die Dosisanzeige H_k von TLD600.

Die empirische Standardabweichung für die Neutronendosis H_n folgt aus der Meßwertdifferenz der Dosimeteranzeigen von TLD600 und TLD700 zu

$$s(H_n) = \sqrt{s^2(H_j) + s^2(H_k)} \quad (26)$$

Typische Werte für $s(n)$ und B von verschiedenen Chargen eines Alnor-Dosimetriesystems werden in Tab. 2 gezeigt.

4.5 Rechnerunterstützte Auswertung von TL-Dosimetern

Bei der Auswertung von Albedodosimetern in der Routineüberwachung ist es notwendig, Tischrechner einzusetzen. On-line-Tischrechner bieten neben einer einfachen zuverlässigen Bedienung des Auswertegerätes und einer vollständigen schnellen Meßwertprotokollierung vor allem die Möglichkeit einer aufwendigen Kalibrierung des Dosimetriesystems, welche u.a. die individuelle Korrektur von Voranzeige und Ansprechvermögen sowie die Bestimmung der Gesamtmeßunsicherheit der Dosismessung einschließt.

Zur Auswertung von TLD600/700-Detektoren in der Neutronendosimetrie wurde bei KfK ein rechnerunterstütztes Auswerteverfahren erstellt, welches den Gesamtablauf der TLD-Auswertung festlegt (32).

Dieses Programm wurde erweitert für die rechnerunterstützte Auswertung im automatischen Auswertegerät DOSACUS der Firma Alnor. Entsprechend den Anforderungen einer Meßstelle an die Datenverarbeitung wird folgendes Konzept verfolgt: Es ist ein „Verwaltungsrechner“ vorhanden, der auf einer Datenbank die personenbezogenen Daten enthält und die Meßwerte von den verschiedenen Dosimetriesystemen mit diesen Daten verknüpft und verwaltet. Dieser Rechner ist im Hinblick auf Programmiersprachen, Datenbanken und Speicherplätze auf die Verarbeitung großer Datenmengen abgestimmt.

Die On-line-Rechner an den verschiedenen Dosimetriesystemen arbeiten zweckmäßigerweise völlig unabhängig vom Verwaltungsrechner und sollten

während der Auswertung auch nicht von simultanen Datenübermittlungen (z.B. detektorspezifischen Daten) des Verwaltungsrechners abhängen. Bei diesen Rechnern liegt der Schwerpunkt auf dem schnellen Datentransfer und einer einfachen Interface-Technik mit dem Dosimetriesystem. Praxisnahe Programme dieser Rechner sind wider Erwarten aufwendig, weil sie einerseits eine einfache und zuverlässige Bedienung der Geräte ermöglichen, andererseits auftretende Fehler im Dosimetriesystem und bei der Bedienung rechtzeitig und leicht korrigierbar abfangen sowie außergewöhnliche Fälle wie Austausch zerbrochener Detektoren, Netzausfall während der Auswertung berücksichtigen sollen. Diese Programme wachsen aus den Erfahrungen der Benutzer und Betreiber des Dosimetriesystems.

Tab. 3 zeigt die Aufgabenverteilung zwischen dem Verwaltungsrechner (VR) und dem Dosimetriesystem-Rechner (DR). Dem DR stehen detektorspezifische Daten (z.B. individuelle Voranzeige, individuelles und chargenspezifisches Ansprechvermögen) für beispielsweise 30 000 Dosimeterkapseln auf einer Detektordiskette zur Verfügung. Unmittelbar nach dem Lesen der Kapselnummer im Auswertegerät werden die Daten für diese Kapsel eingelesen. Die für jeden Detektor der Kapsel notwendigen Auswerteparameter (Stickstofftemperatur, Integrationsbereiche der Glowkurve) werden vom DV am Auswertegerät eingestellt. Während der folgenden Auswertung der vier Detektoren werden die Glowkurven abgespeichert (1 000 pro Diskette) und die korrigierte Anzeige in Einheiten der Photonen-Äquivalentdosis für die vier Detektoren unter Verwendung des Kalibrierfaktors des Dosimetriesystems sowie der individuellen und chargenspezifischen Ansprechvermögen und Voranzeige berechnet. Diese Ergebnisse, zusammen mit den Auswertedaten, der Gerätenummer, der Detektorposition, der Kapselnummer und der Chargennummer, werden ebenfalls an den Anfang jeder Glowkurve abgespeichert. Dies bedeutet, daß alle mit der Auswertung, dem Auswertegerät und den Detektoren unmittelbar zusammenhängende Korrekturen im DR durchgeführt werden. Das Format dieser Daten ist für alle TL-Auswertegeräte (Dosimetriesysteme) der Meßstelle gleich.

Der VR liest nach Beendigung der Auswertung nur die aufbereiteten Daten vom Anfang der Glowkurve für jeden Detektor. Dem VR stehen jetzt neben detektorspezifischen auch personenbezogene Daten zur Berechnung der Äquivalentdosen zur Verfügung, nämlich

- der Überwachungszeitraum zur Berechnung und Subtraktion des Dosisanteiles durch natürliche Strahlung,
- der Anwendungsbereich N1 bis N4 zur Berechnung der Neutronen-Äquivalentdosis,

Tab. 3 Beispiel einer Anwendung von On-line-Rechner und Verwaltungsrechner in der Albedoneutronendosimetrie

ON-LINE-RECHNER AM AUSWERTEGERÄT ¹⁾	
Unterstützende Programme	TL-Meßprogramme
Check des Dosimetriesystems, Ändern der Auswerteparameter, Ermittlung des Gerätekalibrierfaktors, Ermittlung und Speicherung von indiv. Voranzeige, bzw. Photonenan- sprechvermögen Ermittlung des Gerätekalibrierfaktors, nachträgliche Auswertung über Glowkurve	Plausibilitätstest Kapselnummer, Automatisches Setzen der Auswerteparameter Start und Kontrolle der Messung Glowkurvendarstellung, Glowkurvenspeicherung, Glowkurvenauswertung, Linearitätskorrektur (Hochdosis), Subtraktion der Voranzeige, Korrektur Photonen-Ansprechvermögen Ausdruck der korrigierten Detektoranzeigen, Grenzwertalarm
Detektordisketten 30 000 Kapseldata/Diskette Chargen-Nr. für Detektor Indiv. Detektor-Ansprechvermögen Indiv. Voranzeige	Glowkurven-Disketten 1000 unkorrig. Glowkurven/Diskette Korrigierte Detektoranzeigen ²⁾ Datum Auswertung/Regeneration, Auswertegerät Nr. Glowkurve Nr.

„VERWALTUNGSRECHNER“ UND DATENBANK	
Datenbank	Dosiermittlung/-verwaltung
Kapselvorrat, Detektorvorrat, Personendaten, Anlage/Kunde, Anwendungsbereich, Kalibrierkurve mit a/i-Verhältnis Überwachungsperiode Chargen-Eigenschaften ⁴⁾ , Detektorvorgeschichte ⁵⁾	Zuordnung: Anlagen/Personen/Kapsel Abzug Dosisanteil natürl. Strahlung, Photonen-Äquivalentdosis, Neutronen-Äquivalentdosis ³⁾ , Teilkörperdosis (Hautdosis), Fehlerrechnung Dosisbilanzierung, Statistik, Kaufmännische Daten Versand/Eingang Dosimeter Überwachungsbogen-Ergebnismitteilung

- 1) Standardisiert für Alnor Dosacus, Harshaw 2000 und Vinten Toledo Auswertegerät
- 2) Korrektur mit indiv. Detektoransprechvermögen für Photonen, Voranzeige,
- 3) Berücksichtigt werden Auswertemethode (Peak 5,6), Anwendungsbereich, M(a)/M(i) Verhältnis, Neutronenansprechvermögen der Chargen
- 4) Neutronen-Photonenansprechvermögen, Voranzeigeschwankung, Reproduzierbarkeit
- 5) Akkumulierte Photonen- bzw. Neutronendosis, Regenerierungsdaten

- die Kalibrierkurven für das Neutronenansprechvermögen verschiedener Anlagen, aber auch
- das chargenspezifische Neutronenansprechvermögen, das zweckmäßigerweise nicht im DR berücksichtigt wird; er kann erst nach Differenzbildung der TLD 600/TLD 700 Meßwerte bei der Berechnung der Neutronen-äquivalentdosis korrigiert werden,
- die chargenspezifischen Daten zur Fehlerberechnung,
- die Ermittlung realistischer Meßunsicherheiten ist erforderlich, um eine untere Nachweisgrenze für die Neutronen-Äquivalentdosis in der Routinedosimetrie ableiten zu können. Auch Korrekturen über das Verhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ werden erst sinnvoll, wenn der Meßfehler für das Verhältnis einen vertretbaren Meßfehler des Korrekturfaktors erwarten läßt.

Nach Berechnung der Äquivalentdosen für die überwachte Person erfolgt die Abspeicherung der amtlich gerundeten Daten mit Meßfehler, die dann zur Dosisbilanzierung, Jahresstatistik und Ergebnismitteilung zur Verfügung stehen.

5. KALIBRIERVORSCHRIFT FÜR DAS DOSIMETRIESYSTEM INNERHALB DER ROUTINEÜBERWACHUNG

5.1 Feldkalibrierung von Albedodosimetern

Wegen der Energieabhängigkeit des Albedodetektors, insbesondere dessen Überempfindlichkeit gegenüber langsamen Neutronen, ist eine Freiluftkalibrierung mit Cf-252-Neutronen für die Anwendung in der Personendosimetrie nicht ausreichend. Gestreute Neutronen führen zu örtlichen Änderungen des Ansprechvermögens innerhalb eines Arbeitsplatzes, die sich nur durch Kalibrierbestrahlungen im interessierenden Streustrahlungsfeld ermitteln lassen. Auch die Berechnung des Ansprechvermögens unter Zugrundelegung typischer Neutronenspektren führt hier nicht zum Ziel, da der Anteil gestreuter Neutronen aus der Umgebung, insbesondere vom Boden und den Wänden und dessen räumliche Verteilung nicht hinreichend genau bekannt sind.

Ziel der Feldkalibrierung ist die Ermittlung des Neutronen-Kalibrierfaktors $N_n(i)$ bzw. des Neutronenansprechvermögens $R_n(i)$ für den Albedodetektor (i) am interessierenden Ort im Streustrahlungsfeld. $N_n(i)$ ist der Quotient aus der Meßwertanzeige des Albedodetektors und des Referenzwertes der Neutronen-Äquivalentdosis. Zur Bestimmung von $N_n(i)$ wird ein Referenzdosimeter sowie das Albedodosimeter auf einem Phantom möglichst gleichzeitig bestrahlt. Der Kalibrierfaktor wird zweckmäßigerweise auf denjenigen eines Cf-252-Referenzfeldes N_{nr} bezogen und als relativer Kalibrierfaktor n_N , d.h. als Vielfaches von N_{nr} angegeben.

Das seit über 15 Jahren in der Personendosimetrie angewandte Verfahren zur Feldkalibrierung von Albedodosimetern (13-16, 23, 27) wurde in den letzten Jahren soweit verbessert, daß man die für eine Personendosimetrie erforderlichen Kalibrierfaktoren hinreichend genau und reproduzierbar bestimmen kann (28).

Das standardisierte Verfahren zur Kalibrierung des Albedodosimeters im Streustrahlungsfeld (Feldkalibrierung) macht von folgenden Annahmen Gebrauch:

- Die Bestrahlung des Albedodosimeters erfolgt an der Oberfläche eines Phantoms in 85 cm über Boden.
- Als Phantom dient eine Polyäthylenkugel von 30 cm Durchmesser mit entsprechenden Abflachungen an der Kugeloberfläche zur Befestigung von Albedodosimetern.
- Referenzdosimeter für die Messung der Neutronen-Äquivalentdosis ist die Polyäthylenkugel von 30 cm Durchmesser mit neutronenempfindlichen TL-Detektoren (gleich denen des Albedodosimeters) im Zentrum.

- Das Referenzdosimeter wird in einem möglichst streustrahlungsarmen Kalibrierfeld, z.B. an einer Cf-252-Quelle unter Verwendung eines Schattenskegels kalibriert. Der Kalibrierfaktor des Referenzdosimeters N_o ergibt sich aus der Neutronen-Äquivalentdosis H_R und der Anzeige $M_n(c)$ des Detektors (c) im Zentrum der Kugel: $N_o = H_R/M_n(c)$.
- Die Ortsdosis H im Streustrahlungsfeld wird durch die mit dem Referenzdosimeter angezeigte Neutronen-Äquivalentdosis ersetzt: $H_R = N_o \cdot M_n(c)$.
- Die Neutronenanzeige des Albedodetektors $M_n(i)$ an der Phantomboberfläche wird auf die jeweilige Ortsdosis H bezogen.
- Der Neutronenkalibrierfaktor $N_n(i)$ des Albedodetektors (i) ist definitionsgemäß der Quotient der wahren Äquivalentdosis H (Ortsdosis) und der Albedodetektoranzeige $M_n(i)$. Mit $H = H_R$ gilt: $N_n(i) = H/M_n(i)$
Das Neutronenansprechvermögen ergibt sich zu $R_n(i) = 1/N_n(i)$
- Das Neutronenansprechvermögen des Albedodetektors (i) ist

$$R_n(i) = \frac{M_n(i)}{H_R} = \frac{M_n(i)}{N_o \cdot M_n(c)} \quad (27)$$

- Zur Bestimmung eines annähernd richtungsunabhängigen Albedoansprechvermögens für die Personendosimetrie werden die Meßwerte von 2 diametral auf der Kugeloberfläche bestrahlten Albedodetektoren addiert. Das Ansprechvermögen des "Albedodetektorsystems" $R_{ns}(i)$ ergibt sich zu

$$R_{ns}(i) = \frac{M_1(i) + M_2(i)}{H_R} \quad (28)$$

- Unter der Annahme, daß das Personendosimeter nur Strahlungsanteile aus dem vorderen Halbraum anzeigen soll, kann $R_{ns}(i)$ als annähernd richtungsunabhängiges Ansprechvermögen für das in der Personendosimetrie getragene Dosimeter angesehen werden (siehe Abschn. 5.4).

Genauere Angaben über die Durchführung von Kalibrierbestrahlungen, über die Energieabhängigkeit des Ansprechvermögens innerhalb der Personenüberwachung sowie Beispiele von Kalibrierbestrahlungen in den verschiedenen Anwendungsbereichen werden in einem getrennten Bericht ausführlich beschrieben (28).

5.2 Kalibrierfaktor für verschiedene Anwendungsbereiche

Aufgrund der Ergebnisse von Feldkalibrierungen können in der Personendosimetrie vier typische Anwendungsbereiche N1 bis N4 unterschieden werden. In jeweils einem Anwendungsbereich erwartet man eine Energie- und Richtungsabhängigkeit des Ansprechvermögens, die im allgemeinen einen Faktor 2 nicht überschreitet. Diese Meßunsicherheit wird insbesondere bei kleinen Personendosis-Meßwerten in der Routineüberwachung toleriert. Im allgemeinen kann für jeden Anwendungsbereich ein konstanter Kalibrierfaktor verwendet werden. Das Personendosimeter darf allerdings nur in einem Anwendungsbereich getragen werden.

Diese Kalibriervorschrift ist bei höheren Neutronendosen oder für Anwendungsbereiche mit großen örtlichen Änderungen des Neutronenspektrums bzw. einer hohen Streuung des Kalibrierfaktors (Anwendungsbereich N4) erweiterungsfähig. In diesen Fällen führen folgende Erweiterungen des Meß- und Kalibrierverfahrens zu einer genaueren Dosisbestimmung:

- Die Berücksichtigung des Meßwertverhältnisses $M_n(a)/M_n(i)$ der beiden im Albedodosimeter enthaltenen Neutronen-Detektoren zur Ermittlung eines expositionsbezogenen Kalibrierfaktors innerhalb der Personendosimetrie.
- Die zusätzliche Verwendung eines Kernspurätzdetektors zur getrennten Messung energiereicher Neutronen > 3 MeV.

Für beide Verfahren müssen Ergebnisse von Feldkalibrierungen vorliegen. Es hat sich gezeigt, daß für diese Streustrahlungsfelder typische allgemein anwendbare Kalibrierkurven abgeleitet werden können. Daher ist es nicht erforderlich, Feldkalibrierungen an allen Anlagen durchzuführen (siehe auch Abschn. 5.3, Abb. 4 und 5). Beim Auftreten höherer Neutronen-Äquivalentdosen, d.h. beim Überschreiten von Überprüfungsschwellen, ist eine nachträgliche Feldkalibrierung am Arbeitsplatz u.U. empfehlenswert, um die Meßunsicherheit der Personendosisbestimmung zu verringern.

Die in Tab. 4 gegebene Einteilung in die Anwendungsbereiche N1 bis N4 unterscheidet zwischen Neutronenstrahlungsfeldern hinter einer starken Abschirmung, hinter geringer Abschirmung beim Umgang mit spaltbarem Material, beim Umgang mit Neutronenquellen sowie Neutronen-Streustrahlungsfelder in der Umgebung von Teilchenbeschleunigern hoher Energie.

Tab. 4 Anwendungsbereiche des Albedodosimeters in Neutronenstreu-
strahlungsfeldern

- N1 REAKTOREN UND BESCHLEUNIGER (STARKE ABSCHIRMUNG)
1. Kernkraftwerke, z.B. In-Core-Bereiche, Dampferzeuger, Sumpf, Absetzbecken
 2. Forschungsreaktoren, z.B. an Bestrahlungskanälen, innerhalb/außerhalb der Abschirmung, in Experimentierhallen
 3. Betatron, Elektronen-Linearbeschleuniger mit Elektronenenergien > 8 MeV:
Anwendung u.U. in Therapie, Forschung, Technik, insbesondere bei Inbetriebnahme, Wartung, Reparatur,
 4. Teilchenbeschleuniger, Anwendung Therapie:
(d,T)-Generator, 14 MeV-Neutronen
Zyklotron (Protonen-/Deutronen-Kernreaktion) insbesondere am Zugang zum Bestrahlungsraum
- N2 BRENNSTOFFZYKLUS, KRITISCHE ANORDNUNGEN (GERINGE ABSCHIRMUNG)
1. Brennstoffzyklus einschließlich Wiederaufarbeitung
Urandioxid, Brennstoff-Pelletfertigung, Fertigung von Brennelementen, Ein- und Ausbau bzw. Transport von Brennelementen, Zwischenlagerung von Brennelementen bzw. spaltbarem Material, Brennelementlagerung/Pu-Lagerung, Dekontamination und Weiterverarbeitung spaltbaren Materials
 2. Versuchsreaktoren
Brennelementanordnung ohne/mit geringer Moderierung/Abschirmung, Experimentier- und Unterrichtsreaktoren, Arbeiten an kritischen Anordnungen, z.B. Uranyl-Lösung
 3. Kritikalitätsüberwachung:
Umgang mit größeren Mengen spaltbaren Materials, Umgang mit spaltbarem Material in wässriger Lösung, chemische Arbeiten mit größeren Mengen/Volumen spaltbaren Materials
- N3 RADIONUKLID-NEUTRONENQUELLEN (Am-Be, Pu-Be, Ra-Be, Cf-252)
- Transport und Lagerung der Quellen,
Labor-/Feldeinsatz in Forschung und Technik,
ohne/mit Moderierung durch Flüssigkeit, Abschirmung bzw. Boden.
- N4 BESCHLEUNIGER (FORSCHUNG)
1. Teilchenbeschleuniger, Anwendung in Forschung und Technik:
Zyklotron und 14 MeV-Generatoren, häufig wechselnde Targets/
Teilchenart, zugängliche Bestrahlungsräume bzw. Versuchsaufbauten ohne/mit geringer Abschirmung, wenig abgeschirmte Bereiche der Anlage
 2. Hochenergiebeschleuniger für Elektron > 50 MeV,
 3. Hochenergiebeschleuniger für Protonen, Deutronen, schwere Teilchen, z.B. C-12 bis Ar- 40 bis 400 MeV, Protonen-Synchrotron

Tab. 4 gibt Beispiele von typischen Arbeitsplätzen, an denen signifikante Strahlenexpositionen durch Neutronen auftreten können. Aufgrund dieser Unterscheidungsmerkmale soll der Betreiber im Einvernehmen mit der Aufsichtsbehörde und der Meßstelle abklären, welcher Anwendungsbereich vorliegt. Der jeweilige Anwendungsbereich ist im Überwachungsbogen personenbezogen anzugeben. Bei Arbeiten in zwei unterschiedlichen Anwendungsbereichen sind u.U. zwei Albedodosimeter für jeden Anwendungsbereich getrennt vorzusehen. Weitere Hinweise über die Anwendung in der Personendosimetrie gibt ein Merkblatt der amtlichen Meßstellen (siehe Anhang 2).

Tab. 5 gibt das relative Neutronen-Ansprechvermögen für das Alnor-System in den verschiedenen Anwendungsbereichen wieder. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 6 wiedergegebenen Ergebnisse von Kalibrierbestrahlungen sind diese Werte auch auf andere TLD-Systeme übertragbar. Die hier zugrunde gelegte Kalibriervorschrift für Albedodosimeter führt in der Personendosimetrie zu einer ausreichend konservativen Angabe der Neutronen-Äquivalentdosis:

- Die Art des empfohlenen Kalibrierverfahrens sowie die Wahl des Referenzdosimeters ergibt einen konservativen Kalibrierfaktor (siehe Abschn. 5.5).
- Für den entsprechenden Anwendungsbereich wurden mittlere bzw. Minimalwerte des Ansprechvermögens zugrundegelegt.
- Örtliche Änderungen des Ansprechvermögens können über das Meßwertverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ des jeweiligen Personendosimeters u.U. erkannt und berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 5.3).

5.3 Kalibrierfaktor unter Berücksichtigung des Meßwertverhältnisses $M_n(a)/M_n(i)$

In den Anwendungsbereichen N3 und N4 kann die Energieabhängigkeit des Albedodetektor-Ansprechvermögens $R_n(i)$ unter Zuhilfenahme des Detektors für thermische Neutronen (a) über das Meßwertverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ herabgesetzt werden. Hierzu sind Feldkalibrierungen unmittelbar im Streustrahlungsfeld erforderlich.

Feldkalibrierungen dienen dazu, an einer Anlage das relative Neutronenansprechvermögen des Albedodetektors $R_n(i)$ in Abhängigkeit vom Meßwertverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ zu bestimmen und für die Personendosimetrie eine entsprechende Kalibrierkurve bereitzustellen. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, eine 30 cm Polyäthylenkugel mit einem TL-Detektor (c) im Zentrum als

Tab. 5 Relatives durch Feldkalibrierung ermitteltes Neutronenansprechvermögen für die Anwendungsbereiche N1 bis N4

ANWENDUNGSBEREICH/ STREUSTRahlungsfeld	REL. NEUTRONENANSPRECHVERMÖGEN $R_n(i)/R_Y(i)$	
	ERWARTUNGS- BEREICH	KALIBRIER- WERT ³⁾
N1 REAKTOREN UND BESCHLEUNIGER, STARKE ABSCHIRMUNG, Kernkraftwerke Forschungsreaktoren Elektronen-Linearbeschleuniger Teilchenbeschleuniger in Therapie	2-5	3
N2 BRENNSTOFFZYKLUS, KRITISCHE ANORDNUNGEN, GERINGEABSCHIRMUNG Brennstoffzyklus Versuchsreaktoren ¹⁾ Kritikalitätsüberwachung Umgang mit spaltbarem Material	0,4-1,2 0,6-1,2	0,6 0,8
N3 RADIONUKLID-NEUTRONENQUELLEN Am-Be, Pu-Be, Ra-Be, Cf-252	0,2-0,6	0,3
N4 BESCHLEUNIGER (FORSCHUNG) ²⁾ Teilchenbeschleuniger ⁴⁾¹⁾ Hochenergiebeschleuniger für Elektronen, Hochenergiebeschleuniger für Protonen, Deuteronen, α -Teilchen und schwere Teilchen	0,2-0,5 ⁴⁾	$\geq 0,2$

- 1) Zusätzliche Feldkalibrierungen erforderlich, wenn Arbeits-/Aufenthaltsplätze ohne/bzw. mit geringer Abschirmung vorhanden sind
- 2) u.U. Kombination Albedodosimeter mit Kernspurdetektor erforderlich
- 3) für Routineauswertung empfohlenes Ansprechvermögen, wenn keine näheren Angaben vorliegen; Kalibrierfaktor ist der Kehrwert des relativen Neutronenansprechvermögens
- 4) in Bestrahlungsräumen hinter Abschirmungen Bereich 0,8-2

Referenzdosimeter zur Messung der Neutronen-Äquivalentdosis und gleichzeitig auch als Phantom für die Bestrahlung des Albedodosimeters zu verwenden. Hierbei wird zugestanden, daß auch dieses Referenzdosimeter die Neutronen-Äquivalentdosis H_n mit einer tolerierbaren und mit anderen Ortsdosimetern vergleichbaren Energieabhängigkeit anzeigt.

Abb. 3 gibt Ergebnisse von Feldkalibrierungen mit dem Alnor-System wieder, die in Neutronenstrahlungsfeldern der Anwendungsbereiche N1 bis N4 durchgeführt wurden. Die maximale Streuung des Ansprechvermögens an einer Anlage

kann mit einer entsprechenden Kalibrierkurve unter Berücksichtigung des Meßwertverhältnisses $M_n(a)/M_n(i)$ auf etwa 25 % verringert werden. Diese insbesondere auf die Energie- und Richtungsabhängigkeit der Dosisanzeige zurückzuführende Meßunsicherheit entspricht etwa derjenigen von Photondosimetern (siehe Anforderungen an die PTB-Bauartprüfung (33)). Die örtliche Änderung des Ansprechvermögens ist u.a. darauf zurückzuführen, daß unmittelbar im Strahlenkegel unabhängig von der jeweiligen Energieverteilung der Neutronenquelle die höchste Neutronenenergie und damit der kleinste Wert des Ansprechvermögens anzutreffen ist. In der näheren Umgebung des Strahlenkegels oder hinter Abschirmungen außerhalb des Bestrahlungsraumes werden erwartungsgemäß kleinere Neutronenenergien sowie ein größerer Anteil energiearmer bzw. thermischer Neutronen auftreten, die größere Werte des Neutronen-Ansprechvermögens ergeben. Dies zeigt die Änderung des Meßwertverhältnisses $M_n(a)/M_n(i)$ am Beispiel von Strahlungsfeldern an Beschleunigern in Abb. 4 und Abb. 5. Die Ergebnisse in den Abbildungen verdeutlichen insbesondere die Änderungen des Ansprechvermögens bzw. des Meßwertverhältnisses im Bereich des Strahlenkegels, im Nahbereich außerhalb des Strahlenkegels sowie im Streustrahlungsfeld hinter der Abschirmung.

5.4 Kombination mit Kernspurdetektor

Die zusätzliche Verwendung von Kernspurdetektoren in Kombination mit dem Albedodosimeter wird in besonderen Fällen für den Anwendungsbereich N4 empfohlen. An Hochenergiebeschleunigern, bei denen das öftern Targets gewechselt und dadurch die Energieverteilung des Neutronenstrahlungsfeldes verändert werden kann, ist es empfehlenswert, das TLD-System durch einen Polykarbonat-Kernspurdetektor zu ergänzen. Dieser Detektor kann in der Albedodosimeterkapsel hinter dem TL-Detektor untergebracht werden. Der Kernspurdetektor ermöglicht nach elektrochemischer Ätzung die annähernd energieunabhängige Messung der Neutronen-Äquivalentdosis im Energiebereich > 3 MeV (siehe Abschnitt 8.6 und 8.8). Die Neutronenanzeige des Albedodetektors $M_n(i)$ kann unter Verwendung des Meßwertverhältnisses $M_n(a)/M_n(i)$ korrigiert werden.

Der Meßwert des Kernspurdetektors liefert davon unabhängig einen Dosisbeitrag schneller Neutronen. Es ist jedoch auch möglich, das Meßwertverhältnis von Albedodetektor und Kernspurdetektor zur Korrektur des Albedo-Ansprechvermögens heranzuziehen oder eine Kombination von Albedodetektor mit verschiedenen Kernspürätzdetektoren zu verwenden (34-38).

Eine Auswertung des Kernspurdetektors empfiehlt sich allerdings erst dann, wenn der Albedodetektor (i) bzw. der zweite Neutronendetektor (a) zum Nachweis thermischer Neutronen aus der Umgebung eine Neutronenexposition anzeigt.

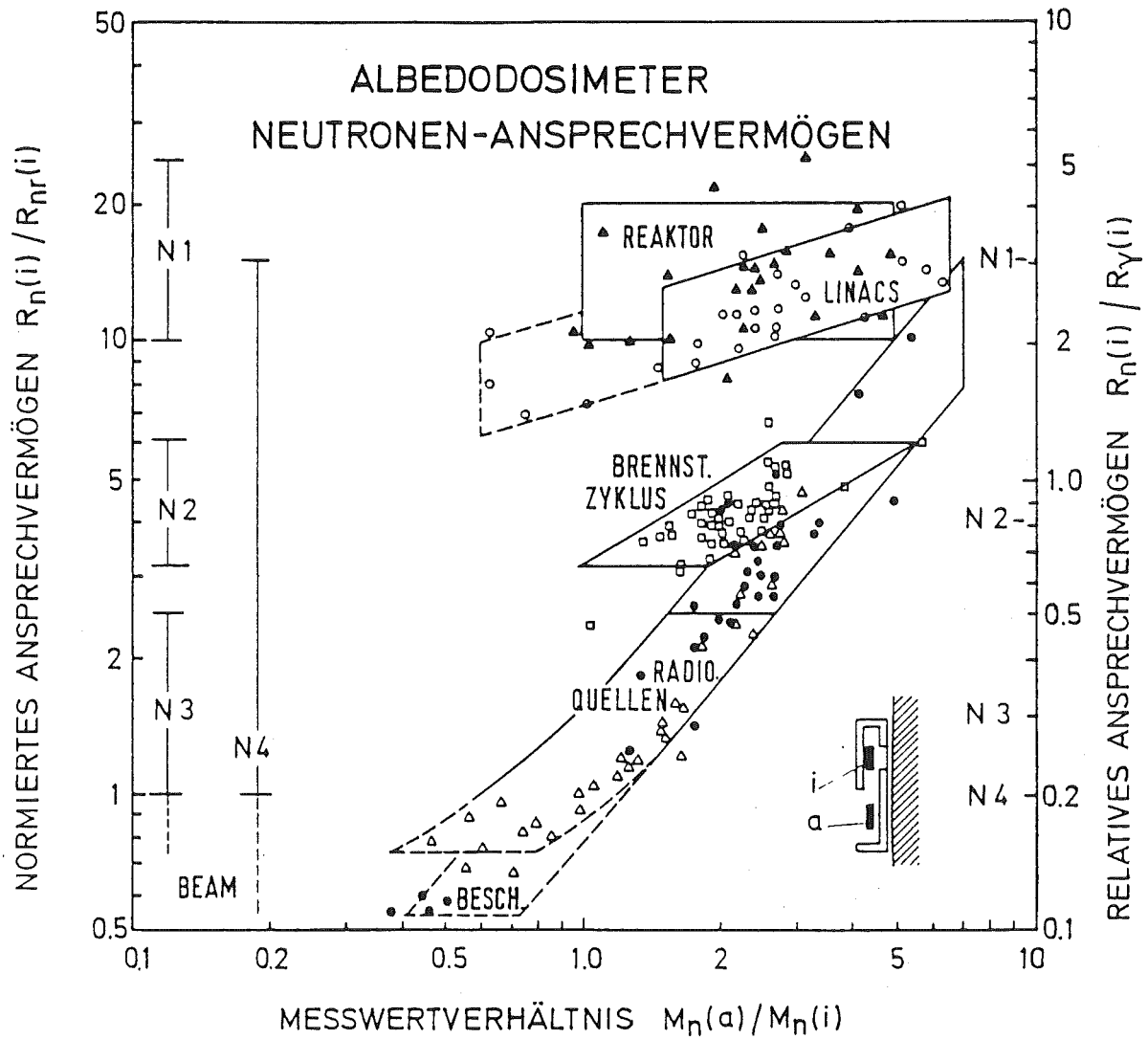


Abb. 3 Relatives Neutronenansprechvermögen des Albedoneutronendosimeters (System Alnor, 0,9 mm dicke Detektoren) und Einteilung in vier Anwendungsbereiche. Ergebnisse von Feldkalibrierungen in verschiedenen Neutronenstrahlungsfeldern (28)

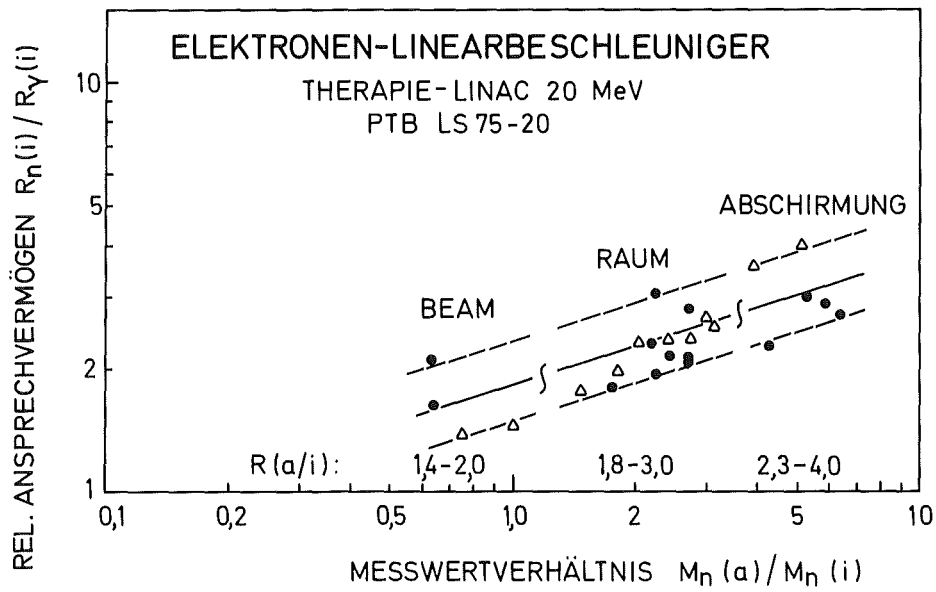


Abb. 4 Relatives Neutronenansprechvermögen des Albedodosimeters an Linearbeschleunigern bezogen auf das Alnor-System nach (28)

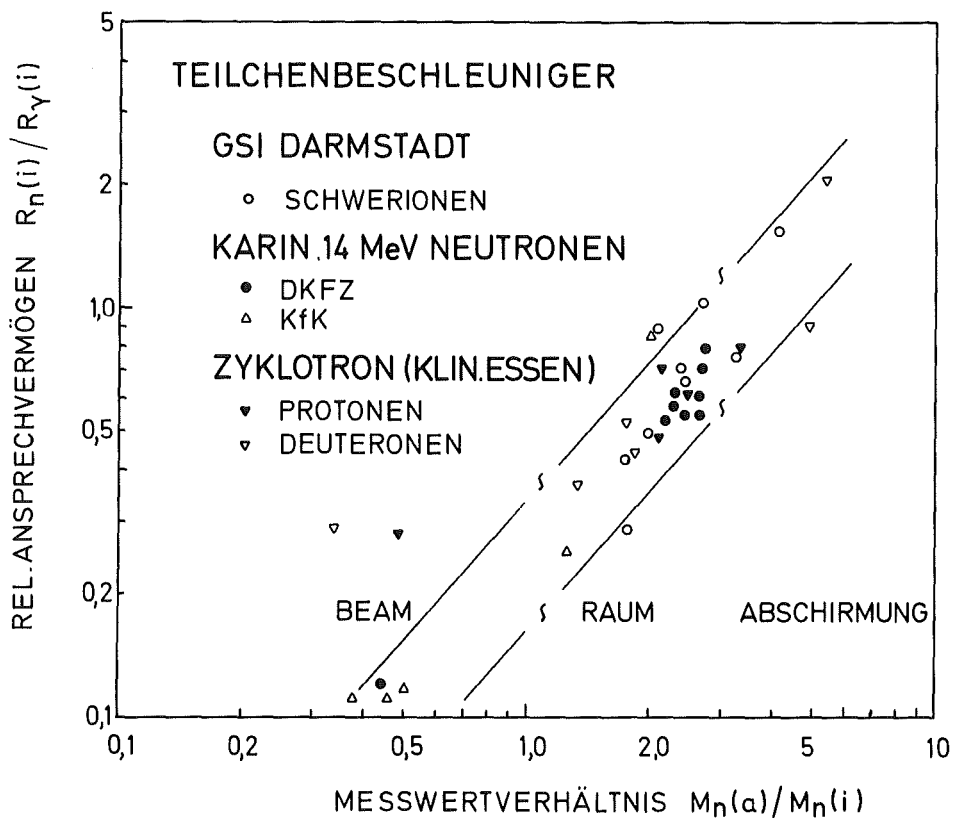


Abb. 5 Relatives Neutronenansprechvermögen des Albedodosimeters am Teilchenbeschleuniger bezogen auf das Alnor-System nach (28)

5.5 Interpretation der Dosimeteranzeige in der Personendosimetrie

Unter Zugrundelegung des in den Abschnitten 5.1 bis 5.4 beschriebenen Kalibrierverfahrens der Feldkalibrierung läßt sich für das Albedodosimeter ein Kalibrierfaktor ermitteln, der unmittelbar zur Auswertung von Personendosimetern verwendet wird. Der Kalibrierfaktor wird hierbei auf die mit dem Referenzdosimeter bestimmte Ortsdosis H_R bezogen.

Für Personen- und Ortsdosimeter müssen jedoch Meßgrößen¹⁾ mit unterschiedlicher Richtungsabhängigkeit berücksichtigt werden:

- Das Referenzdosimeter zur Bestimmung der Ortsdosis zeigt annähernd die richtungsunabhängige Meßgröße $H^*(10)$ an. $H^*(10)$ ist die Äquivalentdosis, die in dem entsprechenden ausgerichteten und aufgeweiteten²⁾ Strahlungsfeld in der Tiefe 10 mm in der ICRU-Kugel am Meßort erzeugt würde.
- Das Personendosimeter soll am Phantom die richtungsabhängige Meßgröße $H'(10)$ anzeigen. $H'(10)$ ist die Äquivalentdosis, die in dem entsprechenden aufgeweiteten³⁾ Strahlungsfeld in der Tiefe 10 mm in der ICRU-Kugel erzeugt würde.

Im Hinblick auf die in der Personendosimetrie anzuzeigende Meßgröße $H'(10)$ beschränkt sich die Aufgabe der Personenüberwachung auf das Tragen eines Personendosimeters, welches

- $H'(10)$ nur für Strahlungsanteile aus dem vorderen Halbraum annähernd richtungsunabhängig anzeigt und
- bei lateralem Strahleneinfall (90°) insbesondere für Neutronenenergien < 2 MeV wegen der Richtungsabhängigkeit von $H'(10)$ nicht mehr als 50 % der Bezugsanzeige bei 0° anzuzeigen braucht.

Diese Bedingungen werden mit dem Albedodosimeter erfüllt, da aus dem rückseitigen Halbraum nur bei hohen Neutronenenergien ein Beitrag zur Anzeige zu erwarten ist und bei lateralem Strahleneinfall mindestens 50 % der Bezugsanzeige unter 0° angezeigt wird.

- 1) Die Meßgrößen für Ortsdosis und Personendosis sind von ICRU neu definiert worden (39) und sollen bei der Neufassung der DIN-Normen (40) bzw. (41) berücksichtigt werden; siehe auch (42-44)
- 2) Ein ausgerichtetes und aufgeweitetes Strahlungsfeld ist ein Strahlungsfeld einheitlicher Richtung, das an allen Punkten der ICRU-Kugel die gleiche Teilchenflußdichte und die gleiche Energieverteilung der Teilchenflußdichte besitzt wie das tatsächliche Strahlungsfeld am Meßort
- 3) Ein aufgeweitetes Strahlungsfeld hat an allen Punkten der ICRU-Kugel die gleiche Energie- und Richtungsverteilung der Teilchenflußdichte wie das tatsächliche Strahlungsfeld am Meßort

Die Feldkalibrierung mit einem Referenzdosimeter zu annähernden Messung von $H^*(10)$ ergibt aus folgenden Gründen konservative Werte für das Ansprechvermögen von Albedodosimetern bezogen auf die "richtungsbezogene Meßgröße" $H'(10)$:

- Für den vorderen Halbraum ist das Verhältnis $H^*(10)/H'(10) \geq 1$ (1 für Frontaleinstrahlung). Bei lateralem Strahleneinfall und $E_n < 2\text{MeV}$ ist $H^*(10)/H'(10) > 2$.
- Die Feldkalibrierung mit einem Albedodosimeter unterschätzt daher das Ansprechvermögen $R_n(i) = M_n(i)/H_R$ bzw. überschätzt in der Personendosimetrie die Neutronenanzeige $H_n(i) = M_n(i)/R_n(i)$ für Einstrahlungen aus dem vorderen Halbraum.
- Die Energieabhängigkeit des Referenzdosimeters überbewertet die Meßgröße $H^*(10)$ im Neutronenenergiebereich unterhalb 100 keV. Dies führt zu einem konservativen Wert von $R_n(i)$.
- Für den Fall eines „isotropen Streustrahlungsfeldes“ würde das Referenzdosimeter Neutronen aus dem Gesamtraum, ein einzelnes Albedodosimeter am Phantom hingegen entsprechend den Bedingungen in der Personendosimetrie nur Neutronen aus dem Halbraum nachweisen. Dies gilt auch für den Sonderfall der lateralen Strahleneinfallrichtung, bei dem das Albedodosimeter im Gegensatz zum Referenzdosimeter nur etwa die Hälfte anzeigt. Eine Phantomkalibrierung würde hier zu einer Überbewertung des Kalibrierfaktors um den Faktor 2 führen.

Letztere Art der Überbewertung kann jedoch durch die hier zugrundegelegte Methode der Feldkalibrierung, nämlich die Addition der Anzeigen von zwei diametral am Phantom bestrahlten Dosimetern, vermieden werden. Feldkalibrierungen haben gezeigt, daß insbesondere die Verwendung des Meßwertverhältnisses $M_{ns}(a)/M_{ns}(i)$ - ermittelt durch Addition der Anzeigen gegenüberliegender Detektoren - ein realistischeres Neutronenansprechvermögen für Albedodosimeter ergibt (28). Die so an einer Anlage ermittelte Kalibrierkurve kann in der Personendosimetrie unter Verwendung des jeweiligen Meßwertverhältnisses $M_n(a)/M_n(i)$ zur Ermittlung der Neutronen-Äquivalentdosis herangezogen werden.

6. ERGEBNISSE VON KALIBRIER- UND FELDBESTRAHLUNGEN

Innerhalb des Vorhabens wurden mit den Teilnehmern zwei gemeinsame Kalibrierbestrahlungen bei der GSF, KfK und der PTB durchgeführt. Die Kalibrierungen sollten einen Vergleich des Neutronenansprechvermögens für die verschiedenen TLD-Systeme ermöglichen und Kalibrierfaktoren für die Routineüberwachung bereitstellen. Die Bestrahlungen der Albedoneutronendosimeter erfolgten 1984 jeweils an einem Zylinderphantom bei der PTB und GSF unter rückstreuungsfreien Bestrahlungsbedingungen sowie bei der KfK in 1,25 m Höhe über Boden in einem Streustrahlungsfeld. Im Jahre 1986 erfolgten die Bestrahlungen in Streustrahlungsfeldern unter Verwendung der als Referenzdosimeter und Phantom eingesetzten Polyäthylenkugeln von 30 cm Durchmesser.

6.1 Kalibrierbestrahlung 1984

Zu Beginn des Vorhabens wurden zunächst Kalibrierbestrahlungen mit der Prototyp-AlbedoKapselung an Zylinderphantomen (30cm \varnothing x 60 cm) durchgeführt. Die Bestrahlungen erfolgten

- bei der PTB mit thermischen Neutronen am Bestrahlungskanal des Reaktors FMRB mit einem Strahlenkegel von 5 cm Durchmesser,
- bei der GSF mit Cf-252-Neutronen, unmoderiert sowie H₂O und D₂O moderiert, mit einer Quellen-Phantomaufstellung in Raummitte, 4 m über Boden in 1,15 m Abstand Quellenmitte-Phantommitte,
- bei der KfK mit Cf-252-Neutronen in 1,25 m Höhe über Boden in Raummitte (10x10 m²) in 2,50 m Abstand Quellenmitte-Phantommitte.

Der von der PTB und GSF angegebene Referenzwert für die Neutronen-Äquivalentdosis ergab sich aus der Neutronenfluenz durch Multiplikation mit dem Neutronenfluenz-Äquivalentdosiskonversionsfaktor nach ICRP 21 (79). Für die Bestrahlungen bei KfK wurde als Referenzwert der Neutronen-Äquivalentdosis die jeweilige TLD-Anzeige im Zentrum einer 30 cm Polyäthylenkugel zugrunde gelegt. Das Referenzdosimeter war vorher im Strahlenfeld einer Cf-252-Neutronenquelle unter Berücksichtigung des Rückstreuanteiles (Schattenkegel-Technik) kalibriert worden. Der Rückstreuanteil erhöhte die Neutronen-Äquivalentdosis aus Quellangaben um etwa 20 % in 2,50m Abstand.

Die Ergebnisse dieser Bestrahlungen sind in Tab. 6 wiedergegeben. Die gefundenen Unterschiede im relativen Neutronenansprechvermögen $R_n(i)/R_Y(i)$ zwischen den verschiedenen TLD-Systemen können im wesentlichen auf Unterschiede in der TL-Auswertetechnik sowie auf unterschiedliche Größe der Albedofenster zurückgeführt werden.

Im Vergleich zum Alnor-System zeigten die Ergebnisse für das Harshaw- und Panasonic-System zunächst kleinere Werte. Aufgrund der Kalibrierergebnisse wurden die Albedoneutronenfenster des Harshaw- und Panasonic-Dosimeters vergrößert, um ein annähernd gleiches Neutronenansprechvermögen für die verschiedenen TLD-Systeme zu erzielen. Hierzu dienten nachträgliche Kalibrierbestrahlungen mit unterschiedlich großen Albedofenstern (Tab. 7). Mit TLD600 erhöht sich das Neutronenansprechvermögen bei Messung von TL-Peak 5 und 6

Tab. 6 Ergebnisse der Kalibrierbestrahlungen 1984 der Albedodosimetrie-systeme (45)

MEBSTELLE/ TLD-SYSTEM	REL. NEUTRONENANSPRECHVERMÖGEN $R_n(i)/R_Y(i)$				
	n_{th}	252Cf Freiluft	252Cf Streufeld	252Cf + H ₂ O	252Cf + D ₂ O
KfK ALNOR ¹⁾ LiF 0,9 mm	4,61	0,21	0,28	1,01	1,97
GSF ALNOR ³⁾ LiF 0,9 mm	4,55	0,175	0,248	0,756	1,71
MPA HARSHAW ²⁾ LiF 0,9 mm	6,87	0,176	0,24	0,64	1,69
GSF PANASONIC ⁴⁾ Li ₂ B ₄ O ₇	5,90	0,14	0,17	0,77	1,57

- 1) Auswertung mit automatischem Auswertegerät DOSACUS der Fa. Alnor
- 2) Korrektur Anzeige (Fenster 6 mm \varnothing) \times 1,26 = Anzeige (Fenster 8 mm \varnothing)
- 3) Alnokapsel, Auswertung im Harshaw-Auswertegerät 2000 A + B
- 4) Korrektur Fenstergröße: Anzeige (kleine runde Fenster) \times 1,85 = erwartete Anzeige (großes ovales Fenster)

Tab. 7 KfK-Meßergebnisse mit der Albedodosimeterkapselung System Harshaw zur Optimierung der Fenstergröße

Fenster- durchmesser	Strahlen- einfall	REL. NEUTRONENANSPRECHVERMÖGEN ¹⁾ $R_n(i)/R_Y(i)$	
		Peak 5	Peak 6
Harshaw ²⁾ (\varnothing 6 mm)	Front	0,16	0,22
	Seite	0,08	0,09
	Rückseite	0,03	0,04
Harshaw (\varnothing 8 mm)	Front	0,2	0,28
	Seite	0,09	0,12
	Rückseite	0,04	0,06

- 1) Phantombestrahlung bei KfK mit Cf-252-Neutronen
- 2) erste Ausführung des „Albedoneutronenfensters“

um einen Faktor 1,6. Bei der Ergebnisdarstellung in Tab. 6 wurde die zwischenzeitliche Änderung der Albedo-Neutronenfenster sowie Änderungen des Meßverfahrens berücksichtigt. Die Angaben beziehen sich damit auf die z.Zt. eingesetzten Albedodosimeterkapselungen und sind mit denjenigen der Kalibrierbestrahlung 1986 vergleichbar.

Die Kalibrierbestrahlung 1984 führte zu folgendem Ergebnis:

- die verschiedenen TLD-Systeme zeigen nach Optimierung des Albedo-fensters untereinander ein vergleichbares Neutronenansprechvermögen,
- das Ansprechvermögen für thermische Neutronen ist beim Panasonic-System wegen des dünnen Detektors offensichtlich höher im Vergleich zu anderen TLD-Systemen,
- bei LiF-Detektoren erhöht sich das Neutronenansprechvermögen bei Auswertung von TL-Peak 5 und 6 gegenüber einer Auswertung von TL-Peak 5.

6.2 Kalibrierbestrahlung 1986

Zum Abschluß des Vorhabens wurden die verschiedenen Albedodosimetrie-systeme nochmals gemeinsam einer Kalibrierbestrahlung unterzogen. Wegen Umbau des PTB-Reaktors mußte bedauerlicherweise auf eine Bestrahlung mit thermischen Neutronen verzichtet werden. Im Vordergrund dieses Vergleiches stand die Ermittlung des Ansprechvermögens in Strahlungsfeldern mit einem erheblichen Anteil an Streustrahlung. Die Bestrahlungen erfolgten am Kugelphantom (Polyäthylenkugel von 30 cm Durchmesser):

- Bei KfK mit Cf-252-Neutronen in 1,25 m Höhe über Boden und 2,50 m Abstand Quellenmitte-Phantommitte,
- im Eidgenössischen Institut für Reaktorforschung (EIR), Würenlingen, am Bestrahlungskanal des Forschungsreaktors Saphir mit und ohne Kadmiumabschirmung zur annähernden Bestimmung eines Ansprechvermögens für langsame Neutronen,
- im Leichtwasserreaktor (LWR), Mülheim-Kärlich, im Zugang zum Reaktorsumpf in einem quasi-isotropen Strahlungsfeld des Leistungsreaktors (46),
- im Brennelementlager, Hanau, an 18 verschiedenen Meßorten in einem Raum der Größe 17 m x 22m als Beispiel für eine typische Feldkalibrierung mit gleichzeitiger Bestrahlung der Dosimeter an einer Anlage.

In den Strahlungsfeldern erfolgte die Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis mit dem Referenzdosimeter. Hierbei wurden TL-Detektoren des jeweiligen TLD-Systems in der 30 cm Polyäthylenkugel eingesetzt. Die Kalibrierung der

Referenzdosimeter aller TLD-Systeme erfolgte aus Gründen der Vergleichbarkeit im Cf-252-Strahlungsfeld bei KfK. Der Streustrahlungsanteil wurde hierbei mit einer zweiten Bestrahlung unter Verwendung eines Schattenkegels korrigiert.

Die Ergebnisse der Feldbestrahlungen sind in Tab. 8 für die TLD-Systeme der Firmen Alnor, Harshaw, Panasonic und Vinten wiedergegeben. Zum Vergleich werden in Spalte 2 die Kalibrierwerte 1984 für eine Cf-252-Bestrahlung frei in Luft wiedergegeben. Das Alnorsystem wurde mit TLD-Detektoren unterschiedlicher Dicke von 0,4 mm und 0,9 mm bestrahlt. Die dünneren Detektoren ergeben ein um den Faktor 1,46 höheres Neutronenansprechvermögen und lassen eine bessere Gammadiskriminierung erwarten. Neu hinzugekommen war das Vinten-System mit einem 0,4 mm dicken LiF-Teflon-Detektor.

Zum Vergleich der verschiedenen TLD-Systeme werden die Meßergebnisse im folgenden in unterschiedlicher Weise dargestellt. Tab. 9 zeigt für die verschiedenen TLD-Systeme das relative Neutronenansprechvermögen $R_N(i)/R_\gamma(i)$, Tab. 10 das auf die Alnorkapselung mit dem 0,9 mm dicken Detektor bezogene relative Neutronenansprechvermögen $R_N(i)/R_N(i)$ (Alnor) und Tab. 11 das relative Neutronenansprechvermögen $R_N(i)/R_N(i)$ (Cf-252) bezogen auf eine Cf-252-Bestrahlung im Streustrahlungsfeld.

Tab. 10 zeigt im Vergleich zum Alnorsystem mit 0,9 mm dicken Detektoren, daß das relative Albedoansprechvermögen $R_N(i)/R_\gamma(i)$, d.h. der Quotient des Neutronen- und Gamma-Ansprechvermögens, für das Harshaw- und Panasonic-System im Mittel um den Faktor 0,8 kleiner, der des Vintensystems um den Faktor 1.14 höher ist. Das Neutronenansprechvermögen der verschiedenen Albedodosimeter hängt von der Detektordicke, der Auswertetechnik, der Größe des Albedofensters und der Lage des Detektors innerhalb der Kapsel ab. Wird jedoch das relative Neutronenansprechvermögen der verschiedenen Dosimetriesysteme auf das jeweilige Ansprechvermögen für Cf-252 bezogen (Tab. 11), dann ist das Neutronen-Ansprechvermögen für die verschiedenen Dosimetriesysteme innerhalb 13 % gleich. Deshalb wird im Abschnitt 4.2.6 vorgeschlagen, das relative Neutronenansprechvermögen nicht auf das Photonenansprechvermögen, sondern auf ein definiertes Neutronenstreustrahlungsfeld zu beziehen.

In der Tab. 9 und Tab. 10 aufgenommen wurden zusätzlich die mit der Schatten-Kugeltechnik (47) ermittelten Ergebnisse des zum Kalibriervergleich herangezogenen Neutronenreferenzdosimeters für die Bestrahlungen im Cf-252-Streustrahlungsfeld. Diese Ergebnisse zeigen das unterschiedliche Neutronenansprechvermögen der TL-Detektoren im Zentrum der 30 cm Polyäthylenkugel für den hier vorliegenden gerichteten Strahleneinfall von einer Cf-252-Punktquelle. Im Vergleich zum Alnorsystem mit 0,9 mm dicken Detektoren führen die

dünnere TL-Detektoren zu einem um den Faktor 1,7 - 1,9 höheren Ansprechvermögen.

Die Richtungsabhängigkeit des Neutronen-Ansprechvermögens ist in Tab. 12 für lateralen Strahleneinfall unter 180° für die Streustrahlungsfelder an der Cf-252-Quelle und am Leistungsreaktor wiedergegeben. Im realistischen Strahlenfeld des Leistungsreaktors zeigt das Verhältnis des Neutronenansprechvermögens für

Tab. 8 Ergebnisse von Feldbestrahlungen 1986 der Albedodosimetrie-systeme (48)

MEBSTELLE/ TLD-SYSTEM	REL. NEUTRONENANSPRECHVERMÖGEN $R_n(i)/R_Y(i)$			
	252Cf Freiluft 1984	252Cf Streufeld	SAPHIR ¹⁾	LWR ²⁾
KfK ALNOR LiF 0,4 mm	-	0,39	1,3	4,4
KfK ALNOR LiF 0,9 mm	0,21	0,24	0,96	3,18
MPA HARSHAW LiF 0,9 mm	0,176	0,19	0,74	2,81
GSF PANASONIC Li ₂ B ₄ O ₇	0,14	0,17	0,73	2,53
KfK VINTEN LiF/T 0,4 mm	-	0,29	1,03	4,14

¹⁾ Bestrahlungskanal des Forschungsreaktors Saphir, EIR Würenlingen

²⁾ im Anlagenbereich des Kernkraftwerkes Mühlheim-Kärlich

Tab. 9 Relatives Ansprechvermögen $R_n(i)/R_Y(i)$ der Albedoneutronen-dosimeter (48)

	ALNOR (KfK)		HARSHAW (MPA)	PANASONIC (GSF)	VINTEN (KfK)
	0,4 mm	0,9 mm			
<u>Albedo Detektor (i)</u> Cf-252, Streustrahlung Reaktor SAPHIR	0,39	0,24	0,19	0,17	0,29
Strahl	1,3	0,96	0,74	0,73	1,03
n _{th} -Anteil	5,7	3,86	3,0	3,71	3,64
Leistungsreaktor ¹⁾	4,4	3,18	2,81	2,53	4,14
<u>30 cm Kugel, Detektor (c)</u> Cf-252, Freiluft (KfK, Schattenkegel)	2,21	1,16	1,57	2,08	1,97

¹⁾ Bestimmung von H_n aus 30 cm Kugel

Tab. 10 Relatives auf das Alnor-System bezogenes Neutronenansprechvermögen $R_n(i)/R_n(i)$ (Alnor) der Albedoneutronendosimeter (48)

	ALNOR (KfK)		HARSHAW (MPA)	PANASONIC (GSF)	VINTEN (KfK)
	0,4 mm	0,9 mm			
<u>Albedodetektor (i)</u>					
Cf-252, Streustrahlung ³⁾ Reaktor SAPHIR Strahl	1,62	1 (0,24)	0,79	0,71	1,21
n _{th} -Anteil ²⁾	1,35	1 (0,96)	0,77	0,76	1,07
Leistungsreaktor ¹⁾	1,48	1 (3,86)	0,78	0,962)	0,942)
Mittelwert ± max. Streuung	1,38	1 (3,18)	0,88	0,80	1,30
	1,46	1	0,825	0,81	1,14
	± 10%	± 10%	± 7%	± 15 %	± 15%
<u>30 cm Kugel, Detektor (c)</u>					
Cf-252, Freiluft (KfK, Schattenkegel)	1,91	1	1,35	1,80	1,69

- 1) Bestimmung von H_n aus 30cm Kugel
- 2) Bestrahlung von $H_n = 0,14$ mSv führte zu einer rel. hohen Meßunsicherheit
Meßwertdifferenz ohne/mit Kadmium: (0,7-0,2) mSv ± 10%
- 3) KfK-Bestrahlung im Abstand von 2,5 m, 1,25 m über Boden

lateralen und frontalen Strahleneinfall für die verschiedenen Dosimetertypen einen Wert von $0,54 \pm 4 \%$, dessen Streuung innerhalb der experimentellen Meßunsicherheit liegt. Bedingt durch den isotropen Streustrahlungsanteil aus der Umgebung wird bei 180° noch etwa 30 % des Ansprechvermögens unter Frontaleinstrahlung gemessen.

Die Ergebnisse der Feldkalibrierung 1986 zeigen zusammenfassend:

- In der 30 cm Kugel zeigen dünne Detektoren der verschiedenen TLD-Systeme ein um den Faktor 1,7 bis 1,9 höheres Neutronenansprechvermögen,
- Im gleichen Streustrahlungsfeld zeigen die verschiedenen TLD-Systeme ein vergleichbares relatives Neutronenansprechvermögen $R_n(i)/R_y(i)$.

Tab. 11 Relatives auf Cf-252-Neutronen bezogenes Neutronenansprechvermögen $R_n(i)/R_n(i)$ (Cf252) der Albedoneutronendosimeter (48)

REL. NEUTRONENANSPRECHVERMÖGEN $R_n(i)/R_n(i)$ (Cf-252)						
	ALNOR (KFK)		HARSHAW (MPA)	PANASONIC (GSF)	VINTEN (KFK)	R ± ΔR
	0,4 mm	0,9 mm				
Cf-252-Streustrahlung	1	1	1	1	1	-
Reaktor SAPHIR Beam	3,34	4,0	3,94	4,3	3,55	3,83 ± 12%
n_{th} -Anteil	14,6	16,1 (16,5) ¹⁾	15,8	21,8 (25,2) ²⁾	12,5	14,73 ± 13%
Leistungsreaktor ⁴⁾	11,3	13,3	14,8	14,9	14,3	14,0 ± 13%
BE-Lager ⁴⁾		3,2 ± 18 %	4,25 ± 21 %	3,1 ± 21 %		3,52 ± 15 %

- 1) PTB-Kalibrierung mit n_{th} (1984)
- 2) PTB-Kalibrierung mit n_{th} , Auswertung Wellhöfer;
- 3) ohne Panasonic System; R_{th} ist hier Faktor 1,5 höher
- 4) Bestimmung von H_n mit 30 cm Kugel

Tab. 12 Richtungsabhängigkeit des Albedo-Neutronenansprechvermögens im Streustrahlungsfeld einer Cf-252-Neutronenquelle sowie eines Kernreaktors in 1,25 m über Boden (48)

Streustrahlungsfeld/ TL-Dosimetertyp	MESSWERTVERHÄLTNIS		
	$\frac{M_n(i, 90^\circ)^1)}{M_n(i, 0^\circ)}$	$\frac{M_n(i, 180^\circ)}{M_n(i, 0^\circ)}$	$\frac{2M_n(i, 90^\circ)}{M_n(i, 0^\circ) + M_n(i, 180^\circ)}$
<u>Cf-252</u>			
Alnor	0,62	0,25	0,99
Harshaw	0,63	0,34	0,95
Panasonic	0,59	0,24	0,95
Vinten	0,55	0,27	0,87
Mittelwert ±	0,60 ± 6%	0,27 ± 16%	0,94 ± 5%
<u>LWR</u>			
Alnor	0,56	0,32	0,84
Harshaw	0,52	0,28	0,81
Panasonic	0,53	0,31	0,81
Vinten	0,54	0,29	0,84
Mittelwert ±	0,54 ± 4%	0,30 ± 7%	0,82 ± 2% ²⁾

- 1) $H'(10, 90^\circ)/H'(10, 0^\circ) \leq 0,5$ für Neutronen unter 2 MeV
- 2) Geringer Streustrahlungsanteil vom Boden (Gitterrost)

- Bezogen auf das Cf-252-Streustrahlungsfeld zeigen die von den amtlichen Meßstellen verwendeten Systeme Alnor, Harshaw, Panasonic eine Streuung des relativen Neutronenansprechvermögens innerhalb $\pm 13\%$ am Bestrahlungskanal des Forschungsreaktors Saphir, im Bestrahlungsfeld des Leistungsreaktors sowie eines Brennelement-Lagers.
- Die Ergebnisse der Feldkalibrierung im Anwendungsbereich „Brennstoff-Kreislauf“ (BE-Lager) zeigen für die verschiedenen TLD-Systeme eine Streuung des örtlichen Neutronenansprechvermögens von maximal $\pm 21\%$.

6.3 Kalibrierbestrahlung am HPRR in Oak Ridge

Zwei Meßstellen nahmen an den jährlichen Vergleichsmessungen von Personendosimetern am Health Physics Research Reactor (HPRR) im ORNL Oak Ridge in den Jahren 1984 - 1986 teil. Die Kalibrierbestrahlungen erfolgten in 3 m Abstand des Reaktors, der ohne Abschirmung sowie mit Stahl-, Beton- und Plexiglasabschirmungen betrieben wird. Die Dosimeter werden im jeweiligen Streustrahlungsfeld unter Berücksichtigung des Streustrahlungsanteiles aus der Abschirmung bzw. Umgebung kalibriert. Die Bestrahlungen erfolgen an der Oberfläche eines $40 \times 40 \times 15 \text{ cm}^3$ großen Plexiglasphantoms bzw. an der Polyäthylenkugel von 30 cm Durchmesser (47-51).

Die Referenzwerte für die Neutronen-Äquivalentdosis ergeben sich aus Meßergebnissen der Bonner-Kugeltechnik und aus DOT-Berechnungen. Die Referenzwerte für die Photonen-Äquivalentdosis basieren auf den Meßergebnissen eines Geiger-Müller-Detektors an der Oberfläche des Phantoms.

In den Abb. 6 bis 8 ist der Quotient von Meßwert und Referenzwert in Abhängigkeit von der Neutronen-Äquivalentdosis bzw. Photonen-Äquivalentdosis wiedergegeben. Die Hüllkurven kennzeichnen die untere und obere Grenze der zulässigen Meßunsicherheit, die für Vergleichsmessungen von den nach Länderrecht zuständigen Meßstellen ausgegebenen Personendosimetern nach (52) vorgegeben sind.

Die Meßergebnisse des Albedodosimeters wurden ohne Kenntnis des Neutronenspektrums unter Berücksichtigung einer vorhergegangenen Feldkalibrierung und des Meßwertverhältnisses $M(a)/M(i)$ ausgewertet.

Tab. 13 Euratom-Vergleichsprogramm 1982, Meßergebnisse des KfK-Albedodosimeters, Auswertung bei Kenntnis des Strahlenfeldes (53)

Neutronenfeld		Neutronendosis (mSv)		Verhältnis ¹⁾
		Meßwert	Referenzwert	
ORNL Reaktor ohne Abschirmung		0,49	0,62	0,79
		11,7	11,13	1,05
		0,65	0,64	1,01
ORNL Reaktor mit 13 cm Stahl		10,9	10,99	0,99
		0,52	0,48	1,08
ORNL Reaktor mit 20 cm Beton		10,7	9,43	1,13
		0,53	0,59	0,90
ORNL Reaktor mit 12 cm Plexiglas		11,1	10,96	1,07
GSF	1,2 MeV	6,8	6,0	1,13
	1,2 MeV	1,74	1,5	1,16
	5,3 MeV	9,73	7,49	1,3
PTB	5,3 MeV	1,10	0,60	(1,85) ²⁾
	0,57 MeV	0,61	0,64	0,95
	0,57 MeV	10,3	10,61	1,02
	15,0 MeV	15,4	13,13	1,17
	15,0 MeV	0,44	0,56	0,78
GSF	252Cf + 15 cm D ₂ O	11,2	10,91	1,03
		1,13	1,2	0,94
Mittelwert und 1-s Standardabweichung			1,03 ± 13 %	

1) Verhältnis Meßwert/Referenzwert

2) bei Mittelwertbildung nicht berücksichtigt, da Meßwertanteil durch Gammastrahlung 6mal höher

Zwischen Rechteckphantom und Kugelphantom ergaben sich nur geringe Unterschiede in der Neutronen-Äquivalentdosisanzeige von weniger als 10 %, wie dies die Meßergebnisse mit gleicher Dosis in Abb. 7 zeigen.

Frühere Ergebnisse des Euratom-Neutronenvergleichsprogrammes 1982 mit Bestrahlungen beim ORNL sowie bei der PTB und GSF zeigten, daß Albedodosimeter bei Kenntnis des Neutronenstrahlungsfeldes eine ausreichend genaue Neutronendosisbestimmung ermöglichen (siehe Tab. 13).

6.4 Photonen-Kalibrierbestrahlungen

KfK nahm an den jährlichen PTB-Vergleichsmessungen von Personendosimetern teil. Die Ergebnisse für das Albedodosimetersystem Alnor sind in Abb. 9 in Abhängigkeit vom Referenzwert der Photonen-Äquivalentdosis wiedergegeben. Entsprechende Ergebnisse der ORNL-Vergleichsmessung zeigt Abb. 8.

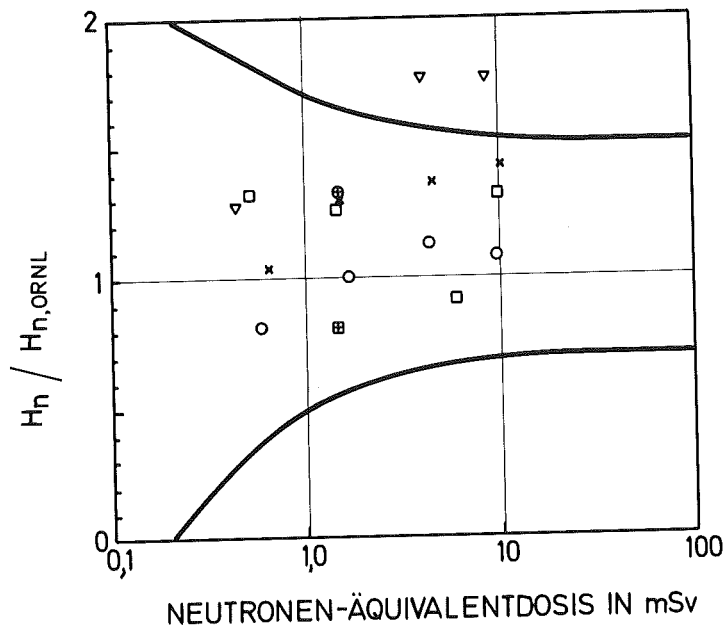


Abb. 6 Ergebnisse der ORNL-Neutronenkalibrierbestrahlungen 1984-1986 für das Albedodosimeter System Harshaw (MPA Dortmund) (54) Abschirmung: O keine, X Stahl, □ Plexiglas, ▽ Beton, ⊕ Stahl/Beton/Plexiglas, ⊗ Plexiglas + Cs-137

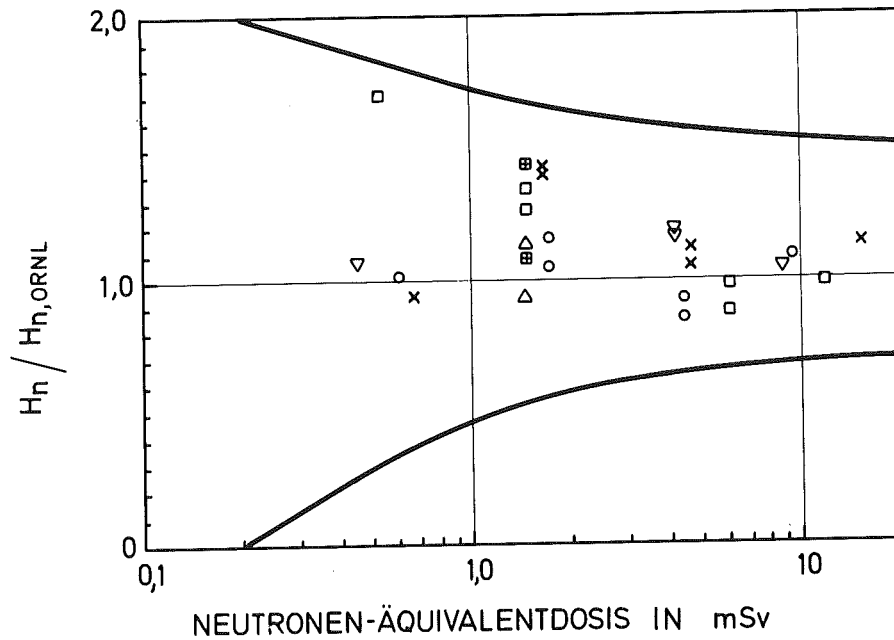


Abb. 7 Ergebnisse der ORNL-Neutronenkalibrierbestrahlungen 1984-1986 für das Albedodosimeter System Alnor (KfK Karlsruhe) (Erklärung siehe Abb. 6)

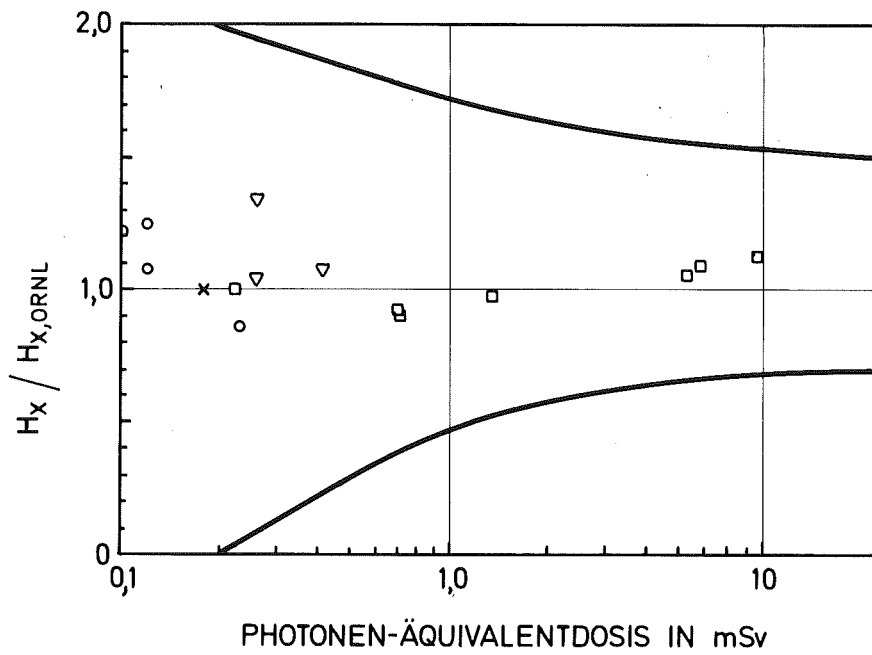


Abb. 8 Ergebnisse des ORNL-Vergleiches 1984-1986 der Photonen-Äquivalentdosis für das Albedodosimeter System Alnor (KfK Karlsruhe)

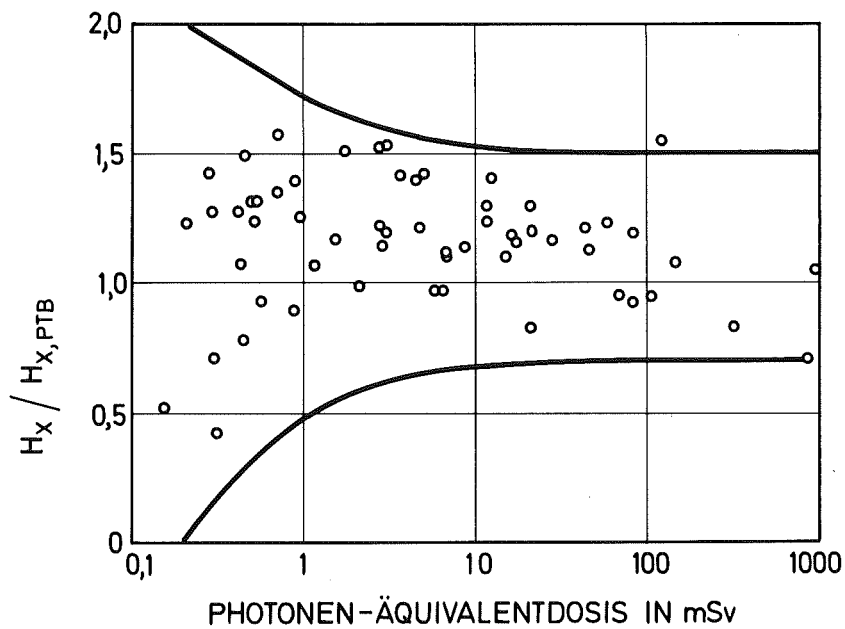


Abb. 9 Ergebnisse der PTB-Vergleichsbestrahlungen 1984 bis 1986 für Photondosimeter, Albedodosimeter System Alnor (KfK Karlsruhe) (55)

7. ERPROBUNG INNERHALB DER PERSONENÜBERWACHUNG

7.1 Erprobung durch KfK (Alnor-System)

Die erstmalige Einführung des Karlsruher Albedodosimeters in der Routineüberwachung brachte insbesondere an Bestrahlungskanälen des Forschungsreaktors FR2 überraschend hohe Neutronenexpositionen, die mit dem NTA-Film nicht nachgewiesen werden konnten. Abb. 10 zeigt die Ergebnisse der monatlichen Personenüberwachung. Das entsprechende Meßwertverhältnis H_N/H_Y lag zwischen 0,26 und 5.

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wird seit 1982 zur Personenüberwachung in Neutronenstrahlungsfeldern anstelle des Neutronenfilmdosimeters das universelle Albedoneutronendosimeter, System Alnor, eingesetzt. Hinzu kam innerhalb des Forschungsvorhabens die Ausgabe von Albedodosimetern an sieben auswärtige Stellen zur Personenüberwachung im Brennelement-Kreislauf, an Beschleunigern, an einem Reaktor und beim Umgang mit Spaltneutronenquellen.

In Tab. 14 werden die Ergebnisse der Routineüberwachung für die Jahre 1982 - 1986 wiedergegeben. Innerhalb der Eigenüberwachung wurden Personendosen durch Neutronen insbesondere beim Umgang mit Cf- und Pu-Quellen höherer Aktivität sowie am Zyklotron festgestellt. Innerhalb der monatlichen Auswertung lagen die Maximaldosen zwischen 0,9 mSv und 20,6 mSv. Beim Umgang mit einer Cf-252-Quelle wurde erstmals der Jahresgrenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B überschritten. Dies konnte durch TL-Glowkurven und einer Restdosisanzeigebestimmung unmittelbar nach der Auswertung zusätzlich belegt werden.

Für den gleichen Arbeitseinsatz an einer Cf-252-Neutronenquelle verdeutlicht Abb. 11 am Beispiel von zwei Personen die zeitliche Verteilung der Neutronen-Äquivalentdosen, die entsprechenden Jahresdosen sowie das Verhältnis H_N/H_Y .

Für die innerhalb der Routineüberwachung gefundenen Ergebnisse zeigt Abb. 12 die Häufigkeitsverteilung der Neutronen-Äquivalentdosen bei monatlicher Messung und Abb. 13 die Häufigkeitsverteilung für das Verhältnis H_N/H_Y . Die Personenüberwachung in den Anwendungsbereichen Reaktoren N1 und Brennelement-Kreislauf N2 zeigten meistens kleine Neutronendosen, die bei monatlichem Überwachungszeitraum unter der vorgegebenen Nachweisgrenze von 0,1 mSv liegen und nur bei vierteljährlicher Überwachung teilweise zur Anzeige von 0,2 mSv führen würden.

Der routinemäßige Einsatz des Albedoneutronendosimeters hat sich besonders in Bereichen mit Cf- und Pu-Quellen höherer Aktivität bewährt, war aber auch

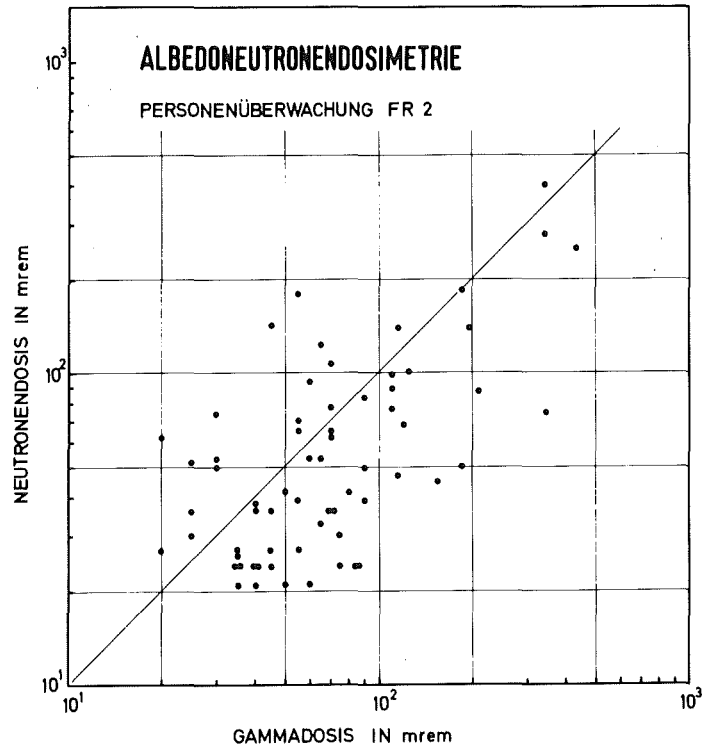


Abb. 10 Ergebnisse der monatlichen Personendosimetrie 1977 an Bestrahlungskanälen des FR2 (Karlsruher Albedodosimeter) (56)

Tab. 14 Personenüberwachung mit Albedodosimetern im KfK und für auswärtige Stellen mit monatlicher Auswertung

	Jahr	Anzahl der Auswertungen	Anzahl/a $H_n > 0,02$ mSv	$(H_n)_{max}$ (mSv)	$H_n/H_\gamma^{1)}$	Maximale Jahresdosis H_n pro Person
KfK	1982	550	12	2,2	0,5-2	2,2 mSv/a
	1983	840	16	1,9	0,5-5	3,5 mSv/a
	1984	1 140	19	2,6	0,8-6	11,3 mSv/a
	1985	1 150	49	20,6	0,3-12	33,0 mSv/a ²⁾
	1986	1 688	40	1,3	0,2-5	5 mSv/a
Extern	1985	508	23	0,9	0,1-5	0,9 mSv/a
	1986	650 ³⁾	83	2,4	0,2-5	2,4 mSv/a

1) Verhältnis Neutronen-Äquivalentdosis H_n zur Photonen-Äquivalentdosis H_γ ,

2) Überschreitung des Grenzwertes der Jahresdosis für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie B,

3) Monatliche, vierteljährliche und jährliche Überwachungszeiträume

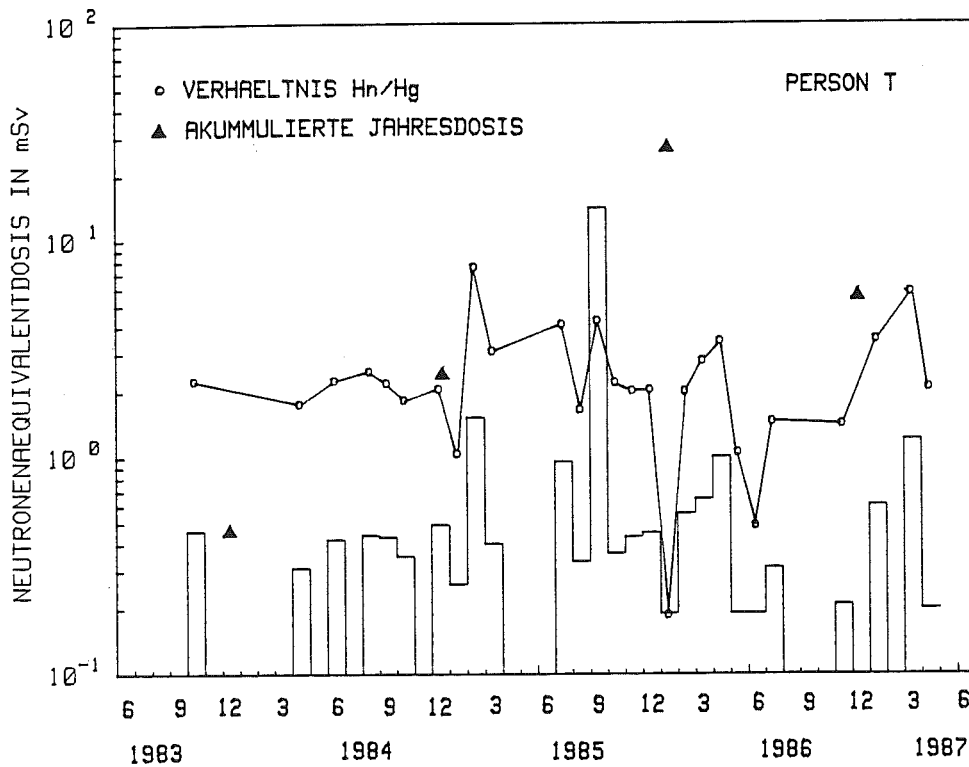
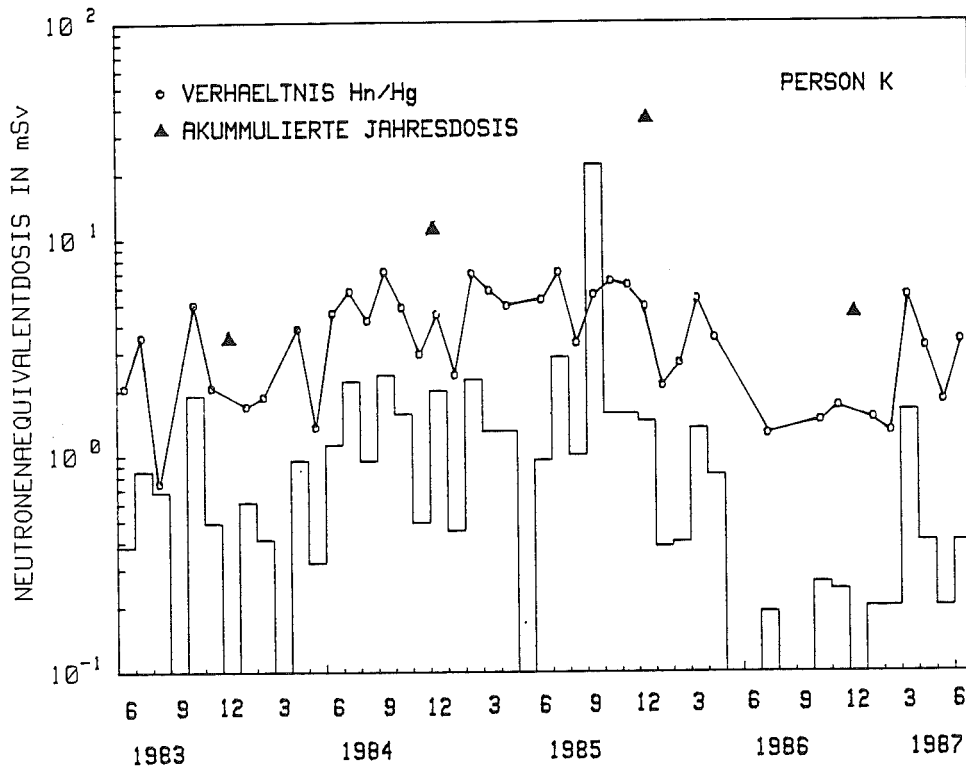


Abb. 11 KfK-Ergebnisse der Routineüberwachung mit Albedodosimetern für zwei Personen beim Umgang mit einer Cf-252-Neutronenquelle am gleichen Arbeitsplatz

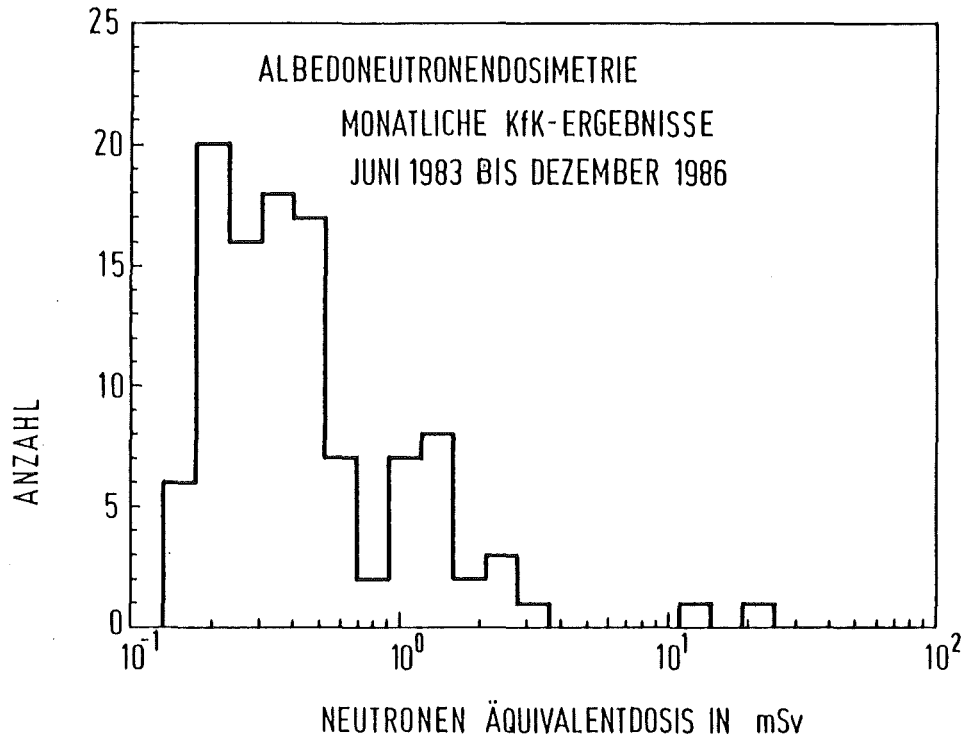


Abb. 12 Häufigkeitsverteilung der Neutronen-Äquivalentdosen bei monatlicher Überwachung, KfK Karlsruhe

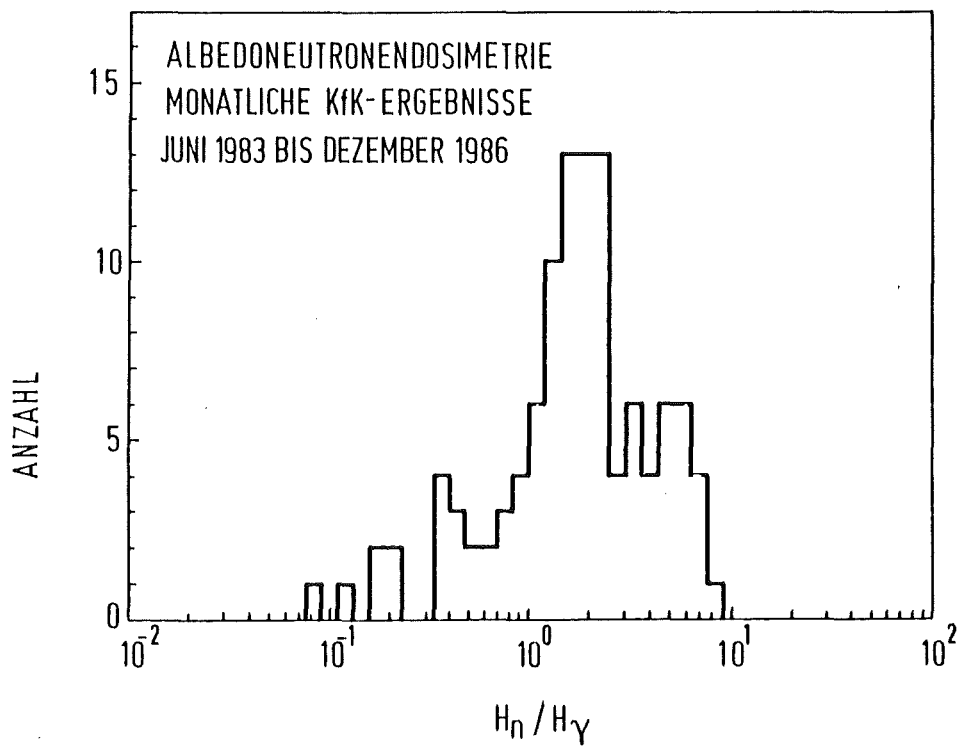


Abb. 13 Häufigkeitsverteilung des Äquivalentdosis-Verhältnisses H_n/H_γ , KfK Karlsruhe

dort sinnvoll, wo geringe Personenexpositionen zu erwarten sind und Abschätzungen der Neutronendosis aufgrund von Dosisleistungen unzureichend sind. Beispiele von Neutronenfeldern geringer Dosisleistung und Erwartungswerte für die Neutronen-Äquivalentdosis gibt Anhang C.

7.2 Erprobung durch MPA (Harshaw-System)

Innerhalb der Routineerprobung hat das MPA Dortmund-Applerbeck Albedodosimeter, insbesondere in den Anwendungsbereichen Kernkraftwerk N1/1 und Forschungsreaktoren N1/2 ausgegeben. Die Meßergebnisse sind in Tab. 15 wiedergegeben.

In dem Zeitraum 1984 - 1986 wurden insgesamt 929 Dosimeter ausgewertet. Hierbei wurde in 272 Fällen eine Photonen-Äquivalentdosis oberhalb 0,1 mSv ermittelt, eine Neutronen-Äquivalentdosis lag jedoch nicht vor. In weiteren 13 Fällen konnte neben einer Photonen-Äquivalentdosis außerdem eine Neutronen-Äquivalentdosis festgestellt werden (siehe Tab. 15).

Außer den in der Tabelle aufgeführten Betreibern wurden noch jeweils an einen Betrieb des Anwendungsbereiches N 4/1 und N 2/3 Albedodosimeter ausgegeben, ohne daß Neutronendosen festgestellt wurden.

Tab. 15 Im Zeitraum 1984 - 1986 innerhalb der Routineüberwachung ermittelte Neutronen-Äquivalentdosiswerte mit der entsprechenden Photonen-Äquivalentdosis (MPA Dortmund) (59)

Jahr	Anwendungsbereich ¹⁾	Nr.	Angegebene Personendosen		H _n /H _γ
			H _n (mSv)	H _γ (mSv)	
1984	N 1/1	1	0,2	0,2	1,0
		N 1/2	2	0,4	2,0
	3		0,2	0,4	0,5
	3		1,0	1,0	1,0
	5		0,6	0,6	1,0
	6		0,6	0,6	1,0
	7		0,4	0,6	0,7
	8		0,6	0,6	1,0
	9		0,2	0,4	0,5
	1985	N 1/2	10	0,2	0,4
11			0,4	0,2	2,0
12			0,2	0,4	0,5
13			0,2	0,4	0,5

¹⁾ Kennzeichnung der Anwendungsbereiche siehe Anhang B, Tab. B1

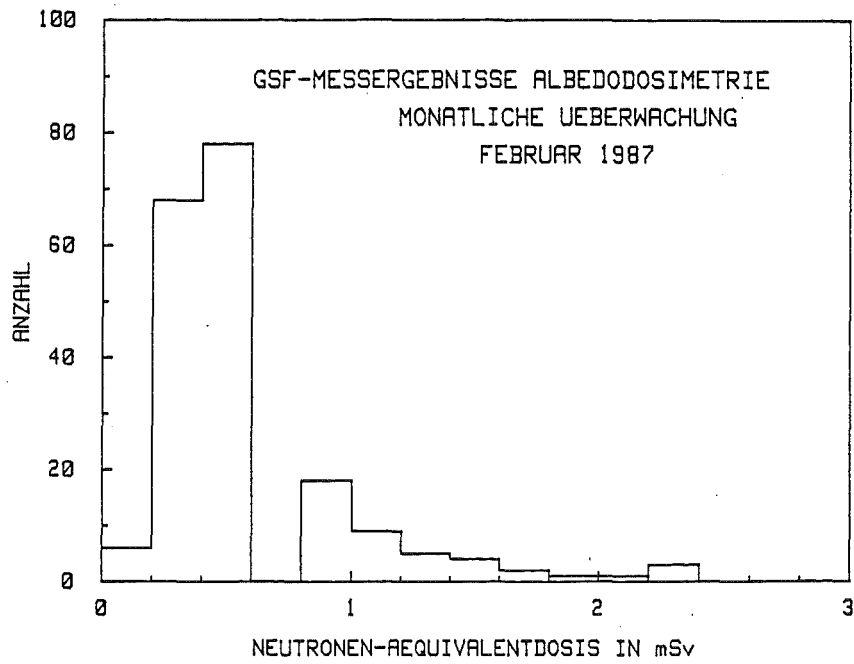


Abb. 14 Häufigkeitsverteilung der Neutronen-Äquivalentdosen bei monatlicher Überwachung im Anwendungsbereich N2 (Brennstoffzyklus) (GSF Neuherberg) (58)

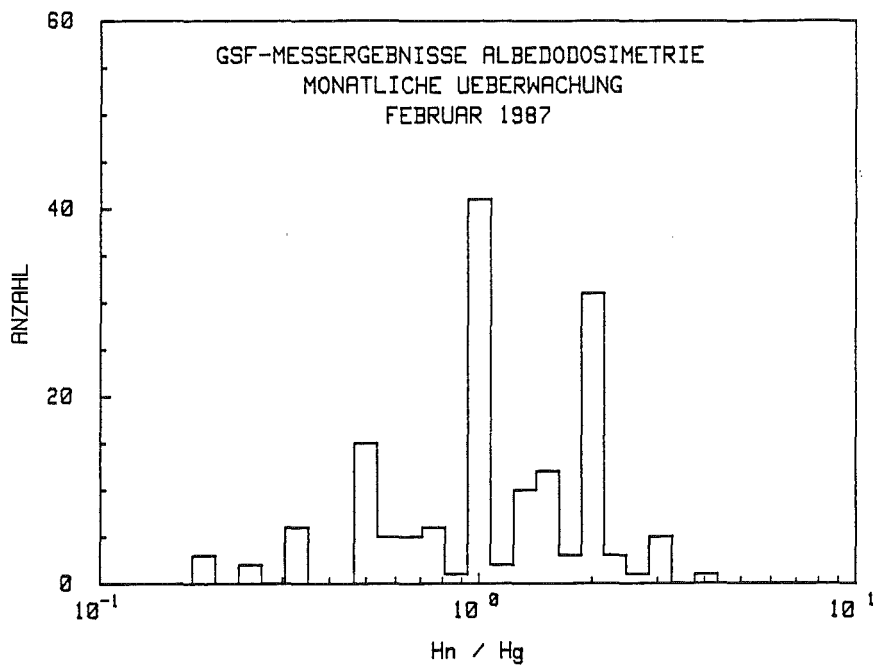


Abb. 15 Häufigkeitsverteilung des Äquivalentdosis-Verhältnisses H_n/H_g , (GSF Neuherberg) (58)

7.3 Erprobung durch GSF (Panasonic-System)

Die GSF Neuherberg hat bei der Routineerprobung Albedodosimeter insbesondere im Anwendungsbereich N2 (Brennstoff-Kreislauf) ausgegeben.

Für die innerhalb der Routineüberwachung gefundenen Ergebnisse zeigt Abb. 14 die Häufigkeitsverteilung der Neutronen-Äquivalentdosen bei monatlicher Messung und Abb. 15 die Häufigkeitsverteilung für das entsprechende Verhältnis H_n/H_γ .

8. DOSIMETRISCHE EIGENSCHAFTEN DES ALBEDODOSIMETRIESYSTEMS

8.1 Allgemeines

Für die in der Albedodosimeterkapselung vorgesehene Kombination von TL-Detektoren und Kernspurdetektoren wurden im Jahre 1983 Routineauswerteverfahren für die Kernspurdetektoren Makrofol E und CR-39 bereitgestellt (38, 60-62). Dies betrifft die elektrochemische Ätzung von Rückstoßkerndetektoren zum Nachweis schneller Neutronen sowie von (n, α)-Detektoren zum Nachweis thermischer Neutronen. Die universelle Albedodosimeterkapselung kann damit wahlweise mit Makrofol zum Nachweis schneller Neutronen oder mit (n, α)-Konvertern in Kontakt mit Makrofol anstelle von bzw. gleichzeitig mit TL-Detektoren ausgerüstet werden.

Im folgenden werden die dosimetrischen Eigenschaften des Albedodosimeters und der Kernspurdetektoren zusammenfassend beschrieben, sofern sie für das Meßverfahren und den Neutronennachweis von Bedeutung sind. Dies sind insbesondere:

- der Meßbereich
- die Chargenhomogenität in Voranzeige und Ansprechvermögen,
- die Trennung des Gamma- und Neutronen-Meßwertanteils,
- die Abhängigkeit der Detektoranzeige vom Detektor-Körperabstand,
- die Energieabhängigkeit und Richtungsabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisanzeige
- die zufällige Komponente der Meßunsicherheit der Neutronendosismessung,
- die systematischen Meßunsicherheiten der Feldkalibrierung.

8.2 Meßbereich, untere Nachweisgrenze

Die dosimetrischen Eigenschaften des im KfK eingesetzten Alnor-Systems und der Kernspurdetektoren Makrofol E und CR-39 wurden hinsichtlich Meßbereich und kleinster nachweisbarer Neutronen-Äquivalentdosis untersucht. Abb. 16 zeigt die relative Standardabweichung als Funktion der Neutronen-Äquivalentdosis für den Nachweis von Albedoneutronen mit TL- und Kernspurdetektoren sowie für den Nachweis von Rückstoßkernen in Makrofol E und CR-39. Die kleinste nachweisbare Dosis wird durch die Voranzeige der Detektoren bestimmt. Entsprechende Angaben über den Dosismessbereich sowie über das Ansprechvermögen der Neutronendetektoren in den verschiedenen Anwendungsbereichen sind in Tab. 16 wiedergegeben.

Im Hinblick auf eine Personenüberwachung an Reaktoren können mit dem hier verwendeten Alnor-System Neutronen-Äquivalentdosen bis zu 0,02 mSv (Beschleuniger 0,1 mSv), mit gamma-unempfindlichen (n, α)-Kernspurdetektoren jedoch bis zu 0,002 mSv nachgewiesen werden (siehe Tab. 16).

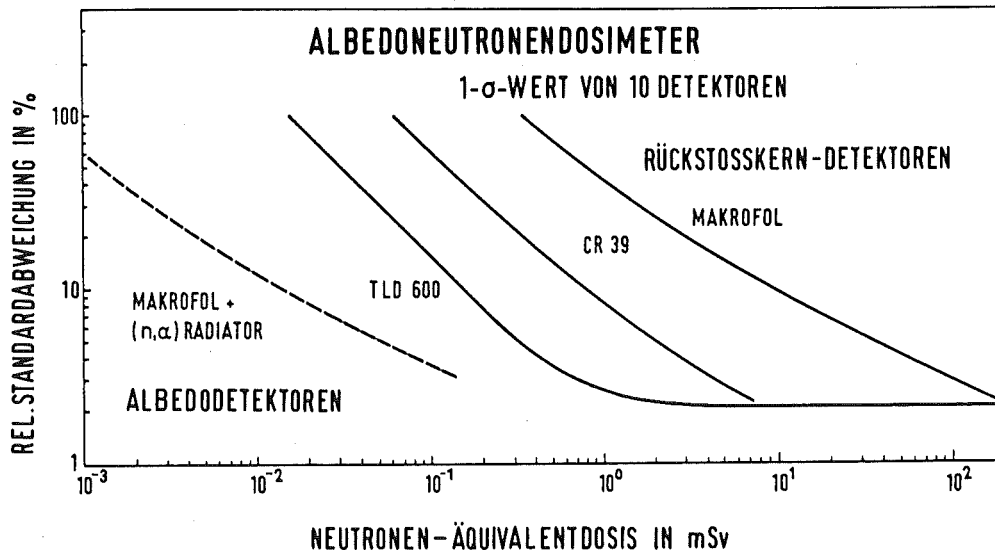


Abb. 16 Relative Standardabweichung der Detektoranzeigen des Albedodosimeters in Abhängigkeit von der Neutronen-Äquivalentdosis, wahlweise für das TLD-System Alnor (TLD600/TLD700) für ein relatives Albedodosimeteransprechvermögen $R_n(i)/R_\gamma(i) = 1$, einen Makrofol-Kernspurdetektor mit einem ¹⁰B(n, α)-Radiator als Albedodetektor in Kombination mit den Kernspurdetektoren CR-39 bzw. Makrofol zum Nachweis schneller Neutronen (Kernspurdetektoren nach elektrochemischer Ätzung) für Cf-252-Neutronen nach (26)

Tab. 16: Ansprechvermögen und Dosismeßbereich des Albedodosimeters mit TL- bzw. Kernspurätzdetektor sowie von Rückstoßkerndetektoren

NEUTRONEN-DETEKTOR	NEUTRONEN-STREU-STRABLUNGS-FELD	REL. NEUTRONEN-ANSPRECH-VERMÖGEN $R_n(i)/R_y(i)$	VOR-ANZEIGE $M_0 \pm s$	NEUTRONEN-DOSISBEREICH	
				MIN ²⁾ (mSv)	MAX ³⁾ (mSv)
<u>ALBEDO DETEKTOR</u> Thermolumineszenzdetektor ⁶ LiF/ ⁷ LiF	therm. Neutronen	5	0,03 ± 0,02	0,02	2·10 ³
	N1 starke Abschirmung	3		0,02	3·0 ³
	N2 spaltbares Material	0,8		0,03	1·10 ⁴
	N3 Cf-252-Quellen	0,3		0,05	3·0 ⁴
	N4 Beschleuniger	0,2		0,1	5·10 ⁴
Kernspurätzdetektor ¹⁰ B(n,α)-Radiator mit Makrofol ¹⁾		R_n (cm ⁻² ·mSv ⁻¹)	(cm ⁻²)		
	therm. Neutronen	30000		0,0002	0,06
	N1 starke Abschirmung	18000	6 ± 3	0,0004	0,1
	N2 spaltb. Material	4800		0,005	0,4
	N3 Cf-252	1800		0,004	1
N4 Beschleuniger	1200		0,006	1,5	
<u>RÜCKSTOßKERN-DETEKTOR</u> Makrofol CR 39	²⁵² Cf	12	6 ± 3	0,23	300
	²⁵² CF	336	60 ± 30	0,1	8

1) ¹⁰B-Radiator Kodak BE10

2) untere Nachweisgrenze ergibt sich aus $s/H_n = 0,5$

3) max. Spurendichte 1800 Sp/cm²

Das Albedodosimeter ist gleichzeitig auch Unfalldosimeter für Photonen- und Neutronenstrahlung. Der Meßbereich wird bei hohen Dosen durch die Eigenschaften des TL-Detektormaterials sowie des Auswertesystems bestimmt. Im Dosisbereich oberhalb 1 Sv muß bei LiF nach Photonenstrahlung mit einer Supralinearität bzw. beim Auswertegerät u. U. mit einer Nichtlinearität der Meßwertanzeige gerechnet werden. Die unterschiedliche Supralinearität nach Photonenbestrahlung von TLD 600 und TLD 700 kann über entsprechende Kalibrierkurven bis zu Dosen oberhalb 10 Sv korrigiert werden. Die Supralinearität nach Neutronenbestrahlung von TLD 600 beträgt maximal etwa 10 % (77).

Die wiederholte Neutronenbestrahlung mit hohen Dosen führt über die Kernreaktion ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ zu einer Anreicherung von Tritium im Festkörperdetektor. Der radioaktive Zerfall von Tritium kann bei längerer Lagerungszeit zu einer zeitabhängigen Erhöhung der Voranzeige führen. Im ungünstigsten Fall einer akkumulierten Bestrahlung des Detektors (a) mit 10 mGy thermischer Neutronen kann dies nach 3 Monaten Lagerung zu einer Erhöhung der Voranzeige von 2 mGy führen (78). Es ist daher zweckmäßig, die Bestrahlungsvorgeschichte von TLD 600-Detektoren mit Hilfe eines Zusatzprogrammes im Rechner zu speichern.

Nach einer Hochdosisbestrahlung kann der Tritiumeffekt aber auch gezielt zu einer gamma-unempfindlichen Zweitmessung der Neutronendosis herangezogen werden.

8.3 Chargenhomogenität in Voranzeige und Ansprechvermögen

Die Anzeige regenerierter unbestrahlter Dosimeter einer TLD-Charge wird im wesentlichen von den Eigenschaften des individuellen Detektors bestimmt. Sie ist aber auch von den Eigenschaften des Auswertesystems insbesondere von dem Dunkelstrom des Photomultipliers, der Oberflächenqualität der Ausheizpfanne, dem Aufheizzyklus sowie von zusätzlichen Wärmebehandlungen (Regenerierung) abhängig. Kommerzielle TL-Detektorchargen zeigen Voranzeigen der Detektoren, die zwischen 1 und 200 μSv streuen können. Die Voranzeige ist daher ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Chargenqualität sowie für die Entscheidung, ob der jeweilige Detektor innerhalb der Charge zur Messung kleiner Dosen in der Albedodosimetrie eingesetzt werden kann.

Innerhalb der Routineüberwachung wird davon ausgegangen, daß die mittlere Voranzeige sowie die Streuung der Voranzeige einer Teilcharge als repräsentativ für die Gesamtcharge angesehen werden kann. Dies trifft zweifellos zu für kommerzielle Chargen guter Qualität, bei denen der Betrag und die Streuung der Voranzeigen relativ klein sind. Zur Korrektur der Voranzeige bzw. zur Verbesserung der Meßunsicherheit bei der Ausmessung kleiner Dosen bestehen hierbei folgende Möglichkeiten:

- die mittlere Voranzeige einer Referenzcharge (u) wird von der jeweiligen Dosimeteranzeige subtrahiert,
- die individuelle Voranzeige wird für alle Detektoren der Gesamtcharge ermittelt und vorhandene Ausreißer mit hoher Voranzeige eliminiert,
- anstelle der mittleren Voranzeige wird die jeweilige individuelle Voranzeige vom Meßwert subtrahiert.

Bei einer individuellen Korrektur der Voranzeige ergibt sich hierbei generell die Frage, ob die individuelle Voranzeige bei wiederholter Ausmessung konstant bleibt und mit welcher Meßunsicherheit sie bestimmt werden kann.

Im Falle einer wiederholten Regenerierung (z.B. bis 400° C bei TLD 700) zeigten Untersuchungen über längere Zeiträume, daß die Voranzeige im allgemeinen für den jeweiligen Detektor repräsentativ ist.

Abb. 17 und 18 zeigt als Beispiel die Häufigkeitsverteilung der Voranzeige bzw. des Photonenansprechvermögens einer neuen kommerziellen TLD 700-Charge

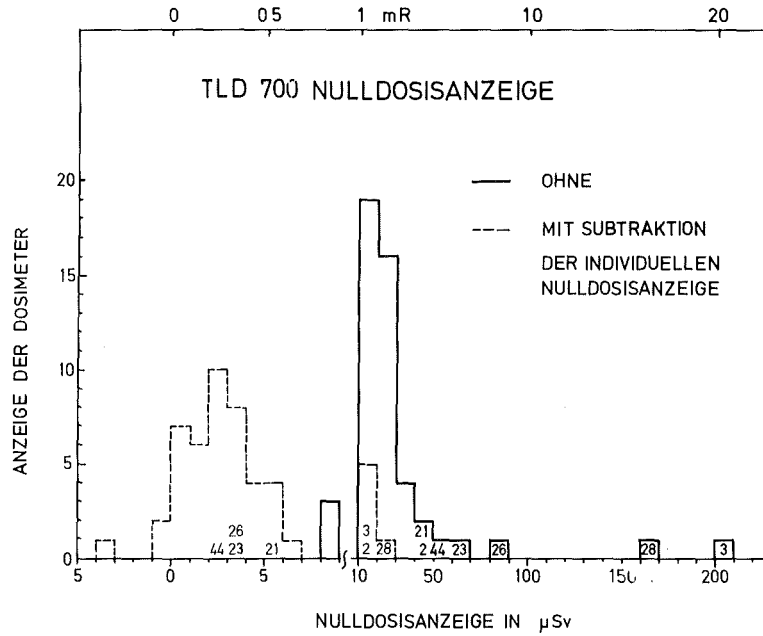


Abb. 17 Häufigkeitsverteilung der Voranzeige einer TLD 700-Charge ohne bzw. mit Subtraktion der individuellen Voranzeige, Messung im Pitmann-Toledo-Auswertegerät über TL-Peak 5 nach (32)

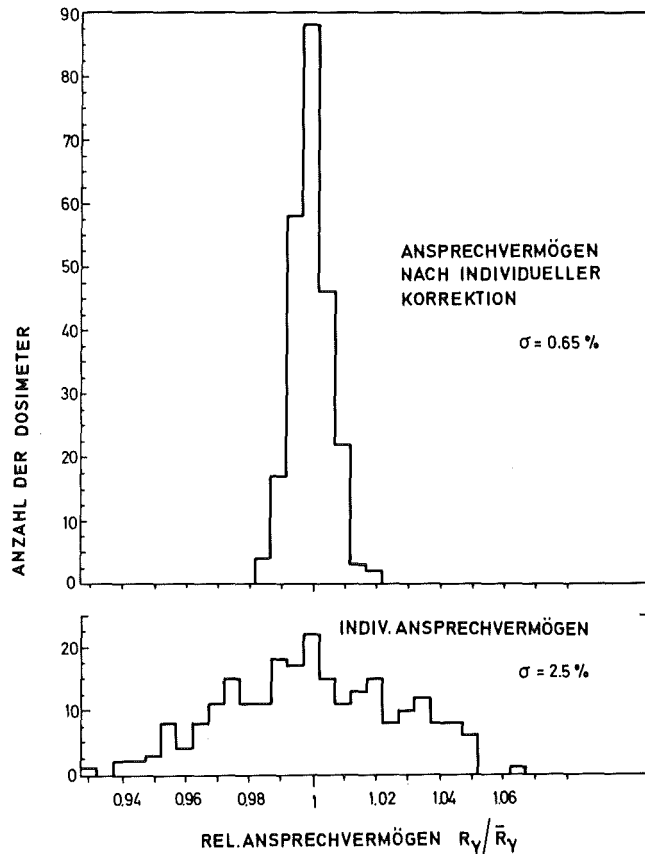


Abb. 18 Häufigkeitsverteilung des Photonenansprechvermögens einer TLD700-Charge ohne bzw. mit individueller Korrektion des individuellen Ansprechvermögens (32)

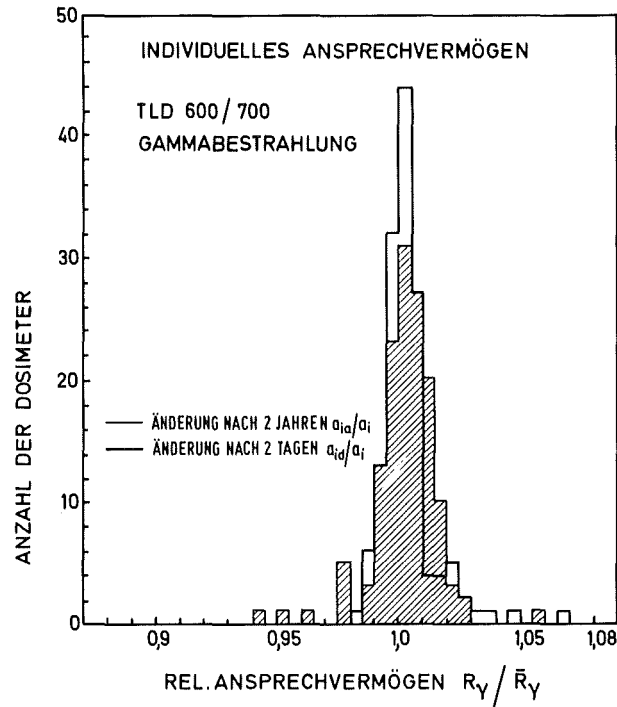


Abb. 19 Häufigkeitsverteilung des individuellen Kalibrierfaktors einer TLD 600/TLD-700 Charge unmittelbar nach Kalibrierung und dessen Änderung bei einer Wiederholmessung nach 2 Tagen bzw. 2 Jahren nach (32)

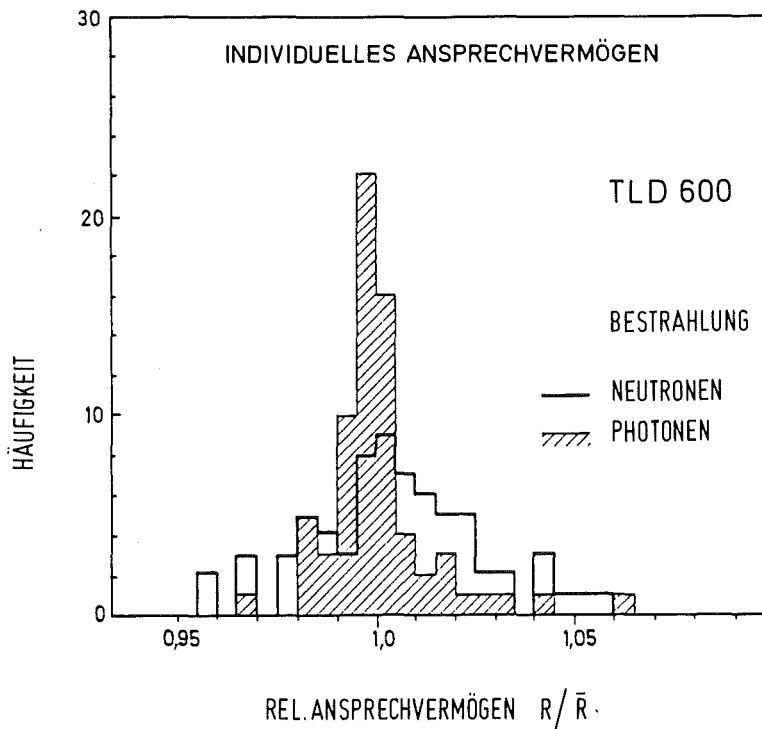


Abb. 20 Häufigkeitsverteilung des individuellen Ansprechvermögens einer TLD600-Charge bei Photonen- und Neutronenbestrahlung (32)

unmittelbar nach Regenerierung ohne und mit Korrektur der individuellen Voranzeige bzw. des individuellen Ansprechvermögens. Entsprechende Ausreißer sind durch ihre Dosimeternummer gekennzeichnet. Durch Korrektur der individuellen Voranzeige kann die Meßunsicherheit an der unteren Nachweisgrenze bei diesen Detektoren signifikant herabgesetzt werden. Wegen der Meßunsicherheit bei der Bestimmung der Voranzeige ist eine solche Korrektur jedoch nicht mehr empfehlenswert bei Chargen mit Voranzeigen kleiner als 5 μSv .

Die Voranzeige kann sich u.a. auch unabhängig vom Detektor durch einen Dunkelstromanteil bei Erwärmung des Photomultipliers erhöhen. Bei Verwendung mittlerer oder individueller Voranzeigen zur Korrektur der Meßwerte kann daher auf eine Referenzcharge (n) vor jeder Routineauswertung in den meisten Fällen nicht verzichtet werden.

Das individuelle Ansprechvermögen kann innerhalb einer Charge um $\pm 10\%$ streuen. Wiederholmessungen nach 2 Tagen und 2 Jahren zeigten, daß der erstmalig bestimmte normierte Kalibrierfaktor innerhalb einer Meßunsicherheit von $\pm 3\%$ langfristig erhalten bleibt (siehe Abb. 19). Es ist daher ausreichend, die Kalibrierung der Charge nur einmal vorzunehmen.

Ebenso können Unterschiede zwischen dem relativen Photonen-Ansprechvermögen und dem relativen Neutronen-Ansprechvermögen innerhalb einer Charge im allgemeinen unberücksichtigt bleiben (siehe Abb. 20). Es empfiehlt sich jedoch, das relative Neutronen-Ansprechvermögen jeder neuen Charge mit demjenigen einer Referenzcharge zu vergleichen, um Fehlmessungen aufgrund wiederholt vorkommender falscher Kennzeichnungen von Detektorbehältern (Verwechslung von TLD100, TLD 600 bzw. TLD 700) zu vermeiden.

Die zusätzliche Berücksichtigung eines normierten Kalibrierfaktors für die jeweilige TLD 600- bzw. TLD 700-Charge wurde in Abschnitt 4.2.3 beschrieben. Tab. 2 (siehe Abschnitt 4.3.2) gibt Beispiele von Chargenkalibrierfaktoren, die auf eine Referenzcharge bezogen wurden.

8.4 Gamma-Diskriminierung

Bei der Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis führt die Subtraktion eines Photonen-Meßwertanteils zu einer Meßunsicherheit, die u.a. sowohl vom Photonen-Äquivalentdosisanteil im jeweiligen Strahlenfeld, d.h. vom Verhältnis H_V/H_N , als auch vom relativen Neutronen-Ansprechvermögen $R_N(i)/R_V(i)$ abhängt. Abb. 21 zeigt die Änderung der relativen Zufallsunsicherheit in Abhängigkeit vom Dosisverhältnis H_V/H_N . Die entsprechende Meßunsicherheit für die Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis bleibt für $H_V/H_N \leq 5$ unter 30 %, wenn $R_N(i) > 0,6$ ist. Hierbei wurde für die Meßwerte eine Zufallsunsicherheit von ± 3 % bei hohen Dosen angenommen.

Auch bei höherem Photonen-Dosisanteil ist eine höhere Meßunsicherheit bei der Bestimmung von H_N tolerierbar, solange die Meßunsicherheit für die Gesamtdosis ($H_V + H_N$) gering bleibt. Abb. 22 zeigt, daß für alle praktisch vorkommenden $R_N(i)$ -Werte im Stahlungsfeld auch bei $H_V/H_N = 10$ die zufällige Komponente der Meßunsicherheit 20 % nicht überschreitet.

Tab. 17 zeigt am Beispiel einer TLD 600/TLD 700-Auswertung im Alnor-Dosimetriesystem, daß bei unterschiedlich vorgegebener Photon-/Neutron-Bestrahlung das Verhältnis der Neutronen-Äquivalentdosis und der Äquivalentdosis durch Neutronen und Photonen durch das entsprechende Meßwertverhältnis $M_N/M_{N+\gamma}$ der beiden Detektoren wiedergegeben wird, d.h. die Neutronen-Äquivalentdosis schon im Bereich 0,05 bis 0,5 mSv ausreichend genau ermittelt wird. Eine durch die Meßwertdifferenz u.U. erst vorgetäuschte "Neutronenanzeige" kann unmittelbar an dem Betrag der zufälligen Komponente der Meßunsicherheit erkannt werden. Der Ausdruck des Meßwertes mit der jeweiligen Meßunsicherheit wird daher als zweckmäßig angesehen.

8.5 Detektor-Körperabstand

Bedingt durch die Messung der vom Körper des Dosimeterträgers rückgestreuten Neutronen ist die Anzeige des Albedodetektors vom Abstand des Detektors zur Körperoberfläche abhängig. Das "Albedoneutronenfenster" in der Borplastikkapselung wurde in seiner Größe an die entsprechenden Detektoren des TLD-Systems so angepaßt und optimiert, daß es den Einfluß des Detektor-Körperabstandes im Vergleich zu einem einfachen frontseitig abgedeckten Detektor in ausreichender Weise reduziert (26, 86).

Abb. 23 zeigt die Änderung des Albedoansprechvermögens in Abhängigkeit vom Detektor-Phantomabstand an einem Kugelphantom bei Bestrahlung mit

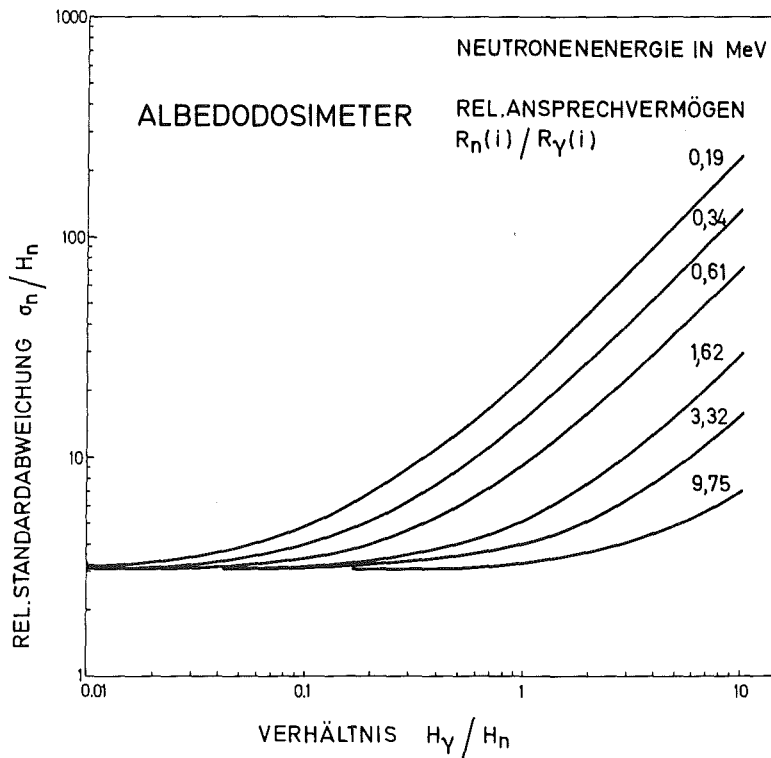


Abb. 21 Zufällige Komponente der Meßunsicherheit bei der Messung der Neutronen-Äquivalentdosis H_n in Abhängigkeit vom Verhältnis H_γ / H_n für verschiedene relative Neutronenansprechvermögen nach (64)

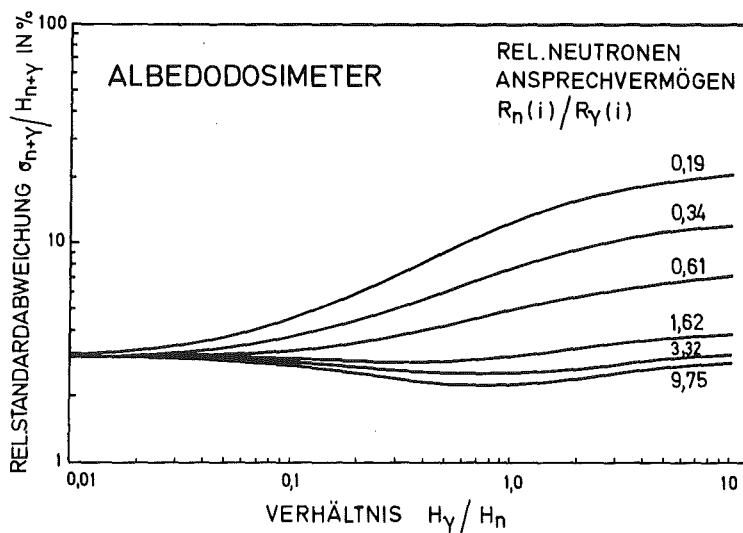


Abb. 22 Zufällige Komponente der Meßunsicherheit bei der Messung der Gesamtdosis $H_{n+\gamma}$ durch Photonen- und Neutronenstrahlung in Abhängigkeit vom Verhältnis H_γ / H_n für verschiedene relative Neutronenansprechvermögen nach (64)

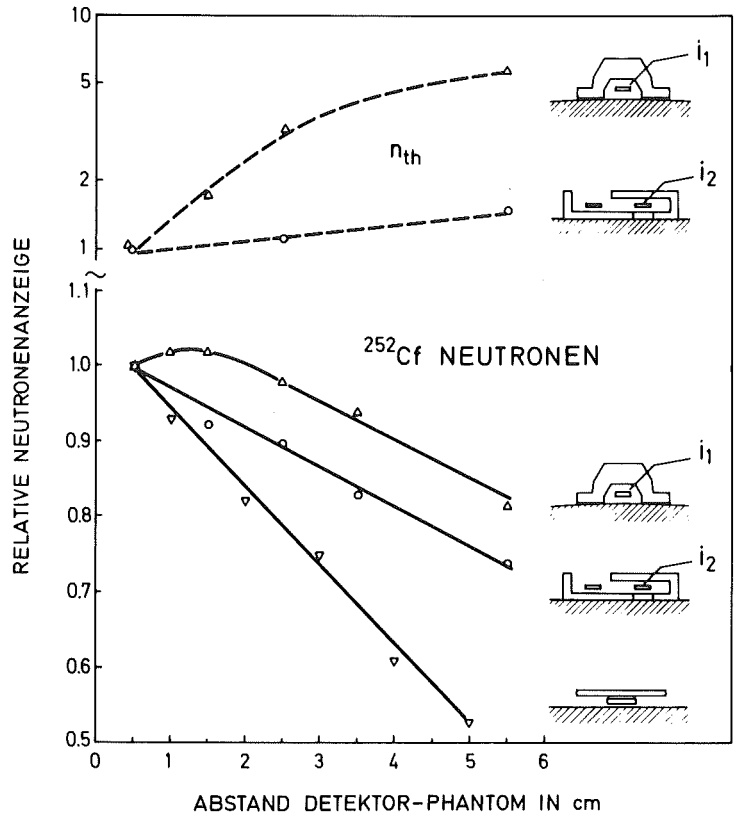


Abb. 23 Änderung der Neutronenanzeige in Abhängigkeit vom Detektor-Phantomabstand für verschiedene Albedodosimeterkapselungen bei Bestrahlung mit thermischen und Cf-252-Neutronen nach (60)

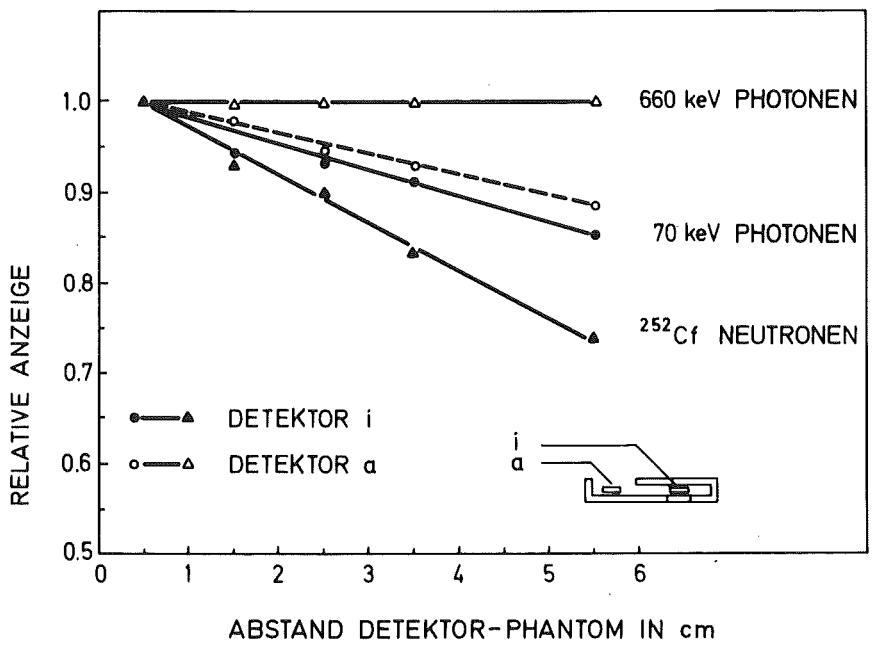


Abb. 24 Änderung der Detektoranzeige in Abhängigkeit vom Detektor-Phantomabstand für die Detektoren (i) und (a) des universellen Albedodosimeters bei Bestrahlung mit 70 keV- bzw. 660 keV-Photonen

Tab. 17 Meßunsicherheit für die Bestimmung des Neutronenmeßwertanteiles bei unterschiedlichem Photonenanteil aus der Anzeige von TLD600/TLD700 im Alnor DOSACUS-Auswertegerät (65)

ÄQUIVALENTDOSIS ¹⁾			TLD600/700 ANZEIGE	
NEUTRONEN ³⁾ (mSv)	PHOTONEN (mSv)	VERHÄLTNIS NEUTRONEN/ TOTAL	$M_n/M_{n\gamma+\gamma}$	s % ²⁾
0	0,07	0	0,03	± 130
0	0,5	0	0,03	± 67
0	12,0	0	0,04	± 100
0,05	0,13	0,28	0,30	± 8
0,11	0,13	0,45	0,42	± 6
0,20	0,13	0,58	0,61	± 3
0,21	0,23	0,48	0,48	± 4
0,5	4,5	0,1	0,10	± 18
0,5	2,0	0,2	0,20	± 6
0,5	0,57	0,47	0,46	± 3
12,2	0,4	0,97	0,97	± 0,1

- 1) unter der Annahme einer gleichen Anzeige pro Äquivalentdosis für Neutronen und Photonen
- 2) relative empirische Standardabweichung der Neutronenkomponente bedingt durch Subtraktion des Photonenanteils ermittelt aus 10 Dosimetern pro Bestrahlung
- 3) für ein relatives Neutronenansprechvermögen von $R_n(i)/R_\gamma(i) = 1$

thermischen Neutronen und mit Cf-252-Neutronen in 1.25 m Abstand von der Quelle bzw. Höhe über Boden für das universelle Albedodosimeter (i_2), das vorher benutzte und am Gürtel getragene Karlsruher Albedodosimeter (i_1) und ein mit Kadmium abgedecktes TLD 600/TLD 700-Detektorpaar. Im ungünstigen Fall eines Detektor-Phantom-Abstandes von 4 cm werden thermische Neutronen um etwa 30 % überbewertet. Im Streustrahlungsfeld führt der Anteil an energiearmen Neutronen erwartungsgemäß zu einem Abfall von weniger als 20 % (Cf-252-Quelle). Ein ähnlicher Effekt ist auch bei Photonenstrahlung zu erwarten (siehe Abb. 24). Wegen der unterschiedlichen Fenstergröße bzw. Kollimierung der einfallenden thermischen Neutronen zeigen die Albedokapseln für die verschiedenen TLD-Systeme geringe Unterschiede im Detektor-Körperabstands-Effekt.

8.6 Energieabhängigkeit für Neutronenstrahlung

Das Neutronen-Ansprechvermögen $R_n(i)$ von Albedodetektoren ist in ausgeprägter Weise von der Neutronenenergie abhängig, wie dies in Abb. 25 für den Albedodetektor (i), den thermischen Neutronendetektor (a) sowie für das Verhältnis $R_n(a) / R_n(i)$ in Abhängigkeit von der Neutronenenergie wiedergegeben ist. Die vorliegenden Ergebnisse für das bisherige Karlsruher Albedodosimeter ergaben sich durch Kalibrierbestrahlungen mit thermischen und monoenergetischen Neutronen sowie im Energiebereich bis 2 keV durch Transportrechnungen (67).

Die wiedergegebene Energieabhängigkeit kann auf das universelle Albedodosimeter übertragen werden, zumal beide Dosimeterkapselungen so optimiert wurden, daß ein vergleichbares Neutronenansprechvermögen für thermische Neutronen und schnelle Neutronen im Energiebereich von 100 keV erhalten wird. Bedingt durch eine unterschiedliche Kollimierung des Albedoneutronenfensters wird für die Alnor-Kapselung ein um 20 % geringeres Ansprechvermögen erhalten. Dies ergaben Kalibrierbestrahlungen mit thermischen und monoenergetischen Neutronen im Energiebereich 50 keV bis 14 MeV. Eine entsprechende Berechnung und Messung des Neutronenansprechvermögens für die neue Albedodosimeterkapselung wird z.Zt. durchgeführt.

Wie Feldkalibrierungen in Streustrahlungsfeldern ergaben, ist der energiearme Neutronenanteil der Streustrahlungs-Komponente ausreichend, um beispielsweise auch an 14 MeV-Beschleunigern einen relativen $R_n(i)$ -Wert von größer als 0,2 zu erhalten. Der Einsatz des Albedodosimeters in nur einem der Anwendungsbereiche N1 bis N2 und die Heranziehung der durch Feldbestrahlungen erhaltenen Kalibrierkurve sowie des in der Personendosimetrie angezeigten Meßwertverhältnisses $M(a)/M(i)$ ermöglicht im Streustrahlungsfeld der Anwendungsbereiche N3 und N4 eine ausreichend energieunabhängige Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis (siehe Kapitel 5.3 und Abb. 3).

Der TL-Detektor im Albedodosimeter kann mit Kernspurdetektoren wie Makrofol oder CR-39 zum Nachweis neutroneninduzierter Rückstoßkerne kombiniert werden. Abb. 26 und 27 zeigen die Energieabhängigkeit des Neutronen-Ansprechvermögens dieser Detektoren. Zur Zeit bietet die Kombination des TL-Albedodetektors mit einem Makrofol-Kernspurdetektor einen zusätzlichen Nachweis schneller Neutronen oberhalb 2 bis 5 MeV.

Kommerziell erhältliches CR-39-Material bietet heute noch keine ausreichende Chargenhomogenität in Voranzeige und Ansprechvermögen. Die Anwendung unterschiedlicher elektrochemischer Ätzverfahren führt, wie dies die Ergebnisse

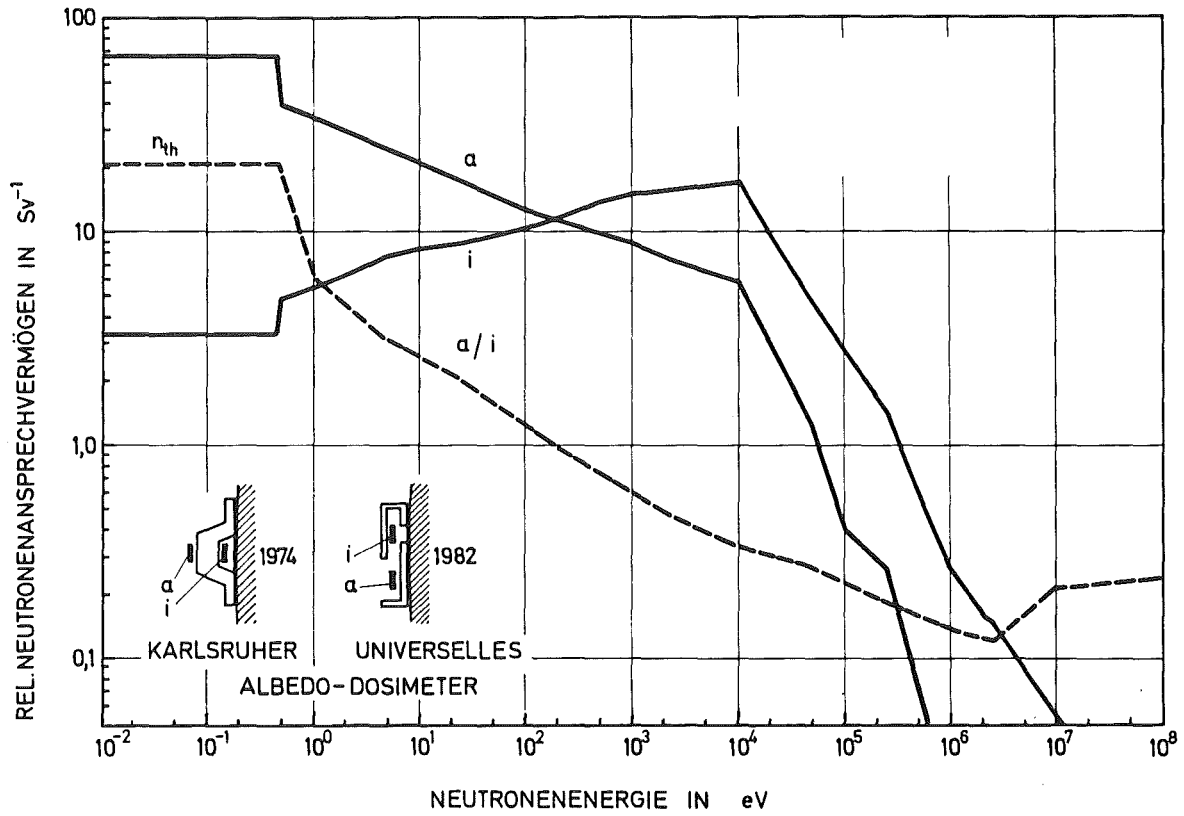


Abb. 25 Energieabhängigkeit der Neutronen-Äquivalentdosisanzeige des Karlsruher Albedodosimeters (67), vergleichbar mit dem des universellen Albedodosimeters

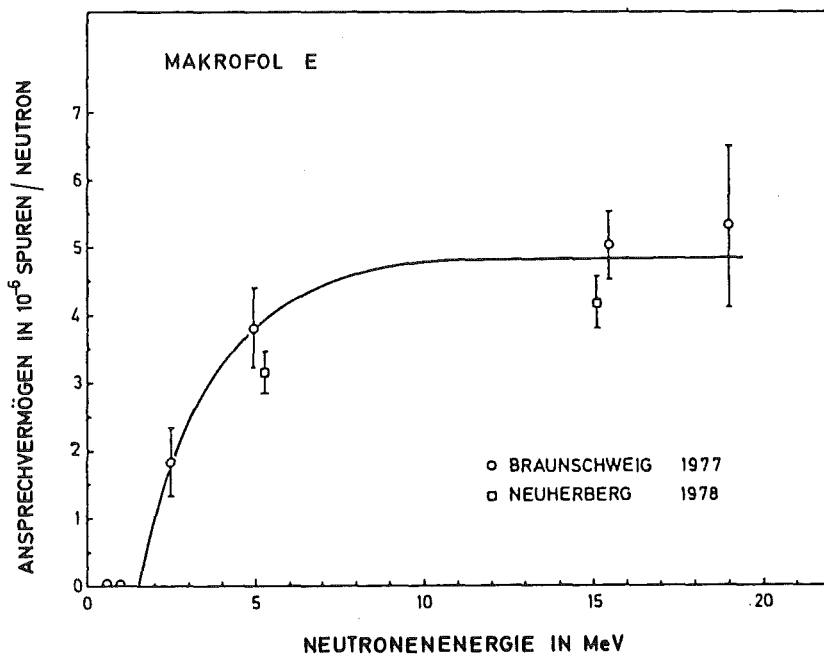


Abb. 26 Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens von Makrofol-Kernspurdetektoren (68)

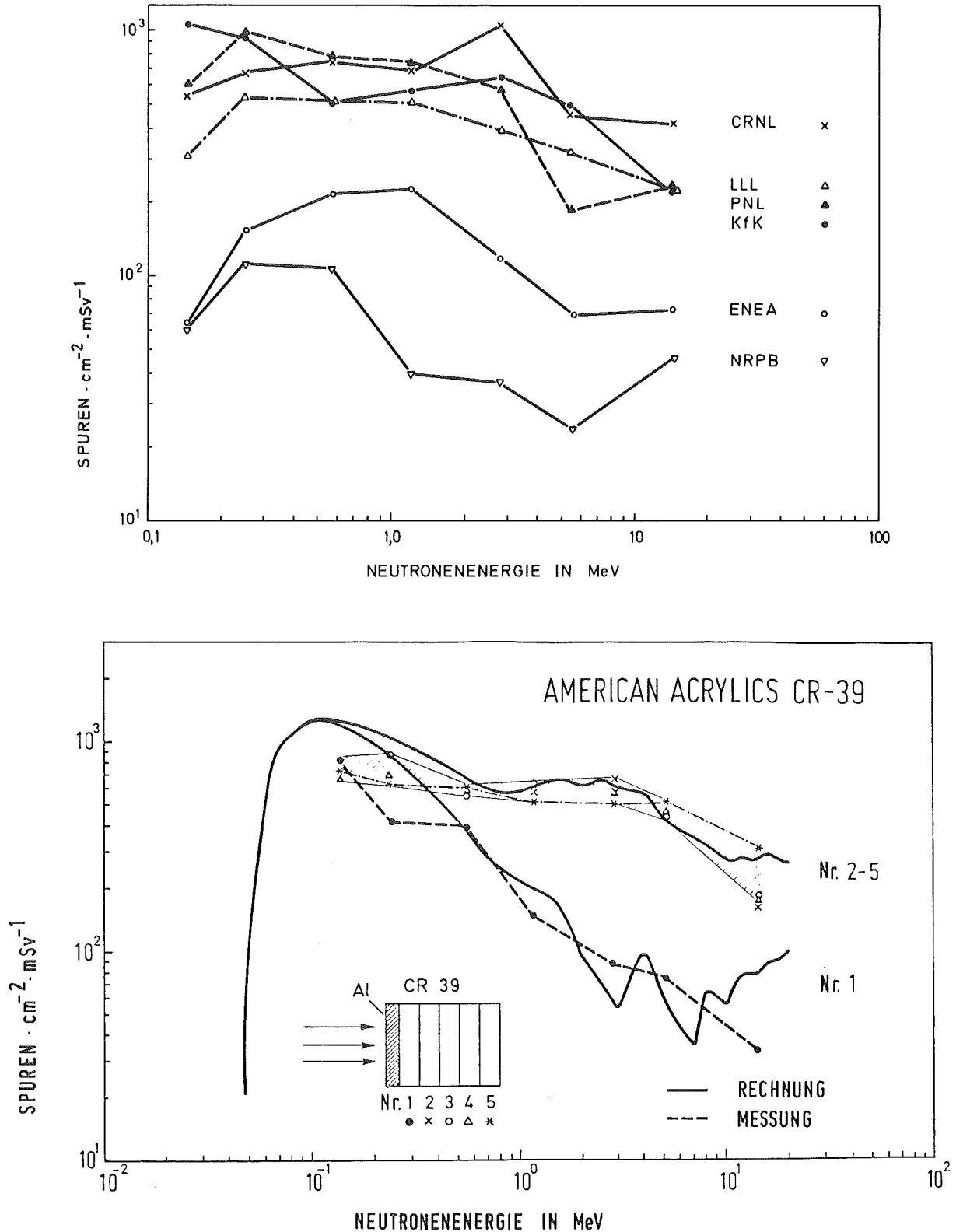


Abb. 27 Energieabhängigkeit des Neutronen-Ansprechvermögens von CR-39 bei Anwendung unterschiedlicher elektrochemischer Ätzverfahren: (a) Ergebnisse einer Eurados-Cendos/USA/Kanadischen Kalibrierbestrahlung 1986 (69-75); (b) KfK-Ergebnisse für einen Detektor ohne bzw. mit Radiator (76).

aus verschiedenen Laboratorien in Abb. 27 zeigen, zu Unterschieden im Betrag und der Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens. Bei einer möglichen Kombination mit einem Albedoneutronendetektor ist der detektorspezifische Abfall des CR-39-Ansprechvermögens im Energiebereich oberhalb 5 MeV von Nachteil (siehe Abb. 27). Hinzu kommen die relativ hohe Streuung der Voranzeige und der geringe Meßbereich (siehe auch Abschnitt 8.2 und 8.8) (69, 80).

8.7 Energieabhängigkeit für Beta- und Photonenstrahlung

Das Photonen-Äquivalentdosisansprechvermögen zeigt bei der geforderten Freiluftkalibrierung für TLD600/TLD700-Detektoren bzw. LiF in Teflon im Albedodosimeter in Detektorposition (i) eine Energieabhängigkeit innerhalb $\pm 20\%$ bezogen auf ein mittleres Ansprechvermögen im Photonenenergiebereich 15 keV bis 1,2 MeV (81). Panasonic-Dosimeter sind hingegen weniger energieabhängig ($\pm 15\%$).

Bei Betastrahlung wird für die Messung der Äquivalentdosis $H'(0,07)$ in 0,07 mm Tiefe der ICRU-Kugel eine Energieabhängigkeit von $\pm 40\%$ toleriert (82). Die 0,4 mm bzw. 0,9 mm dicken TLD700-Detektoren haben eine E_{\max} -Schwelle bei etwa 0,5 MeV bzw. 1 MeV. In der Praxis kann man davon ausgehen, daß energiearme Betastrahlung bei einem mittleren Körper-Quellen-Abstand von 1 m schon in der Luftschicht (130 mg/cm^3) absorbiert wird, so daß auch ein „ideales Betadosimeter“ im Vergleich dazu keine wesentlich höhere Dosis anzeigt (83).

Damit wird mit einem Personendosimeter am Körperrumpf in Detektorposition (a) eine Teilkörperexposition durch Betastrahlung ausreichend genau angezeigt. Im Bedarfsfall muß ein zusätzliches Teilkörperdosimeter am jeweils repräsentativen Ort der Körperoberfläche getragen werden. TL-Detektoren mit einer Dicke von 0,9 mm und weniger zeigen bei dünnschichtiger Abdeckung im Vergleich zum Filmdosimeter ein vergleichbares bzw. besseres β -Ansprechvermögen für energiearme β -Strahlung.

Im gemischten Beta-/Photonenstrahlungsfeld beispielsweise an Kernkraftwerken bzw. bei der Wiederaufbereitung von Kernbrennstoffen, sind insbesondere 0,4 mm Chips für eine Betadosimetrie ausreichend und 0,9 mm dicken Detektoren vorzuziehen.

8.8 Richtungsabhängigkeit

Der relative Anteil der vom Körper des Dosimeterträgers rückgestreuten Albedoneutronen ist in ausgeprägter Weise von der Neutronenenergie und insbesondere im Energiebereich mittelschneller Neutronen von der Strahlenein-

fallsrichtung abhängig. Dies zeigen die Ergebnisse in Abb. 28 für eine Strahleneinfallrichtung unter 90° und 180° (seitliche bzw. rückseitige Bestrahlung des Phantoms). Der Beitrag energiearmer Neutronen im Streustrahlungsfeld führt auch bei lateralem Strahleneinfall und schnellen Neutronen in ungünstigen Fällen eines gerichteten Cf-252-Strahlungsfeldes zu einem Meßwertverhältnis $M(i, 90^\circ)/M(i, 0^\circ) \geq 0,5$ (siehe auch Abschnitt 6.2, Tab. 12).

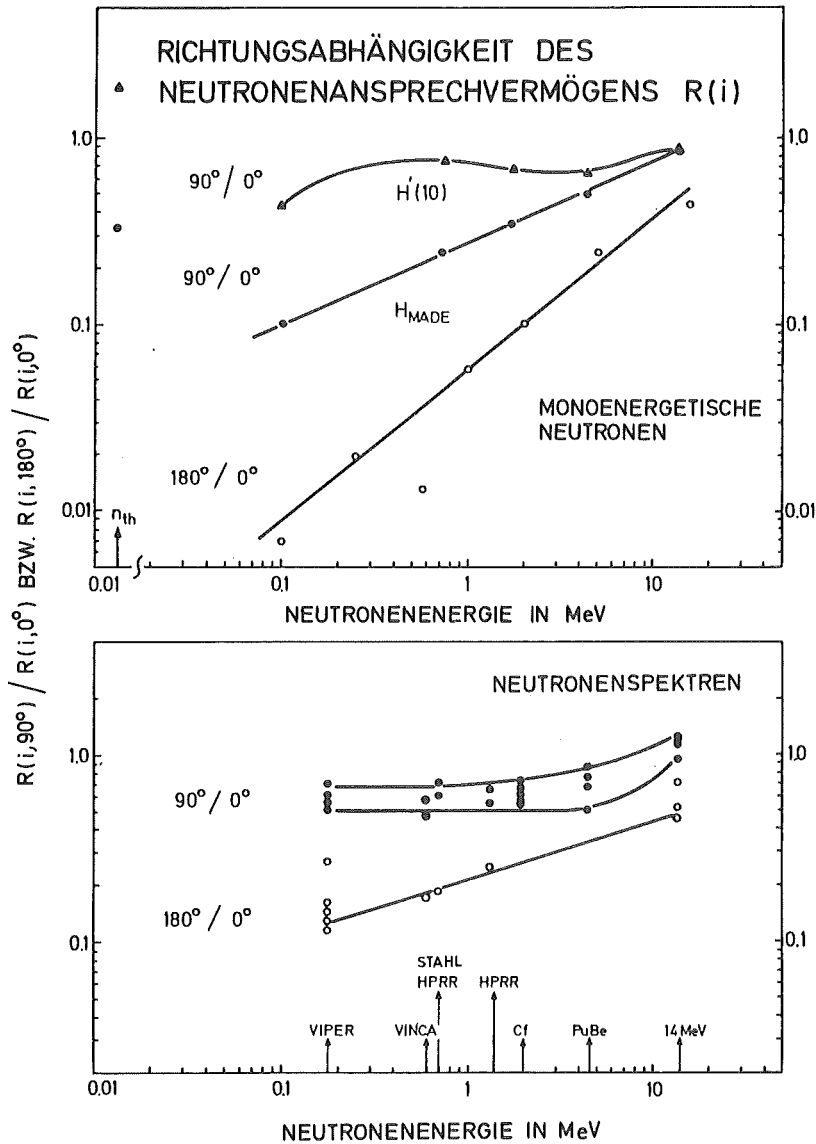


Abb. 28 Richtungsabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens in Abhängigkeit von der Neutronenenergie für das Karlsruher Albedodosimeter, (a) für thermische und monoenergetische Neutronen, (b) für Neutronenspektren. Im Vergleich zur alten Meßgröße H_{MADE} zeigen die Fluenz-Äquivalentdosis-Konversionskoeffizienten für die neue ICRU-Meßgröße $H'(10)$ eine Richtungsabhängigkeit (16)

Im Hinblick auf die neue ICRU- Meßgröße $H'(10)$ läßt das Albedoneutronendosimeter für Einstrahlungen aus dem vorderen Halbraum keine wesentliche Unterbewertung der Neutronendosis erwarten (siehe Abschnitt 5.5).

Im Vergleich zum Albedodosimeter ist die Richtungsabhängigkeit von Kernspurdetektoren beim Makrofol-Detektor größer und beim CR-39-Detektor noch ausgeprägter (siehe Abb. 29).

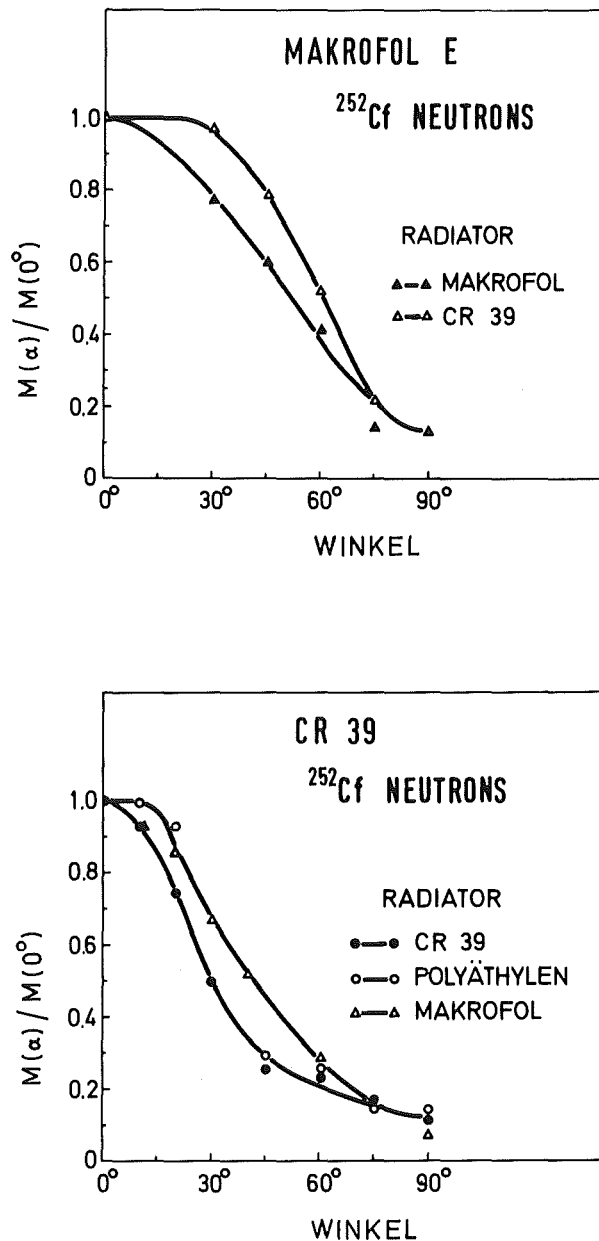


Abb. 29 Richtungsabhängigkeit der Kernspurdetektoranzeige für Cf-252-Neutronen. Makrofol und CR-39 mit unterschiedlichen Radiatoren an der Detektorvorderseite (38)

8.9 Zufällige Komponente der Meßunsicherheit der Neutronendosismessung

Die zufällige Komponente der Meßunsicherheit der Neutronendosismessung wird im wesentlichen durch die Subtraktion der Voranzeige, die Subtraktion eines Photonendosisanteiles sowie das relative Neutronenansprechvermögen $R_N(i)/R_Y(i)$ bestimmt. Sie ist eine Eigenschaft des TLD-Systems, nämlich der Auswertetechnik, der Detektorcharge, der jeweiligen Wärmebehandlungs- und Bestrahlungs-Vorgeschichte. Jede Änderung des TLD-Systems in diesem Sinne kann die zufällige Komponente der Meßunsicherheit verändern.

Das empfohlene Auswerteverfahren sieht deshalb vor, die relative Standardabweichung der Neutronendosisanzeige H für jede Routineauswertung zu ermitteln. Die dazu erforderlichen Daten (siehe Abschnitt 4.4) der verwendeten Chargen sind entweder bekannt und durch Kontrollen ausreichend gesichert (siehe z.B. Tab. 2) oder müssen vor jeder Auswertung teilweise bzw. ganz bestimmt werden. Im Hinblick auf die geforderte untere Neutronen-Nachweisgrenze von 0,1 mSv kann die Überprüfung der Meßunsicherheit u.U. zu einer erneuten Optimierung des TLD-Systems oder zu einer Aussortierung von unbrauchbaren TL-Detektoren führen.

Beispiele für die zufällige Komponente der Meßunsicherheit bei der Neutronendosisbestimmung mit TL-Detektoren bzw. mit Kernspurdetektoren werden in den Abb.16 (siehe Abschnitt 8.2) sowie in Abb. 2 und Abb. 22 (siehe Abschnitt 8.4) für das jeweilige Meßwertverhältnis H_Y/H_N sowie im Anhang A2 gegeben.

8.10 Systematische Meßunsicherheit der Feldkalibrierung

Systematische Meßunsicherheiten ergeben sich im Streustrahlungsfeld hauptsächlich aus den Einflußgrößen Neutronenenergie und Strahleneinfallrichtung auf die Anzeige des Albedodosimeters und des Referenzdosimeters.

Die Methode der Feldkalibrierung im Streustrahlungsfeld wurde soweit optimiert, daß die systematische Meßunsicherheit durch die Strahleneinfallrichtung sowohl im gerichteten als auch im isotropen Strahlenfeld auf die Ermittlung des Neutronenansprechvermögens bzw. Kalibrierfaktors gering sind. Hierbei wurde vorausgesetzt, daß die Anzeige des Albedodosimeters auf die Meßgröße $H'(10)$ bezogen wird und vom Albedodosimeter definitionsgemäß nur Strahlenanteile aus dem vorderen Halbraum angezeigt werden sollen (28).

Als systematische Meßunsicherheit verbleibt demnach die Energieabhängigkeit des Referenzdosimeters. Der Ersatz des bisher eingesetzten "Rem-Counters", der 30 cm Polyäthylenkugel, durch ein LET-Spektrometer (84) bzw. den Ein-

kugelalbedodetektor (67, 85) könnte hier Verbesserungen bringen. Das jetzige Referenzdosimeter überbewertet die Ortsdosis im Streustrahlungsfeld wegen der ausgeprägten Überempfindlichkeit des Ansprechvermögens im Energiebereich unterhalb 10 keV u.U. bis zu einem Faktor 1,5 (85). Dies führt in der Personenüberwachung zu einer konservativen Bestimmung von H_n .

Die Durchführung von Feldkalibrierungen zeigt, daß $R_{ns}(i)$ eine ausgeprägte Ortsabhängigkeit an einer Anlage zeigen kann. Dies ist in Abb. 3 und Tab. 5 für die verschiedenen Anwendungsbereiche N_1 bis N_4 in Abhängigkeit vom Meßverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ wiedergegeben. Bei Zugrundelegung eines konstanten Kalibrierfaktors für den jeweiligen Anwendungsbereich liegt diese Meßunsicherheit für die Anwendungsbereiche N_1 und N_2 innerhalb eines Faktors 2 bzw. $\pm 30\%$.

Wegen der konservativen Bestimmung der Referenzdosis ist auch bei der Zugrundelegung eines mittleren Kalibrierfaktors für die Anwendungsbereiche N_1 und N_2 mit keiner Unterschätzung der Neutronen-Äquivalentdosis zu rechnen. Für die Anwendungsbereiche N_3 und N_4 ist zur Erzielung einer vergleichbaren Meßunsicherheit das Meßverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ heranzuziehen. Der Einsatz von Kernspurdetektoren für den Anwendungsbereich N_4 stellt auch in ungünstigen Fällen eine ausreichende Messung von H_n sicher.

9. ZUSAMMENFASSUNG

Albedodosimeter sind Personendosimeter, die im Gegensatz zum Kernspurfilm Neutronenstrahlung über den gesamten interessierenden Energiebereich nachweisen. Trotz der Energieabhängigkeit des Albedodetektors läßt sich das Zweikomponenten-Albedodosimeter in der vorliegenden Ausführung in Verbindung mit dem Verfahren der Feldkalibrierung in der Routinedosimetrie vorteilhaft einsetzen.

Der vorliegende Bericht gibt eine Zusammenstellung der im BMU-Vorhaben „Erprobung eines Albedoneutronendosimeters“ (1983 - 1986) erzielten Ergebnisse. An diesem Vorhaben beteiligten sich vier amtliche Meßstellen mit vier verschiedenen TLD-Systemen. Ziel des Vorhabens war die Übernahme des von KfK entwickelten universellen Albedoneutronendosimeters und die Optimierung des Meß- und Kalibrierverfahrens zur Ermittlung einer Neutronen-Äquivalentdosis in Streustrahlungsfeldern sowie der probeweise Einsatz des Neutronendosimeters. Innerhalb eines einheitlichen Kalibrierprogrammes wurde das Ansprech-

Neutronen und unmoderierten bzw. moderierten Cf-252-Neutronen ermittelt und Feldkalibrierungen in Streustrahlungsfeldern insbesondere an Reaktoren und im Brennstoffzyklus durchgeführt. Im Anschluß daran erfolgte eine Erprobung des Albedodosimeters innerhalb der Personenüberwachung. Am Ende des Vorhabens sollte die Frage beantwortet werden, ob das Albedoneutronendosimeter mit den verschiedenen TLD-Systemen (insbesondere mit automatischer Auswertung der Detektoren) geeignet ist, das bisherige Neutronenfilmdosimeter in der amtlichen Personendosimetrie zu ersetzen.

Der vorliegende Bericht gibt neben einem umfassenden Überblick über die durchgeführten Arbeiten eine zusammenfassende Darstellung des TLD-Meßverfahrens zur Neutronenmessung, der Kalibriervorschrift in der Routineüberwachung, der Kalibrierergebnisse in rückstreuarmen Neutronenfeldern sowie in Streustrahlungsfeldern an Reaktoren, im Brennstoffkreislauf, beim Umgang mit radioaktiven Neutronenquellen sowie an hochenergetischen Teilchenbeschleunigern. Die relevanten dosimetrischen Eigenschaften der Albedodosimeter werden ausführlich beschrieben, um einerseits die Grundlagen der Albedomeßtechnik aufzuzeigen, um andererseits die möglichen Fehler-einflußgrößen im Bedarfsfall abschätzen zu können.

Die langzeitigen Untersuchungen ergaben, daß das Albedodosimeter die Neutronen-Äquivalentdosis in allen in der Personenüberwachung vorkommenden Streustrahlungsfeldern ausreichend genau anzeigt. Als Zweikomponentendosimeter ermöglicht das Albedodosimeter unabhängig von der Neutronendosismessung gleichzeitig auch die Messung der Äquivalentdosis durch Betastrahlung und Photonenstrahlung in zwei Gewebetiefen entsprechend den Anforderungen an eine Teilkörper- und Ganzkörperdosimetrie. Das Albedodosimeter kann damit das amtliche Neutronenfilmdosimeter hinsichtlich eines Nachweises von harter Betastrahlung, Photonenstrahlung und Neutronenstrahlung ersetzen.

Im Hinblick auf die Trennung der Neutronen- und Photonenanzeige sowie einer Reproduzierbarkeit der Dosismessung eignen sich alle untersuchten automatischen TLD-Systeme in gleichem Maße zum Einsatz in der Albedoneutronendosimetrie.

Kalibrierbestrahlungen in Streustrahlungsfeldern ergaben für die verschiedenen Ausführungen der Albedodosimeterkapselung ein vergleichbares Neutronenansprechvermögen, das sich weniger als $\pm 10\%$ unterscheidet und bei lateraler Einstrahlung im Vergleich zur Frontaleinstrahlung eine relative Anzeige von $0,54 \pm 4\%$ zeigt. Damit werden die Forderungen an ein Personendosimeter zur Anzeige der Meßgröße $H'(10)$ in ausreichender Weise erfüllt (ICRU 39). Das

Albedoneutronendosimeter ermöglicht die Messung der Neutronen-Äquivalentdosis im Meßbereich 0,1 mSv bis etwa 10 Sv.

Das bereitgestellte Kalibrierverfahren in Streustrahlungsfeldern (Feldkalibrierung) verringert die Energie- und Richtungsabhängigkeit der Albedodetektoranzeige und liefert einen ausreichend genauen Kalibrierfaktor für die Personendosimetrie. Der Kalibrierfaktor ist hierbei der Quotient aus Ortsdosis und Anzeige des Albedodetektors.

Durch die Wahl des Referenzdosimeters (TL-Detektor im Zentrum einer Polyäthylenkugel von 30 cm Durchmesser) wird die Ortsdosis im Streustrahlungsfeld hinreichend genau gemessen. Das Referenzdosimeter ist gleichzeitig Phantom für das Albedodosimeter. Im Vergleich zu den üblichen Ortsdosismessgeräten zeigt das Referenzdosimeter eine geringere Energie- und Richtungsabhängigkeit.

Die durchgeführten Feldkalibrierungen in verschiedenen Streustrahlungsfeldern zeigten im Endergebnis, daß die dort gefundenen Neutronenansprechvermögen von Albedodosimetern in vier Anwendungsbereiche N1 bis N4 unterteilt werden können. Innerhalb eines Anwendungsbereiches ist keine wesentlich größere Streuung als $\pm 30\%$ zu erwarten. Die vorhandenen Kalibrierergebnisse - das Neutronenansprechvermögen in Abhängigkeit von dem Meßwertverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ der Neutronendetektoren (a) und (i) - können auf andere Anlagen des gleichen Anwendungsbereiches bzw. auf andere TLD-Systeme übertragen werden. Demnach ist es nicht erforderlich, an jeder Anlage mit jedem TLD-System Feldkalibrierungen durchzuführen.

Innerhalb der Routineüberwachung werden im Anwendungsbereich N1 (Reaktoren, abgeschirmte Linearbeschleuniger) und im Anwendungsbereich N2 (Brennstoffzyklus) zur Auswertung der Personendosimeter konstante Kalibrierfaktoren empfohlen, die eine ausreichend konservative Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis in der Personendosimetrie ermöglichen. Für ungeschirmte Neutronenquellen und Teilchenbeschleuniger (Anwendungsbereich N3 bzw. N4) kann in der Personendosimetrie das Meßwertverhältnis $M_n(a)/M_n(i)$ und die entsprechende Kalibrierkurve zur Dosismessung herangezogen werden. In Ausnahmefällen wird an Beschleunigern, bei denen der Bestrahlungsraum zugänglicher Experimentierraum ist, der TLD-Detektor mit einem Kernspurätzdetektor kombiniert. Damit erhält man im Bedarfsfall eine zusätzliche Anzeige der Neutronen-Äquivalentdosis im Energiebereich oberhalb 3 MeV.

Die Erprobung der Albedodosimetriesysteme durch die beteiligten Meßstellen unter Verwendung verschiedener TLD-Systeme zeigte innerhalb der Routineüberwachung

- für den überwachten Personenkreis an Reaktoren/Beschleunigern nur in relativ wenigen Fällen geringe Dosen,
- im Anwendungsbereich Brennstoff-Zyklus sowie beim Umgang mit Cf-252-Neutronenquellen u.U. recht häufig relativ hohe Neutronenexpositionen, die mit dem bisherigen Neutronenfilmdosimeter nicht nachweisbar waren,
- die Zweckmäßigkeit einer Personendosimetrie mit dem Albedodosimeter in all den Fällen, in denen bei bestimmten Arbeiten in Neutronenfeldern eine Neutronen-Äquivalentdosis von etwa 10 bis 20 % der Photonendosis erwartet wird.

Die am BMU-Vorhaben beteiligten amtlichen Meßstellen halten die von ihnen erprobten Albedodosimetriesysteme mit der zugrundegelegten Auswerte- und Kalibriertechnik für einen Einsatz in der amtlichen Personendosimetrie für geeignet. Eine entsprechende Zulassung als amtliches Dosimeter liegt seit Ende 1986 vor. Damit wird in der BRD das bisherige Neutronenfilmdosimeter durch das Albedodosimeter ersetzt.

Zur Einführung des Albedodosimeters innerhalb der amtlichen Personenüberwachung wurde von den amtlichen Meßstellen ein entsprechendes Merkblatt für die Anwender ausgearbeitet. Danach soll das Albedodosimeter nur in einem Anwendungsbereich getragen werden. Die Meßstellen beraten die Anwender bei der Festlegung des Anwendungsbereiches.

In einem speziellen Anhang werden Hinweise für in der Praxis vorkommende Neutronenfelder und die dort zu erwartenden Photonen- und Neutronen-Äquivalentdosisleistungen gegeben. Als Kriterium für den Einsatz des Neutronenalbedodosimeters gelten die nach der StrlSchV und der RöV vorgegebenen Jahresgrenzwerte für Ganzkörperexposition. Danach ist die Neutronen-Äquivalentdosis in all den Fällen mit einem Personendosimeter zu ermitteln, in denen

- in Neutronenstrahlenfeldern oder in Photonen-Neutronenstrahlenfeldern eine Neutronen-Äquivalentdosis bzw. eine Photonen- und Neutronen-Äquivalentdosis mit $H_N/H_Y \geq 0,2$ von ≥ 5 mSv pro Jahr erwartet werden kann oder
- schon bei kleineren Neutronen-Äquivalentdosen insbesondere beim Umgang mit spaltbarem Material Kritikalität innerhalb der Strahlenschutzüberwachung zu berücksichtigen ist bzw.
- Unfälle in Strahlungsfeldern mit zeitlich veränderlicher bzw. hoher Neutronendosisleistung nicht ausgeschlossen werden können.

Es hat sich u.U. als zweckmäßig erwiesen, zur Photonendosimetrie weiterhin das amtliche Filmdosimeter bzw. Glasdosimeter zu tragen und das Albedoneutro-
ndosimeter nur zur Bestimmung der Neutronen-Äquivalentdosis heranzu-
ziehen. Dies trifft beispielsweise dann zu, wenn es insbesondere die Aufsichts-
behörde für erforderlich hält, wenn der Umgang mit Neutronenquellen nicht in
jedem Überwachungszeitraum vorkommt bzw. eine Neutronenexposition nur bei
Arbeiten in bestimmten Neutronenfeldern zu erwarten ist. Für diese Einsätze
wurden bisher zusätzlich zum amtlichen Photonendosimeter Neutronenfilm-
dosimeter getragen.

Die Vorteile des Albedodosimeters werden in der Neutronenüberwachung so
lange genutzt werden, bis neue energieunabhängige Festkörper-Neutronen-
dosimeter für den Routineeinsatz zur Verfügung stehen. Es ist jedoch schon
heute abzusehen, daß auch nach Entwicklung und Bereitstellung von Kernspur-
ätzdetektoren bzw. anderen Detektoren für schnelle Neutronen der Albedo-
detektor weiterhin zum Nachweis energiearmer Neutronen eingesetzt werden
wird.

Die Autoren bedanken sich insbesondere bei Herrn David, Herrn Nahrstedt,
Herrn Ritzenhoff und Herrn Morfeld von den beteiligten amtlichen Meßstellen
für die langjährige Mitarbeit bei der Erprobung und Einführung des
Albedodosimeters und bei Herrn Dr. Alberts und Herrn Kluge, PTB, sowie Herrn
Dr. Schraube, GSF, und Herrn Schwarz, KfK, für die Unterstützung bei der
Kalibrierung der Albedodosimeter.

10. LITERATURVERZEICHNIS

- (1) Cheka, J.S., Recent Developments in Film Monitoring of Fast Neutrons, *Nucleonics* 12 (6), 40 (1954).
- (2) Piesch, E., Zur Dosimetrie schneller Neutronen mit Kernspurfilmern, *Atompraxis* 9, H5, 179 (1963).
- (3) Becker, K., Fehlerquellen bei der Neutron-Personendosismessung mittels Kernspuremulsionen, *Atomkernenergie* 8, 74 (1963).
- (4) Dudley, R.A., *Dosimetry with Photographic Emulsion in Radiation Dosimetry*. (New York: Academic Press). Vol. II, 326 (1966).
- (5) Kiefer, H. and Maushart, R., *Radiation Protection Measurements*, Oxford, Pergamon Press (1972).
- (6) Sayed, A.M. and Piesch, E., Study of the latent Fading of NTA Film and Track-etch Detectors, *KfK 2032* (1974).
- (7) Burger, G., David, J., Schraube, H., Die speziellen Probleme der Neutronen-Personendosimetrie, *Fs-75-12-T*, 176 (1976).
- (8) David, J., Höfert, M. and Ritzenhoff, K.H., New Results on the Detection of Neutrons by Track Emulsions. Proc. 16th Annual Meeting of Fachverband für Strahlenschutz, Munich, GSF Bericht A4/83 und FS-83-30-T, 189, (1983).
- (9) Höfert, M., Piesch, E., Neutron Dosimetry with Nuclear Emulsions, *Neutron Dosimetry in Radiation Protection, Radiat. Prot. Dosim.*, Vol. 10, 1-4, 189 (1985).
- (10) Korba, a. and Hoy, J.E., A Thermoluminescent Personnel Neutron Dosimeter, *Health Phys.* 18, 581 (1970).
- (11) Harvey, J.R., Hudd, W.H:R. and Townsend, S., Personal dosimeter for Measuring the Dose from Thermal and Intermediate Energy Neutrons and from Gamma and Beta Radiations, Proc. IAEA Symp. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, STI/PUB/318, Vienna: IAEA, 199 (1973).
- (12) Hankins, D.E., A Small Inexpensive Albedo-Neutron Dosimeter, LA-5261 (1973).
- (13) Piesch, E. and Burgkhardt, B. LiF Albedo Dosimeters for Personnel Monitoring in Fast Neutron Radiation Fields, Proc. IAEA Symp. Neutron

- Monitoring for Radiation Protection Purposes, STI/PUB 318, Vienna: IAEA, 31 (1973).
- (14) Piesch, E., Burgkhardt, B., Comparison of Albedo Dosimeters and Nuclear Track Detectors for Neutron Monitoring, 3rd IRPA Congress Washington, (1973).
 - (15) Lautenbach, G., Leakage Neutron Spectrum Measurements with the PNN-Spectrometer (ECN-Petten). 7th DOE Workshop on Personnel Neutron Dosimetry, PNL-2807, 17 (1978).
 - (16) Piesch, E., and Burgkhardt, B., Advances in Albedo Neutron Dosimetry, Proc. IAEA Symp. Advances in Radiation Protection Monitoring, 207 (1979).
 - (17) Alberts, W.G., Cosack, M., Kluge, H., Lesiecki, H., Wagner, S. and Zill, H.W., European Workshop on Neutron Dosimetry for Radiation Protection, PTB-ND-17 (1979).
 - (18) Gibson, J.A.B., and Piesch, E., Neutron Monitoring for Radiological Protection, IAEA Technical Reports Series, No. 252 (1985).
 - (19) Burgkhardt, B., Piesch, E., Seyffer, U., Messung des Neutronen-Streustrahlungsfeldes im GKN Neckarwestheim, classified report (1979).
 - (20) Burgkhardt, B., Krauss, O., Piesch, E., Neutronendosismessungen im Streustrahlungsfeld der Kompaktzyklotron-Neutronentherapieanlage im DKFZ in Heidelberg, Med. Physik 61 (1979).
 - (21) Burgkhardt, B., Piesch, E., Schmid, S., Messung der Neutronenstörstrahlung im Strahlenfeld des medizinischen Linearbeschleunigers Mevatron 20, Med. Physik, 67 (1979).
 - (22) Piesch, E., Burgkhardt, B., Measurement of stray neutron fields in the containment of nuclear reactors, Proc. Euratom 4th Symp. Neutron Dosimetry, Neuherberg, EUR-7448, Vol. 1, 549 (1981).
 - (23) Knöfel, T.M.J., Schraube, H., Ein Beitrag zur Kalibrierung von Albedo-Neutronen-Personendosimetern. FS-83-30-T, 127 (1983).
 - (24) Piesch, E., Burgkhardt, B., A universal beta/gamma/neutron albedo doseimeter for personnel monitoring, Radiat. Prot. Dosim. 6, 281 (1984).
 - (25) Piesch, E., Burgkhardt, B., Universal beta-gamma-neutron albedo doseimeter for commercial TLD cards and track etch detectors, Proc. 6th IRPA Congr., Berlin, Vol. 3, 1147 (1984).

- (26) Piesch, E., Burgkhardt, B., Albedo neutron dosimetry, in Neutron Dosimetry in Radiation Protection, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 10 No. 1-4, 175 (1985).
- (27) Piesch, E., Calibration techniques for personnel dosimeters in stray neutron fields, Radiat. Prot. Dosim. 10, 159 (1985).
- (28) Piesch, E., Burgkhardt, B., Feldkalibrierung von Albedodosimetern in Neutronenstrahlungsfeldern, KfK 4304, in Vorbereitung (1988).
- (29) Piesch, E., Burgkhardt, B., Thermolumineszenz- und Phosphatglas-Dosimetriesysteme im Bereich kleiner Dosen: Vorstellung eines Testprogrammes und Ergebnisse von 43 Systemen, KfK 2626, (1978).
- (30) Piesch, E., Burgkhardt, B., Environmental Monitoring, European interlaboratory test programme for integrating dosimeter systems, Commission of the European Communities, Radiological Protection - No 29, EUR 8932 (1984).
- (31) DIN 25 483, Verfahren zur Umgebungsüberwachung mit integrierenden Festkörperdosimetern (1987).
- (32) Höfert, M., Ruffsnoe, R.C., Tuyn J.W.N., Wittekind, D., From personnel dose to personal dose, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 12, No. 2, 187 (1985).
- (33) Anforderungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt an wiederverwendbare Orts- und Personendosimeter mit Detektoren aus Thermolumineszenz- oder Photolumineszenz-Material, PTB-Mitteilungen 96 (2/1986)
- (34) Burgkhardt, B., Hassib, G.M., Piesch, E., Development of a new high sensitive albedo dosimeter for routine monitoring, Proc. Euratom 4th Symp. Neutron Dosimetry, Neuherberg, Vol. 1, Rep. EUR-7448, 641 (1981).
- (35) Piesch, E., Burgkhardt, B., Hassib, G.M., A universal albedo neutron dosimeter combined with a track etch detector, Proc. 9th DOE Workshop Personnel Neutron Dosimetry, Las Vegas, PNL-SA-10714, 59 (1982).
- (36) Griffith, R.V., Fisher, J.C., Tommasino, L., Zapparoli, G., Development of a personnel neutron dosimetry/spectrometer, Proc. 5th Int. IRPA Congr., Jerusalem, Vol. 2, 169 (1980).
- (37) Griffith, R.V., McMahon, T., Development of an operational multi-component personnel neutron dosimeter/spectrometer DOSPEC, Proc. 6th IRPA Congr., Berlin, Vol. 3, 1239 (1984).

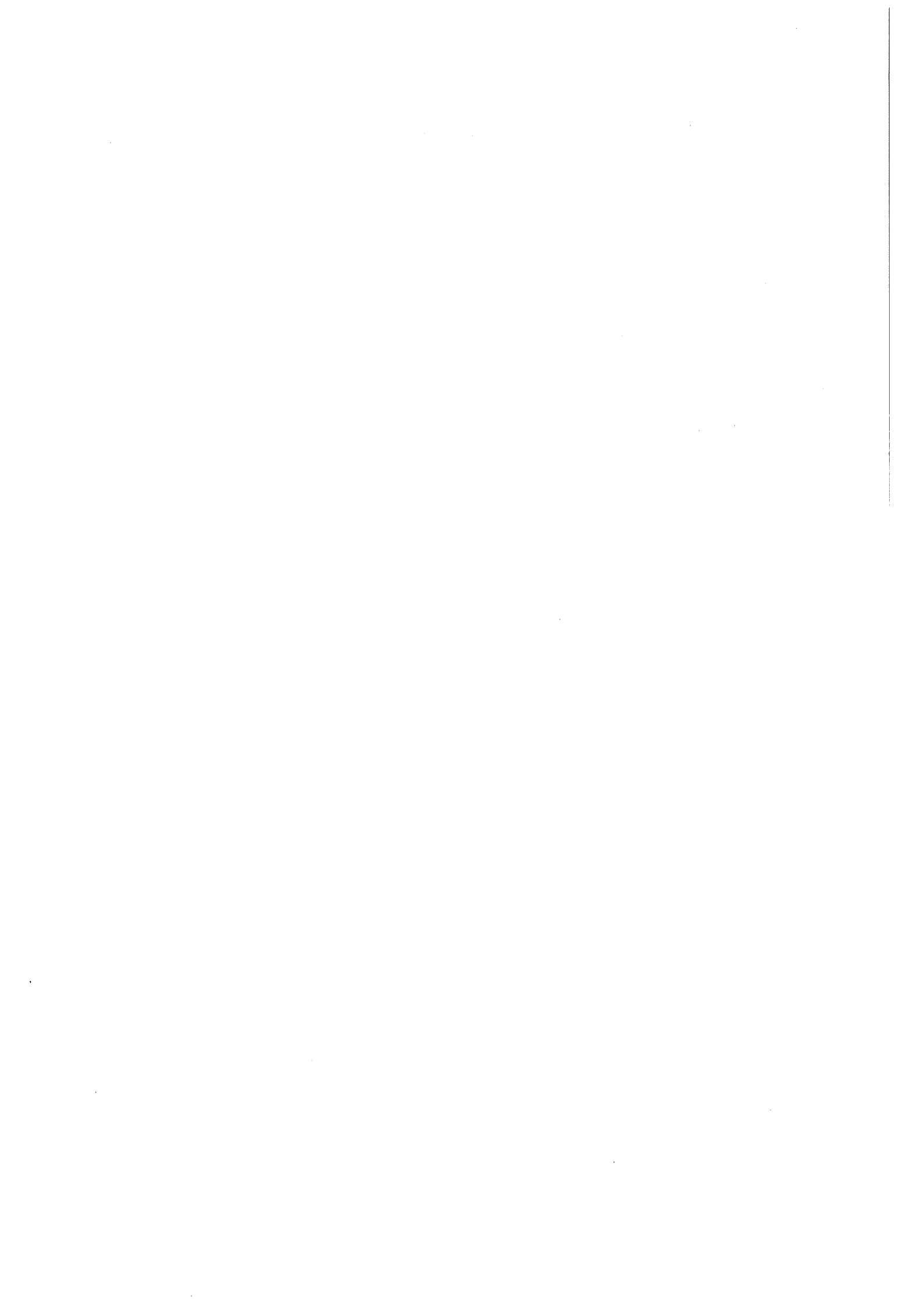
- (38) Piesch, E., Jasiak, J., Urban, M., Makrofol and CR-39 recoil track etch detectors as a supplement of a universal albedo neutron dosimeter, Nucl. Tracks 8, 1-4, 323 (1984).
- (39) ICRU Report 39, Determination of Dose Equivalent Resulting from External Radiation Sources (1985).
- (40) DIN 6802, Teil 1, Neutronendosimetrie, Begriffe und Benennungen (1978), Neufassung 1988.
- (41) DIN 6814, Teil 3, Begriffe und Benennungen in der radiologischen Technik; Dosisgrößen und Dosiseinheiten (1986).
- (42) Booz, J., Dietze, G., (Edit.), Radiation Protection Quantities for External Exposure, Proceedings of a Seminar held at Braunschweig (FRG), Radiat. Prot. Dosim., Vol. 12, No. 2 (1985).
- (43) Wagner, S.R., Can the New ICRU Operational Quantities for Individual Monitoring be Measured?, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 12, No. 2 (1985).
- (44) Böhm, J., Piesch, E., Regulla, D., How accurately do Thermoluminescence and Photoluminescence Dosimetry Systems Indicate the New ICRU Dose Quantities for Individual Monitoring?, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 17, 1-4, 25 (1986).
- (45) Ergebnisdarstellung der am BMU-Vorhaben beteiligten Meßstellen, Sitzungsprotokoll 1985, unveröffentlicht.
- (46) Hofmann, B., Burgkhardt, B., Piesch, E. and Schwarz, W., Neutronen-Dosimetrie während der Inbetriebsetzung des Kernkraftwerkes Mülheim-Kärlich, in Vorbereitung.
- (47) Singh, D., Piesch, E., Burgkhardt, B., Investigation of room return neutrons and their importance for the calibration of albedo dosimeters, Proc. 5th Symp. on Neutron Dosimetry, Neuherberg, EUR 9762, Vol. 1, 617 (1985).
- (48) Ergebnisdarstellung der am BMU-Vorhaben beteiligten Meßstellen, Sitzungsprotokoll 1986, unveröffentlicht.
- (49) Swaja, R.E., Sims, C.S., Greene, R.T., 1983 ORNL Intercomparison of Personnel Neutron and Gamma Dosimeters, ORNL-6126 (1985).
- (50) Swaja, R.E., Oyan, R., Sims, C.S., Eleventh ORNL Personnel Dosimetry Intercomparison Study, 1985, ORNL-6296 (1986).

- (51) Swaja, R.E., Weng, P.S., Sims, C.S., Yeh, S.H., Summary and Analysis of the 1986 ORNL Personnel Dosimetry Intercomparison Study, ORNL-6378 (1987).
- (52) Anforderungen an die nach Landesrecht zuständigen Meßstellen nach § 63, Abs. 3, Stz 1, StrlSchV und § 40, Abs. 2, Satz 4, RöV, GMBI 22, S. 141 (1979).
- (53) Piesch, E., Messung der Dosis im Strahlenschutz, 16. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz, GSF Bericht A4/83 und FS-83-30-T, 87-104 (1983).
- (54) Ritzenhoff, unveröffentlichte Ergebnisse.
- (55) Böhm, J., Piesch, E., Regulla R. (Hrsg.), Neue Meßgrößen für Personendosimeter - Ergebnisse des Vergleichsprogramms 1985. PTB-DOS-14 und FS-86-38 AKD (1986).
- (56) Burgkhardt, B., Piesch, E., Albedo-Neutronendosimetrie, KfK-Nachrichten 1/78, 40 (1978).
- (57) Burgkhardt, B. Piesch, E., Urban, M., Measurement of the neutron dose equivalent component of the natural background using ECE polycarbonate detector and boron-10 radiator, Nuclear Tracks and Rad. Meas., Vol. 12, No. 1-6, 573 (1986).
- (58) David, Nahrstedt, unveröffentlichte Ergebnisse.
- (59) Ritzenhoff, unveröffentlichte Ergebnisse.
- (60) Piesch, E., Burgkhardt, B., Multipurpose neutron dosimeter system with standardized evaluation technique for TLD and track etch detectors, Tenth DOE Workshop Acapulco, PNL-SA-12352, 177 (1983).
- (61) Urban, M., Burgkhardt, B., Piesch, E., Temperature and humidity dependent fading of neutron induced recoil and α -particle tracks in Makrofol E., Nucl. Tracks 8 1-4, 175 (1984).
- (62) Burgkhardt, B., Piesch, E., Neutronenansprechvermögen verschiedener Anordnungen von Makrofol-Kernspurdetektoren in Kontakt mit B(n, α)-Konvertern, HS-Jahresbericht 1985, KfK 4062, 186 (1986).
- (63) Jasiak, J., Burgkhardt, B., Piesch, E., A passive neutron dose equivalent meter for environmental and area monitoring in the low dose range, Proc. 5th Symp. on Neutron Dosimetry, Neuherberg, EUR 9762, Vol. 1, 459 (1985).

- (64) Burgkhardt, B., Heinzelmann, M., Piesch, E., Viragh, E., Statistical errors of dose estimation in personnel neutron monitoring with albedo dosimeters, Nucl. Instrum. Methods, Vol. 160, 533 (1979).
- (65) Burgkhardt, B., Schwarz, W., Evaluation Technique for Different TL Albedo Dosemeter Systems Using Automatic Read-out, Radiat. Prot. Dosim. Vol. 17, 1-4, 131 (1986).
- (66) Piesch, E., Burgkhardt, B., Venkataraman, G., Study of the phantom distance effect of albedo neutron dosimeters, Radiat. Prot. Dosim. 3, 1-2, 39 (1982).
- (67) Piesch, E., Burgkhardt, B., Comper, W., The single sphere Albedo system - A useful technique in neutron dosimetry, Radiat. Prot. Dosim. 10, 1-4, 147 (1985).
- (68) Hassib, G.M., Kasim, S.A., Piesch, E., Neutron energy dependence of different track etch detectors, Radiat. Eff., Vol. 45, 57 (1979).
- (69) Piesch, E. (Editor), Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305 (1987).
- (70) Cross, W.G., Arneja, A., Kim, J.L., Response of CRNL Neutron Dosimeters in Joint European/USA/Canadian Irradiations, in Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305, 29 (1987).
- (71) Hankins, D.E., Results obtained at LLNL from the European/US/Canadian Neutron Dosimeter Irradiations - Nov. 1986, in Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305, 43 (1987).
- (72) Parkhurst, M.A., Hadlock, D.E., Summary of Results obtained at Pacific Northwest Laboratory from Joint Neutron Irradiations of Neutron Track Detectors, in Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305, 59 (1987).
- (73) Al-Najjar, S., Burgkhardt, B., Piesch, E., EURADOS-CENDOS/USA/Canadian Joint Neutron Irradiation 1986: Results from Karlsruhe Nuclear Research Center, in Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305, 5 (1987).

- (74) Azimi-Garakani, D., Flores, B., Tommasino, L., Torri, G., Intercomparison Results of the CENDOS Irradiations, in Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305, 11 (1987).
- (75) Bartlett, D.T., Steele, J.D., Gilvin, P.J., NRPB Neutron Personal Dosimeter: Results of Joint EURADOS-CENDOS/USA/Canadian Neutron Irradiations 1986, in Neutron Irradiations of Proton-Sensitive Track Etch Detectors: Results of the Joint European/ USA/Canadian Irradiations organized by EURADOS-CENDOS (1986), KfK 4305, 17 (1987).
- (76) Al-Najjar, S.A.R., Ninomiya, K. and Piesch, E., Properties of Electrochemically Etched CR-39 Plastics for Fast Neutron Dosimetry, 6th Neutron Dosimetry Symp., Neuherberg (1987).
- (77) Piesch, E., Burgkhardt, B., Sayed, A.M., Supralinearity and re-evaluation of TLD600 and TLD700 in mixed neutron and gamma fields, Proc. 4th Int. Conf. Luminescence Dosimetry, Krakow, 1201 (1974).
- (78) Burgkhardt, B., Piesch, E., Estimation of the build up of zero dose reading in ⁶LiF thermoluminescence dosimeters due to neutron produced tritium, Radiat. Prot. Dosim., Vol. 2, 105 (1982).
- (79) International Commission on Radiological Protection, Data for Protection Against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication No. 15, ICRP Publication No. 21, Pergamon Press, Oxford (1973).
- (80) Development of Personal Neutron-Dosimeters Based on Track Etch Detectors, Proc. Eurados Workshop, Harwell, May 1987, Radiat. Protect. Dosim., Vol. 20, Nos. 1-2 (1987).
- (81) Burgkhardt, B., Piesch, E., TLD-Ergebnisse für die Alnor-Dosimeterhalterung in der universellen Albedokapsel und in der Alnorplakette, in PTB-DOS-14, 168 (1986).
- (82) Christensen, P., Herbaut, Y., Marshall, T.O., Personal Monitoring for External Sources of Beta and Low Energy Photon Radiation, Radiat. Protect. Dosim., Vol. 18, No. 4, 241 (1987).
- (83) Piesch, E., Johns, T.F., Personnel Monitoring for Beta Rays, Radiat. Protect. Dosim., Vol. 4, 71 (1983).
- (84) Microdosimetric Counters in Radiation Protection, Proc. Eurados Seminar Homburg, Radiat. Protect. Dosim., Vol. 9, No. 3 (1984).

- (85) Piesch, E., Burgkhardt, B., Measurement of neutron field quantities using the single sphere albedo technique, Proc. 5th Symp. on Neutron Dosimetry, Neuherberg, EUR 9762, Vol. 1, 403 (1985).



ANHANG A:

BESCHREIBUNG DER AUSWERTETECHNIK ZUR NEUTRONENDOSISMESSUNG MIT VERSCHIEDENEN TLD-SYSTEMEN

A1 Einleitung

Grundlage einer Routineanwendung des Albedodosimeters unter Verwendung eines automatischen TLD-Systems ist die Optimierung der Auswertetechnik im Hinblick auf

- Trennung von Neutronen- und Photonenanzeige,
- Reproduzierbarkeit der Neutronen- und Photonenanzeige,
- geringe Nullanzeige unbestrahlter Detektoren,
- Wiederverwendung nach einer Regenerierung im Auswertegerät,
- Einsatz eines Rechners zur Auswertung und Speicherung von Glowkurven.

Anhang A gibt Beispiele einer solchen Optimierung für die TLD-Systeme Alnor, Harshaw, Panasonic und Vinten.

Für jedes individuelle TLD-System (Gerät und Detektoren) müssen diese Parameter überprüft bzw. neu bestimmt werden. Die hier dargestellten Methoden zur Optimierung der Auswertetechnik sowie die gefundenen Ergebnisse können nur Anhaltspunkte für eigene Untersuchungen im Labor sein, das ein TLD-System zur Albedodosimerie installieren möchte.

A.2 Auswertetechnik für das TLD-System Alnor

(Beitrag Meßstelle KfK)

Im Dosimetriesystem Alnor DOSACUS werden die Detektoren zur Auswertung aus der Halterung mit einer Vakuumnadel entnommen, in die Meßkammer gehoben und dort mit einem heißen Stickstoffstrom angeblasen. Folgende Auswerteparameter lassen sich zur Optimierung des Systems heranziehen:

- die Stickstofftemperatur bis maximal 380° C,
- der Stickstoff-Durchfluß bis etwa 5 l/min,
- die Ausheizzeit,
- die Integrationszeit, über die das TL-Licht unter Verwendung der digitalisierten Glowkurve im On-line-Rechner integriert wird.

Die Abb. A1 zeigt die relative Anzeige von TLD600-Detektoren der Dicke 0,9 mm bezogen auf die Anzeige bei 380° C in Abhängigkeit von Stickstofftemperatur und Stickstoff-Durchfluß nach einer Bestrahlung mit Neutronen entsprechend einer gammaäquivalenten Anzeige von 25 mSv. Mit zunehmender Temperatur nähert sich die relative Anzeige einem konstanten Wert, d.h. die Auswertung der interessierenden Glowpeaks ist „vollständig“. Dies wird bestätigt durch eine Zweitauswertung bei 380° C, bei der im besten Fall nur noch eine relative „Rest“-Anzeige von etwa 1 % der Anzeige der ersten Auswertungen erreicht wird. Dies gilt für einen Stickstofffluß von 3l/min. Bei 4 l/min ist die Leistung des Ofens für eine Aufheizung auf Temperaturen größer als 310° C nicht mehr ausreichend. Die maximale Temperatur ist jedoch nicht für eine Routineauswertung zu empfehlen, denn mit steigender Temperatur erhöht sich auch der Nulleffekt (bei einer Auswertung ohne Detektoren) und die die untere Nachweisgrenze mitbestimmende Schwankung des Nulleffektes (siehe Abb. A1, untere Kurve). Außerdem schmelzen erfahrungsgemäß bei höheren Temperaturen als 350° C die Detektoren nach der Auswertung in den Kunststoff der Dosimeterkapsel ein.

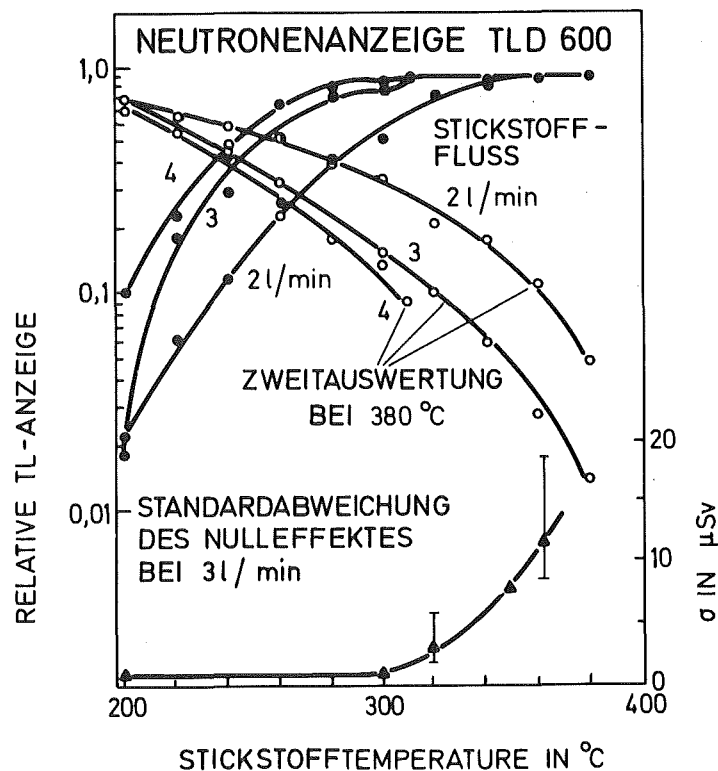


Abb. A1 Relative auf eine Auswertung bei 380° C bezogene Anzeige von TLD 600-Detektoren der Dicke 0,9 mm nach Neutronenbestrahlung entsprechend einer Anzeige von 25 mSv für eine Erst-Auswertung bzw. Zweitauswertung in Abhängigkeit von der Stickstofftemperatur im TLD-System Alnor

Optimale Auswertebedingungen für TLD 600-Detektoren nach Neutronenbestrahlung werden bei der Stickstofftemperatur von 340° C und dem Stickstofffluß von 3l/min bei einer Auswertzeit von 11 s gefunden.

Bei der Auswertung von TLD 700-Detektoren wäre eine niedrigere Temperatur von 300° C ausreichend, weil hier der Glowpeak 6 keinen wesentlichen Beitrag zur Anzeige liefert. Alle Detektoren des Albedodosimeters werden jedoch bei der für den Neutronendetektor erforderlichen höheren Auswertetemperatur ausgewertet, weil kurzzeitige Änderungen der Stickstofftemperatur während der Routineauswertung nicht möglich sind. Auch im Interesse einer gleichen Vorgeschichte der Wärmebehandlung beider Detektorarten sollte die Auswertetemperatur nicht bei den TLD 700-Detektoren verkürzt werden.

Abb. A2 zeigt für die 0,9 mm dicken Detektoren typische Glowkurven im Stickstofftemperaturbereich 300° C bis 340° C und bei einem Durchfluß von 3 l/min nach einer Gamma- bzw. Neutronenbestrahlung entsprechend einer Anzeige von etwa 25 mSv. Demnach ist bei Neutronenbestrahlung eine längere Integrationszeit von mindestens 11 s angezeigt, bei Gammabestrahlung sind 7 s ausreichend. Zudem läßt sich am Verlauf der Glowkurve im Bereich von 11 s ein Neutronenanteil qualitativ erkennen.

TLD 600/700-Detektoren von 0,4 mm Dicke erfordern erwartungsgemäß eine geringere Stickstoff-Temperatur, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Im Datenblatt Tab. A1 sind die entsprechenden Werte für 0,4 mm dicke Detektoren in Klammern aufgeführt.

Abb. A3 zeigt für das optimierte TLD-System Alnor die relative empirische Standardabweichung einer Einzelmessung bestimmt aus den Anzeigen von 10 Detektoren als Funktion der Neutronen- bzw. Gammadosisanzeige. Es können demnach Photonen-Äquivalentdosen von 0,1 mSv mit einer relativen Standardabweichung von 5 % und höhere Dosen mit 2 % gemessen werden, während die entsprechenden Werte für die Neutronenanzeige bei 10 % bzw. 3 % liegen, bedingt durch die Differenzbildung aus den TLD 600/TLD 700-Meßwerten und die erforderliche längere Integrationszeit.

Die von der Meßstelle im KfK Karlsruhe für das TLD-System Alnor benutzte Auswertetechnik wird im Datenblatt in Tab. A1 näher erläutert.

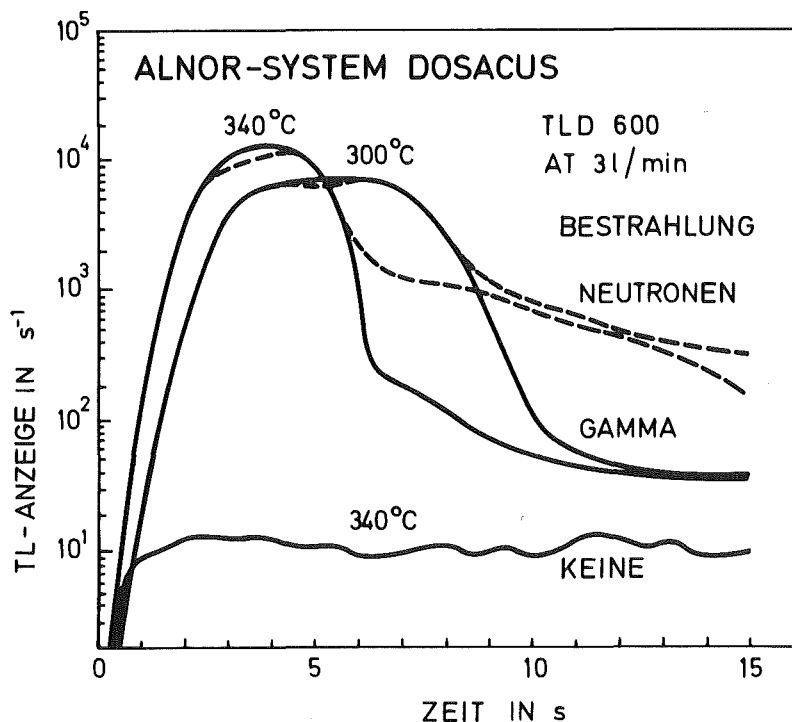


Abb. A2 Typische normierte Glowkurven von 0,9 mm dicken TLD 600 für optimierte Auswertbedingungen nach Neutronen- und Photonenbestrahlung bei 300°C und 340°C

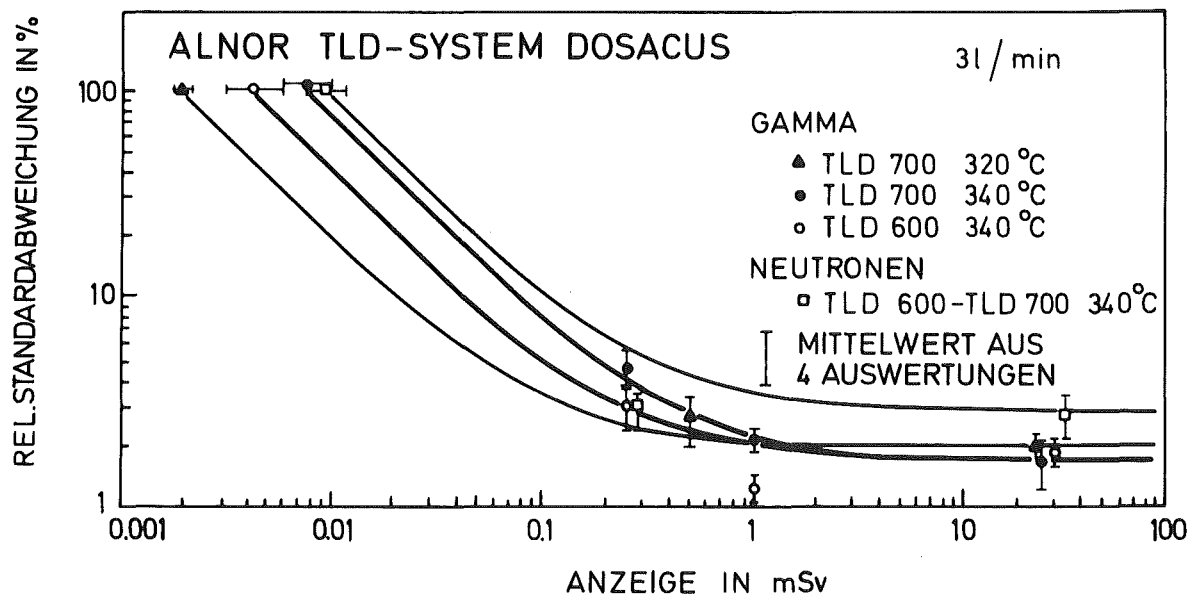


Abb. A3 Relative Standardabweichung in Abhängigkeit von der TL-Anzeige für 0,9 mm dicke Detektoren bei optimierten Auswertbedingungen (340°C) des Alnor-Dosimetriesystems

Abb. A3 zeigt für das optimierte TLD-System Alnor die relative empirische Standardabweichung einer Einzelmessung bestimmt aus den Anzeigen von 10 Detektoren als Funktion der Neutronen- bzw. Gammadosisanzeige. Es können demnach Photonen-Äquivalentdosen von 0,1 mSv mit einer relativen Standardabweichung von 5 % und höhere Dosen mit 2 % gemessen werden, während die entsprechenden Werte für die Neutronenanzeige bei 10 % bzw. 3 % liegen bedingt durch die Differenzbildung aus den TLD 600/TLD 700-Meßwerten und die erforderliche längere Integrationszeit.

Die von der Meßstelle im KfK Karlsruhe für das TLD-System Alnor benutzte Auswertetechnik wird im Datenblatt in Tab. A1 näher erläutert.

Tab. A1 Datenblatt für das TLD-System Alnor

Auswertegerät:	Automatisches TLD-System der Fa. Alnor, Type DOSACUS
Auswerteprinzip:	heißer Stickstoff
Detektorhalterung:	Halter mit kodierten Kunststoffschiebern mit 4 Vertiefungen für lose Detektoren
Detektoren:	$^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ $3 \times 3 \times 0,9 \text{ mm}^3$ und $(3 \times 3 \times 0,4 \text{ mm}^3)$
Regenerierung:	Zweite Auswertung im Gerät (Parameter 360° C , 3 l/min, 11 s), bei Bedarf lose Detektoren im Ofen bei $400^\circ \text{ C}/1 \text{ h}$ und $100^\circ \text{ C}/3 \text{ h}$
Temperung:	Detektoren in Kunststoffhalterungen und Magazinen im Ofen bei $80^\circ \text{ C}/30 \text{ min}$
Auswerteparameter:	Stickstofftemperatur 340° C und (310° C) Stickstoffdurchfluß 3 l/min Ausheizzeit 11 s
Voranzeige $\pm 1\text{s}$ -Wert:	$0,04 \pm 0,02 \text{ mSv}$ und $(0,08 \pm 0,03 \text{ mSv})$, abhängig von der Detektorcharge (siehe Tab. 2, Abschnitt 4.3.2) Korrektion einer mittleren bzw. individuellen Voranzeige erforderlich
Photonenansprechvermögen:	Korrektion des individuellen Gamma-Ansprechvermögens erforderlich
Meßwertverarbeitung:	Anschluß an HP 9816 Rechner über HP-IB Interface, Digitale Glowkurve über 110 Kanäle (11 s), Integrationszeit für TLD700: 7 s Integrationszeit für TLD600: 11 s Für TLD 600 quantitative Kontrolle des Neutronenanteiles über das Glowpeakverhältnis Maximum/Ende, Speicherung aller Glowkurven auf Diskette zur Beweissicherung in der Routinedosimetrie, Meßwertbestimmung nach Berücksichtigung von Voranzeige, natürlicher Strahlendosis und individuellem Ansprechvermögen

A3 Auswertetechnik für das TLD-System Harshaw

(Beitrag Meßstelle MPA)

Die von der Meßstelle im Staatlichen Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen für die Auswertung von Albedodosimetern benutzte Auswertetechnik wird in Tab. A2 näher beschrieben. Abb. A4 zeigt die Einzelteile des Albedodosimeter-Systems Harshaw mit einem zusätzlichen Kernspurätzdetektor.

Tab. A2 Datenblatt für das TLD-System Harshaw

Auswertegerät:	TLD-System Harshaw, Type 2080/2000 C (in Vorbereitung: Auswerteautomat Harshaw, Modell 8000)
Auswerteprinzip:	Planchet-Aufheizung
Detektorhalterung:	Halter für kodierte 4-Element-Karte mit 4 Bohrungen für jeweils einen in Teflon umhüllten Detektor (Abb. A4)
Detektoren:.	${}^6\text{LiF}/{}^7\text{LiF}$ 3,2 x3,2x0,9 mm ³ Harshaw LiF-4-Elementkarte: 4 NG 7766
Regenerierung:	a. im Auswertegerät, 20 s - 290° C b. im Temperofen, 16 h - 100° C
Temperung:	4-Element-Karten im Temperofen, 20 min - 80° C
Auswerteparameter:	Planchet-Temperatur 290° C Ausheizzeit 20 s
Voranzeige $\pm 1 \sigma$ -Wert:	0,02 \pm 0,01 mSv
Ansprechvermögen:	Korrektion des individuellen Gamma-Ansprechvermögens
Meßwert:	Anschluß an Siemens 8011 Rechner über serielle Schnittstelle V 24 Digitale Glowkurve über 200 Kanäle (20 s) Integrationszeit für TLD 700: 20 s Integrationszeit für TLD 600: 20 s Glowkurven werden auf Diskette zur Beweissicherung abgespeichert

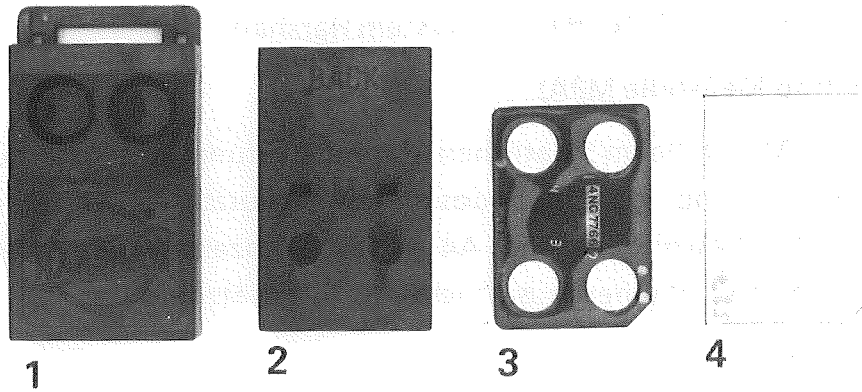


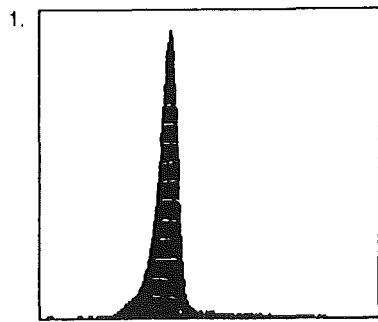
Abb. A4 Einzelteile Albedodosimeterkapsel Typ Harshaw: 1 Kapselvorderseite, 2 Kapselrückseite, 3 LiF-4-Elementkarte, 4 Kernspurätzdetektor

Abb. A5 zeigt das Auswerteprotokoll einer LiF-4-Element-Karte, die innerhalb der PDIS 85 am HPRR im Oak Ridge National Laboratory bestrahlt wurde (Abschirmung Plexiglas). In den Grafiken 1-4 sind die Glowkurven dargestellt. Hierbei ist der Photomultiplier-Strom (y-Achse) gegen die Auswertezeit (x-Achse) aufgetragen worden. Zu beachten ist, daß die 4 Glowkurven in einem jeweils anderen Maßstab dargestellt wurden. Die Glowkurven sind höhennormiert aufgetragen. Das "wahre" Verhältnis der 4 Integrale zueinander zeigt die Grafik 5.

Ergänzend zur LiF-4-Element-Karte befanden sich in der Albedodosimeter-Halterung bei den PDIS 1984-1986 Kernspurdetektoren aus Makrofol-E-Folie zur Messung schneller Neutronen (Abb. A4). Die elektrochemischen Ätzbedingungen für die Makrofol-E-Folien sind in Tab. A3 aufgeführt.

Tab. A3 Bedingungen für elektrochemisches Ätzen von Makrofol-E-Folien

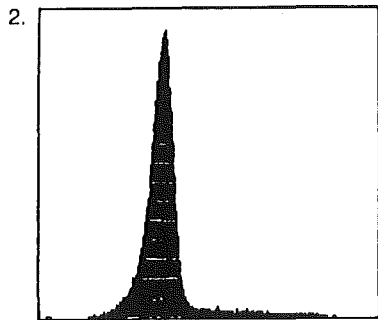
Ätzfolie	Makrofol-E (Polycarbonat)
Ätzbadtemperatur	20° C
Ätzzeit	70 min
Ätzfrequenz	2 kHz
Ätzspannung	1,4 KV
Elektrolytkonzentration	32 %ige KOH/CH ₃ OH-Lösung



1. TLD 700 Beta-Fenster

Einheiten: X-Achse = 20.00 sec. Y-Achse = 9.36 nA
t(max) = 7.60 sec. I(max) = 8.78 nA

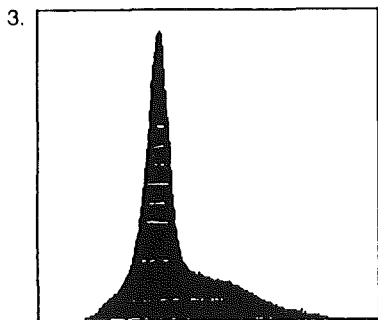
Das Integral von t = 0.10 sec. bis t = 20.00 sec. beträgt: 14.999 nC



2. TLD 700 Albedo-Fenster

Einheiten: X-Achse = 20.00 sec. Y-Achse = 7.91 nA
t(max) = 7.50 sec. I(max) = 7.42 nA

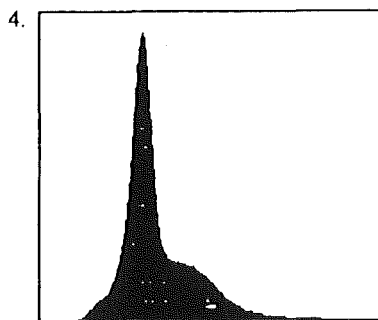
Das Integral von t = 0.10 sec. bis t = 20.00 sec. beträgt: 14.889 nC



3. TLD 600 Albedo-Fenster

Einheiten: X-Achse = 20.00 sec. Y-Achse = 26.96 nA
t(max) = 7.20 sec. I(max) = 25.28 nA

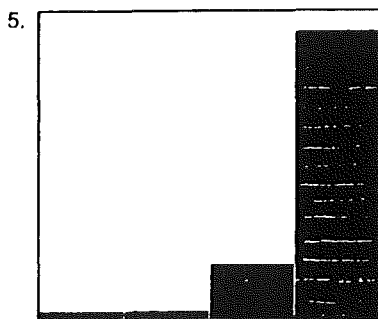
Das Integral von t = 0.10 sec. bis t = 20.00 sec. beträgt: 70.362 nC



4. TLD 600 Beta-Fenster

Einheiten: X-Achse = 20.00 sec. Y-Achse = 148.48 nA
t(max) = 6.10 sec. I(max) = 139.20 nA

Das Integral von t = 0.10 sec. bis t = 20.00 sec. beträgt: 361.456 nC



Einheiten: Y-Achse = 385.55 nC

$(3-2)/(4-1)$ i/a-Verhältnis : 0,160

TLD 1 TLD 2 TLD 3 TLD 4
100 % 99 % 469 % 2410 %

Abb. A5 Meßwertausdruck der 4 LiF-TLD's mit Glowkurven

Der Test des Auswertesystems unter den im Datenblatt (Tab. A2) aufgeführten Auswerteparametern führte zu folgenden Ergebnissen:

- **Voranzeige Dunkelstrom**
Meßwert M_0 ohne Dosimeter beim Aufheizen unter Routinebedingungen (Angaben aus 40 Messungen): $M_0 = 0.012$ mSv mit $\sigma_0 = 4.2$ % und $\Delta_{\max}/2 M_0 = 8.3$ %
- **Voranzeige sofort nach Regenerierung**
Meßwert M_5 abzüglich Dunkelstrom unmittelbar nach 3 mSv Vorbestrahlung und Regenerierung (Angaben aus 10 Messungen)
 $M_5 = 0.022$ mSv mit $\sigma_5 = 27$ % und $\Delta_{\max}/2 M_5 = 47$ %
- **Voranzeige nach Regenerierung und Kurzzeitlagerung**
Meßwert M_n abzüglich Dunkelstrom (Restdosis) nach 3 mSv Vorbestrahlung und σ_n , Regenerierung im Auswertegerät und Lagerung bei 70° C/16 h (Angaben aus 10 Messungen)
 $M_n = 0.019$ mSv ± 17 % mit $\Delta_{\max}/2 M_0 = 25$ %
- **untere Nachweisgrenze**
kleinstmögliche Digitalanzeige D_{\min} und Dosis der unteren Nachweisgrenze D_{NWG} : $D_{\min} = 0.0002$ mSv bzw. $D_{\text{NWG}} = 0.018$ mSv
- **Lichtquelle**
Anzeige der Referenzlichtquelle (Mittelwert von 10 Messungen/Tag) an 10 verschiedenen Tagen: $0,737 \pm 0,006$ mSv mit $\sigma = 0,57$ %
- **Dunkelstrom**
Änderung der Voranzeige/Dunkelstrom (Mittelwert von 10 Messungen/Tag) an 10 verschiedenen Tagen: $0,0115 \pm 0,0005$ mSv mit $\sigma = 1.78$ %
- **Referenzdosis / 10 Tage**
Änderung der Referenzdosisanzeige (Mittelwert von 10 Messungen/Tag nach Kalibrierung der Einzeldetektoren) an 10 verschiedenen Tagen ohne Veränderung der Readerkalibrierung (Referenzdosis: $1000 \times D_{\text{NWG}}$):
 $\sigma = 1.85$ % mit Max = 103,57 %, Min = 97.2 %, Mittel = 99.97 %,
- **Voranzeige / 10 Tage**
Änderung der Voranzeige nach Regenerierung und Lagerung 16 h bei 70° C (Mittelwert von 10 Messungen/ Tag nach Kalibrierung der Einzeldetektoren) an 10 verschiedenen Tagen (jeweils vorangegangen war Bestrahlung und Auswertung der Referenzdosimeter)
 $\sigma = 11.37$ % mit Max = 0.068 mSv, Min = 0.045 mSv und Mittel = 0.057 mSv

A4 Auswertetechnik für das TLD-System Panasonic
(Beitrag Meßstelle GSF)

Tab. A4 Datenblatt für das Panasonic TLD-System

Auswertegerät:	Panasonic Automatic Reader UD-710A
Auswerteprinzip:	Von dem in einer Halogenlampe erzeugten Licht wird durch eine Silikonfilterscheibe der Infrarotanteil auf das TL-Material durchgelassen. Die Heizlampe ist speziell als Wärmequelle ausgelegt. Die aus dem TL-Material emittierten Photonen durchlaufen ein Blaufilter und werden mit einer Sekundärelektronenverstärkerröhre (SEV) gezählt. Die Lampe blitzt dreimal, um jedes Element zu bearbeiten: 1. Vorheizblitz, 2. Haupt- und Leseblitz, 3. Nachheizblitz. Durch das zwischengeschaltete Blaufilter soll das im aufgeheizten TL-Material entstehende langwellige Licht herausgefiltert werden, um keine Zählimpulse in SEV entstehen zu lassen. In der Abbildung ist der prinzipielle Ablauf dieses Heizsystems dargestellt.
Detektor:	${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7/{}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$ - Pulver aufzementiert in definierter Menge
Detektorhalterung:	Kunststoffhalter mit 4 Fenstern, in denen das Detektormaterial in transparenten Teflon-Folien bzw. einer infrarot absorbierenden lichtundurchlässigen Kunststoffolie gehalten wird (siehe Abb. A6).
Kalibrierung:	Bestimmung des individuellen Gamma-Ansprechvermögens bezogen auf Co-60, Neutronen-Kalibrierung durch eine Am-Be-Quelle.
Regenerierung:	Durch Auswertevorgang
Auswerteparameter:	65 ms Vorheizzeit (Stabilisierung); 45 ms Heizzeit ($T = 205^\circ \text{C}$), 375 ms Integrationszeit; 45 ms Nachheizzeit mit entsprechenden Pausen.
Voranzeige:	Bezogen auf Co-60 Gammastrahlung ${}^7\text{Li}_2{}^{11}\text{B}_4\text{O}_7$: $0.009 \pm 0.004 \text{ mSv}$ ${}^6\text{Li}_2{}^{10}\text{B}_4\text{O}_7$: $0.028 \pm 0.008 \text{ mSv}$

Meßwertverarbeitung: Automatische Chargenkorrektur mit Hilfe eines Lochcodes, der durch den Hersteller vorgegeben wird. Automatische Ausgabe der Meßwerte. Anschluß an Wang-PC zur Berechnung der Gamma- bzw. Neutronendosen mit gespeicherten individuellen Kalibrierfaktoren und Nullwerten. Neutronendosisbestimmung durch Differenzbildung der gamma-äquivalenten Anzeigen beider Detektoren und der Anwendung der Neutronenkalibrierung. Die Optimierung des Systems erfolgte durch experimentelle Bestimmung der optimalen Heiz- und Meßzeiten

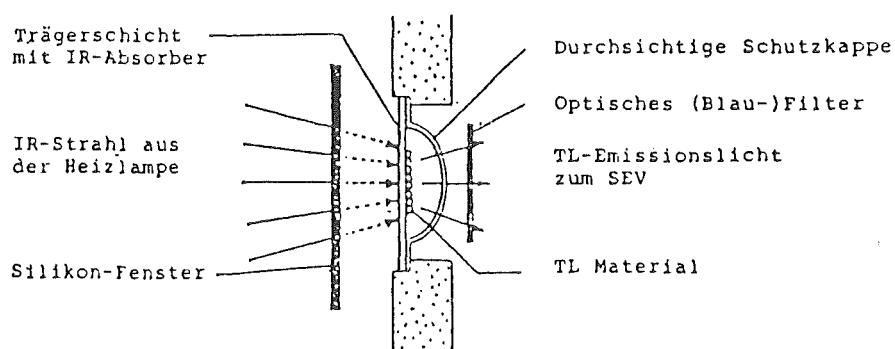


Abb. A6 Optischer Weg im PANASONIC TLD-Heizsystem

A5 Auswertetechnik für das TLD-System Vinten

(Beitrag der Meßstelle KfK)

Im TLD-System Vinten Typ 813 B1 werden zur Albedoneutronendosimetrie kodierte Vierelementkarten verwendet, die jeweils zwei Detektorpaare aus $^7\text{LiF}/^6\text{LiF}$ in Teflonmatrix enthalten. Im automatischen Auswertegerät kommen zwei unabhängige Heiz- und Lichtmeßsysteme gleichzeitig zum Einsatz, um die Meßzeit zu halbieren. Heizfinger heizen die Detektoren innerhalb 10 s auf die Maximaltemperatur, bei der sie weitere 20 Sekunden gehalten werden. Bei diesem Gerät läßt sich nur die Maximaltemperatur und die Gesamtmeßzeit der Auswertung optimieren.

Abb. A7 zeigt typische Glowkurven von ^7LiF -Detektoren nach Photonenbestrahlung bei Temperaturen von 260°C und 300°C . Der Hersteller empfiehlt zur Auswertung der Detektoren nach Photonenbestrahlung eine Temperatur von 260°C . Einige Detektoren (siehe z.B. Detektor Nr. 2 in Abb. A8) benötigen für eine vollständige Auswertung jedoch eine Temperatur von mindestens 300°C , die wegen des nahen Schmelzpunktes von Teflon nicht überschritten werden sollte. Eine Temperatur von 300°C ist auch für die Auswertung der ^6LiF -Detektoren nach Neutronenbestrahlung erforderlich (siehe Abb. A8).

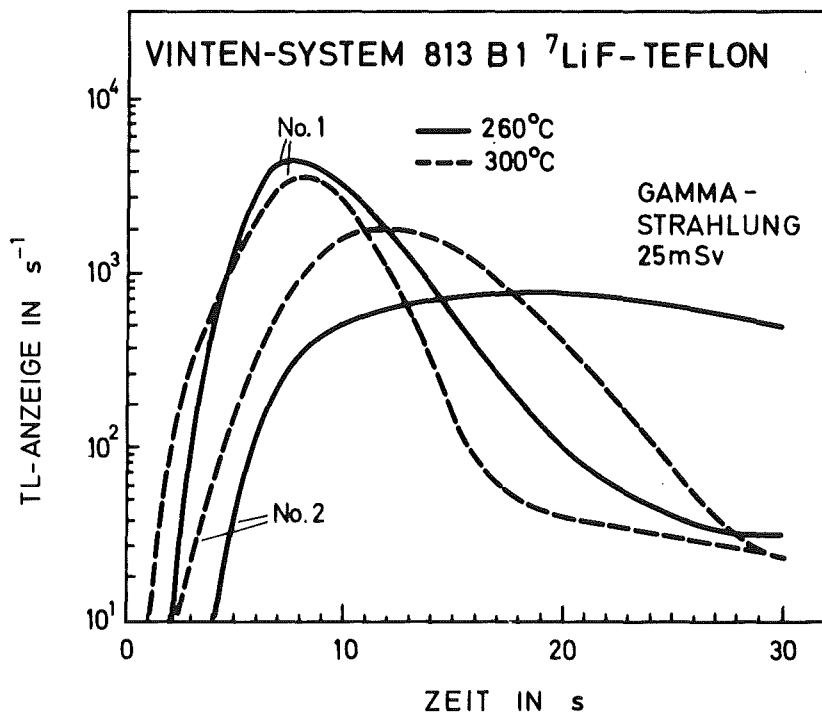


Abb. A7 Glowkurven von zwei Detektoren (Nr. 1, Nr. 2) des Vinten-Dosimetriesystems nach einer Photonenbestrahlung von 25 mSv bei maximalen Auswertetemperaturen von 260°C und 300°C

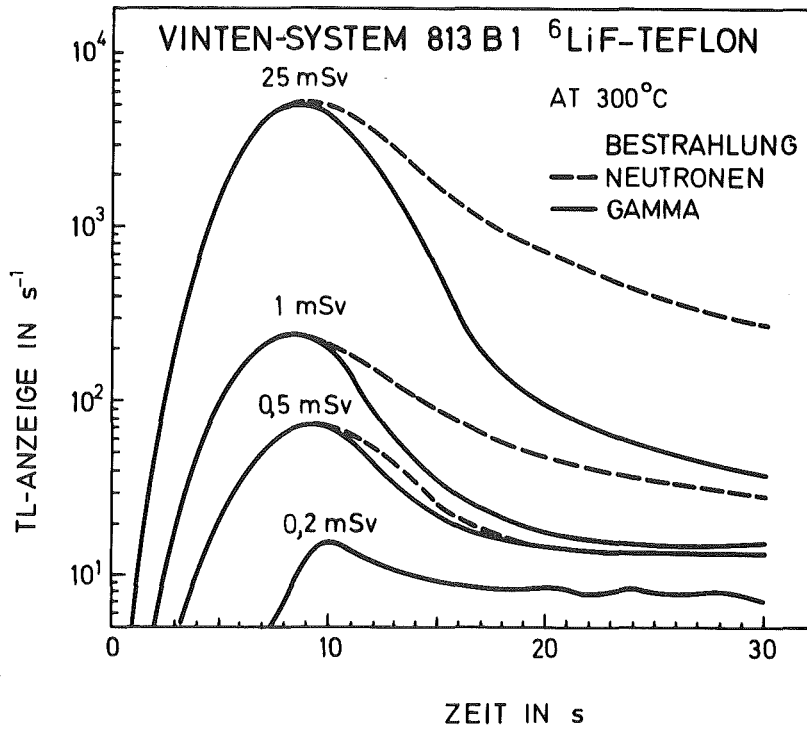


Abb. A8 Typische Glowkurven von ^6LiF -Teflondetektoren im Vinten-Dosimetriesystem nach Bestrahlung mit Photonen und Neutronen entsprechend einer Anzeige zwischen 0,2 und 25 mSv

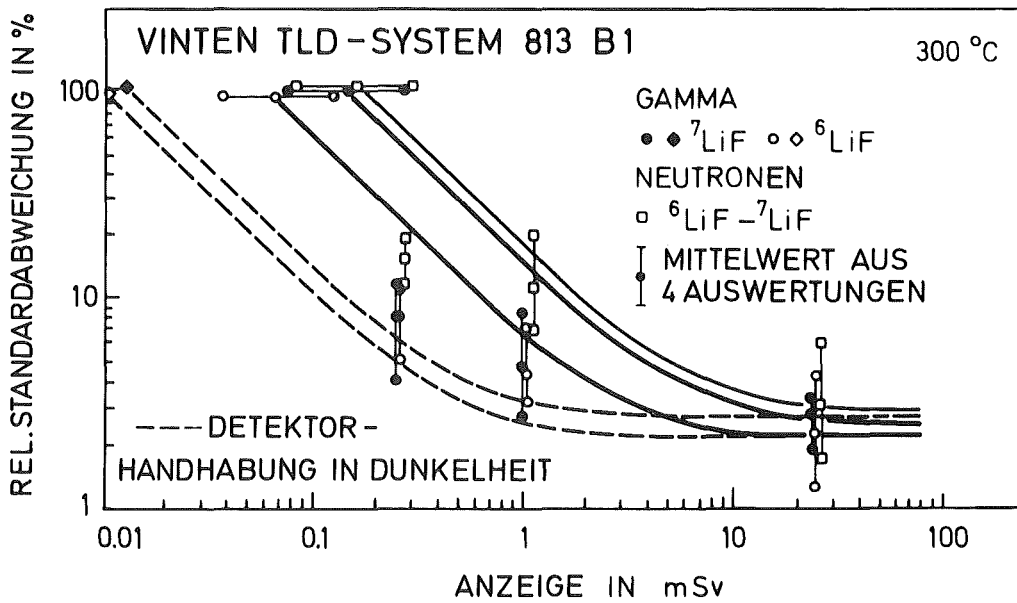


Abb. A9 Relative Standardabweichung in Abhängigkeit von der TL-Anzeige bei optimierten Auswertebedingungen ($300^\circ\text{C}/25\text{ s}$) des Vinten-Dosimetriesystems

Abb. A9 zeigt die relative Standardabweichung einer Einzelmessung für das optimierte Vinten-System als Funktion der Gamma- bzw. Neutronendosisanzeige ermittelt aus 10 Detektoranzeigen. Vergleichbare Ergebnisse mit anderen Dosimetriesystemen werden hier nur erreicht, wenn die Vierelementkarten mit den lichtempfindlichen Detektoren unter Ausschluß von Tageslicht bei Rotlicht gehandhabt werden. Die Vinten-Detektoren ändern ihr individuelles Ansprechvermögen während der ersten 5 Auswertezyklen. Dieser Nachteil kann durch eine entsprechende Anzahl von Blindauswertungen vor der ersten Benutzung behoben werden. Weitere Ergebnisse können dem Datenblatt entnommen werden.

Tab. A5 Datenblatt für das TLD-System Vinten

Auswertegerät:	TLD-System Vinten Type 813B1
Auswerteprinzip:	2 Heizfinger, gleichzeitige Messung von 2 Detektoren mit 2 Lichtmeßsystemen
Detektorhalterung:	Kodierte 4-Element-Karte mit je 2 Teflondetektorpaaren, Detektorfenster-Durchmesser 10 mm
Detektoren:	$^6\text{LiF}/^7\text{LiF}$ Teflondetektoren der Dicke 0,4 mm
Regerierung:	4-Element-Karten im Ofen bei 300° C/2,5 h und bei 80° C/16 h
Temperung:	4-Element-Karten im Ofen bei 100° C/20 min
Auswerteparameter:	Maximaltemperatur 300° C, Auswertezeit 25 s
Voranzeige ± 1 s-Wert:	a) Handhabung der 4-Element-Karten bei Tageslicht ^6LiF -Detektoren 0,13 mSv \pm 0,03 mSv ^7LiF -Detektoren 0,11 mSv \pm 0,05 mSv b) Handhabung bei Rotlicht ^6LiF -Detektoren 0,09 \pm 0,01 mSv ^7LiF -Detektoren 0,09 \pm 0,01 mSv
Photonenansprechvermögen:	Korrektur des individuellen Photonensprechvermögens erforderlich
Meßwertverarbeitung:	Anschluß des Auswertesystems an HP 9816 Rechner über HP-IB Interface (Schnittstelle am Gerät mußte erst geschaffen werden). Digitale Glowkurve über 300 Kanäle (30 s), Integrationszeit 25 s, Speicherung aller Glowkurven auf Diskette

ANHANG B

MERKBLATT ÜBER DIE ANWENDUNG DES ALBEDONEUTRONENDOSIMETERS INNERHALB DER AMTLICHEN PERSONENÜBERWACHUNG

Das Albedodosimeter dient zur Messung der Personendosis durch Neutronen-, Photonen- (Röntgen-, Gamma-Strahlung) und harter Beta-Strahlung. Eine Personenüberwachung mit dem Albedodosimeter in Mischstrahlungsfeldern wird empfohlen, wenn der Anteil der Neutronen-Äquivalentdosis mehr als 20 % der Photonen-Äquivalentdosis erreichen kann. Das Albedodosimeter ersetzt in diesen Fällen auch das bisherige Filmdosimeter bzw. Glasdosimeter, wenn die zuständige Behörde nach Abstimmung mit der Meßstelle und dem Genehmigungsinhaber nichts anderes festlegt.

Das Albedodosimeter enthält in einer Borplastikkapselung vier Thermolumineszenzdetektoren, von denen jeweils zwei hinter einem "Albedo-Neutronenfenster" bzw. "Betafenster" angeordnet sind. Der Neutronennachweis im gesamten interessierenden Energiebereich erfolgt über die Messung der im Körper des Dosimeterträgers moderierten und rückgestreuten Neutronen unter Verwendung neutronenempfindlicher Thermolumineszenzdetektoren über die Kernreaktion ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ bzw. ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$.

- **Beim Tragen des Albedodosimeters ist darauf zu achten, daß die mit "Back" gekennzeichnete Rückseite der Dosimeterkapselung dem Dosimeterträger zugewandt ist.**
- Das Albedodosimeter soll an einem Ort aufbewahrt werden, an dem nur eine geringe Untergrundstrahlung herrscht und vor allem keine thermischen Neutronen zu erwarten sind.

Das Albedodosimeter deckt den in der Routineüberwachung vorkommenden Energiebereich für Neutronen ab. Wegen der Energieabhängigkeit des Neutronenansprechvermögens wird zwischen vier typischen Anwendungsbereichen (N1 bis N4) unterschieden.

- Tab. B1 gibt typische Beispiele von Neutronenstreustrahlungsfeldern, die der Strahlenschutzverantwortliche oder -beauftragte zur Einordnung der beruflich strahlenexponierten Person in einen der Anwendungsbereiche heranziehen soll.
- **Es ist dafür zu sorgen, daß das Dosimeter nur im vorgesehenen Anwendungsbereich eingesetzt wird.**

- Der Anwendungsbereich wird im Überwachungsbogen angegeben. Für den Anwendungsbereich N4 (Beschleuniger in Forschungseinrichtungen) ist u.U. ein zusätzlicher Kernspurätzdetektor zum Nachweis schneller Neutronen in der Dosimeterkapselung vorgesehen. Dieser Zusatzdetektor wird erforderlich, wenn im Streustrahlungsfeld bevorzugt hohe Neutronenenergien vorkommen und ein hoher Gammadosisanteil erwartet wird.

Die Angabe der Neutronen-Äquivalentdosis durch die Meßstelle erfolgt unter Verwendung eines Kalibrierfaktors für den jeweiligen Anwendungsbereich. Im Einzelfall kann eine Kalibrierung im Streustrahlungsfeld erforderlich werden. Zur Kalibrierung im Streustrahlungsfeld wird in der Regel ein Referenzdosimeter, bestehend aus einer Polyäthylenkugel von 30 cm Durchmesser und einem Thermolumineszenzdosimeter im Zentrum eingesetzt. Dieses Referenzdosimeter ist gleichzeitig Phantom für zwei Albedodosimeter, die an der Kugeloberfläche diametral angeordnet werden. Kalibrierungen im Streustrahlungsfeld erfolgen in Absprache mit der Meßstelle.

Tab.B1 Anwendungsbereiche des Albedodosimeters in Neutronenstreustrahlungsfeldern

N1 REAKTOREN UND BESCHLEUNIGER (STARKE ABSCHIRMUNG)

1. Kernkraftwerke, z.B. In-core-Bereiche, Dampferzeuger, Sumpf, Absetzbecken
2. Forschungsreaktoren, z.B. an Bestrahlungskanälen, innerhalb/außerhalb der Abschirmung, in Experimentierhallen
3. Betatron, Elektronen-Linearbeschleuniger mit Elektronenenergien > 8 MeV:
Anwendung u.U. in Therapie, Forschung, Technik, insbesondere bei Inbetriebnahme, Wartung, Reparatur,
4. Teilchenbeschleuniger, Anwendung Therapie:
(d,T)-Generator, 14 MeV-Neutronen
Zyklotron (Protonen-/Deuteronen-Kernreaktion) insbesondere am Zugang zum Bestrahlungsraum

N2 BRENNSTOFFZYKLUS, KRITISCHE ANORDNUNGEN (GERINGE ABSCHIRMUNG)

1. Brennstoffzyklus einschließlich Wiederaufarbeitung, Urandioxid, Brennstoff-Pelletfertigung, Fertigung von Brennelementen, Ein- und Ausbau bzw. Transport von Brennelementen, Zwischenlagerung von Brennelementen bzw. spaltbarem Material, Brennelementlagerung/Pu-Lagerung, Dekontamination und Weiterverarbeitung spaltbaren Materials
2. Versuchsreaktoren, Brennelementanordnung ohne/mit geringer Moderierung/Abschirmung, Experimentier- und Unterrichtsreaktoren, Arbeiten an kritischen Anordnungen, z.B. Uranyl-Lösung
3. Kritikalitätsüberwachung:
Umgang mit größeren Mengen spaltbaren Materials, Umgang mit spaltbarem Material in wässriger Lösung, chemische Arbeiten mit größeren Mengen/Volumen spaltbaren Materials

N3 RADIONUKLID-NEUTRONENQUELLEN (Am-Be, Pu-Be, Ra-Be, Cf-252)

Transport und Lagerung der Quellen, Labor-/Feldeinsatz in Forschung und Technik, ohne/mit Moderierung durch Flüssigkeit, Abschirmung bzw. Boden.

N4 BESCHLEUNIGER (FORSCHUNG)

1. Teilchenbeschleuniger, Anwendung in Forschung und Technik:
Zyklotron und 14 MeV-Generatoren, häufig wechselnde Targets/Teilchenart, zugängliche Bestrahlungsräume bzw. Versuchsaufbauten ohne/mit geringer Abschirmung, wenig abgeschirmte Bereiche der Anlage
2. Hochenergiebeschleuniger für Elektronen > 50 MeV,
3. Hochenergiebeschleuniger für Protonen, Deuteronen, schwere Teilchen, z.B. C-12 bis Ar- 40 bis 400 MeV, Protonen-Synchrotron

ANHANG C

NEUTRONEN-PHOTONEN-ÄQUIVALENTDOSISLEISTUNGEN IN STRAHLUNGSFELDERN DER ANWENDUNGSBEREICHE N1 BIS N4

Tab. C1 zeigt am Beispiel verschiedener Strahlungsfelder der Anwendungsbereiche N1 bis N4 für eine vorgegebene Aufenthaltsdauer den Erwartungswert der Personendosis durch Neutronenstrahlung sowie das Verhältnis der Äquivalentdosisleistungen für Photonen und Neutronen. Diese Beispiele von Neutronenstrahlungsfeldern werden aufgeführt, um innerhalb der Personendosimetrie die Einordnung beruflich strahlenexponierter Personen in die entsprechenden Anwendungsbereiche N1 bis N4 zu erleichtern. Die Angaben in der Tabelle gehen auf Ortsdosismessungen (30 cm Kugel mit TLD- bzw. (n, α)-Kernspurdetektoren) sowie auf Feldkalibrierungen von Albedodosimetern zurück. Entsprechende Angaben über das Neutronenspektrum insbesondere über das Albedoansprechvermögen und das Meßwertverhältnis $M(a)/M(i)$ der Neutronendetektoren (a) und (i) werden in einem gesonderten Bericht vorgelegt (28).

Der Einsatz des Albedoneutronendosimeters in der Routinedosimetrie deckt auch die Erfordernisse eines Unfalles bzw. einer Kritikalität hinsichtlich Meßbereich für Photonen- und Neutronenstrahlung sowie der getrennten Ermittlung der Äquivalentdosis von thermischen/epithermischen Neutronen bzw. der Neutronendosis im Gesamtenergiebereich ab. Eine Messung der Aktivität körpereigener Substanzen insbesondere von Na-24 im Gesamtkörper sowie ortsspezifische Daten des Neutronenspektrums können zusätzlich zur Körperdosisabschätzung herangezogen werden.

Tab. C1: Neutronen-Photonen-Äquivalentdosisleistungen in Strahlungsfeldern der Anwendungsbereiche N1 bis N4

AN- WENDUNG	STRAHLUNGSFELD	BESTRAHLUNGS- DAUER	NEUTRONEN- ÄQUIVALENTDOSIS H_n	H_n/H_γ
N1	KERNKRAFTWERKE			
	Einfahren von Cf-252-Quellen	Minute	(15-30) μ Sv	-
	Zugang, Treppenabsatz in core	Minute	(70-150) μ Sv	3-5
	Sumpf DWR 1	Minute	100 μ Sv	3
	Sumpf DWR 2	Stunde	30 μ Sv	0,15
	Containment (offener Riegel)	Stunde	(30-1300) μ Sv	0,4-4
	Reaktorgrube, Kabelbrücke	Stunde	\approx 50 mSv	5-6
N1	FORSCHUNGSREAKTOR			
	an thermischer Säule	Stunde	4 μ Sv	3,3
	an Experimenten	Stunde	(4-60) μ Sv	0,1-2,5
	in Bestrahlungsräumen	Minute	(6-40) μ Sv	2-8
N1	MEDIZIN. LINEARBESCHLEUNIGER (18 MeV MEVATRON)			
	hinter Abschirmung	Monat	25 μ Sv	
	im Zugang	Stunde	bis 700 μ Sv	3,5-5
	innerhalb Abschirmung	Stunde	(8-40) mSv	1-2,6
N1	ZYKLOTRON			
	außerhalb Gebäude	Monat	50 μ Sv	
	innerhalb Gebäude	Monat	150 μ Sv	
N2	BRENNELEMENT-KREISLAUF			
	Brennelementfertigung	Monat	(2-3) mSv	1-7
	Lagerung neuer BE	Stunde	(8-100) μ Sv	0,5-4
	Transport bzw. Lagerung abgebrannter BE (Castorbehälter)	Jahr	500 μ Sv - 4 mSv	0,06-0,5
	Wiederaufarbeitung	Stunde	(20-30) μ Sv	
N2	KRITIKALITÄTSÜBERWACHUNG			
	Spaltbares Material	Stunde	(70-215) μ Sv	2,4-5
N2	KRITIKALITÄTS-BLITZ (Angaben für 10^{17} Spaltungen)			
	ohne Abschirmung, 5m Abstand	Sekunde	7 Sv	5,5
	hinter 20 cm Beton, 5 m Abstand	Sekunde	2 Sv	3
N2	KRITISCHE ANORDNUNGEN			
	ohne Abschirmung, 2-6 m	Stunde	(1,2-9) Sv	34-60
	hinter Abschirmung, 12 m	Stunde	380 μ Sv	2,3

AN- WENDUNG	STRAHLUNGSFELD	BESTRAHLUNGS- DAUER	NEUTRONEN- ÄQUIVALENTDOSIS H_n	H_n/H_Y
N3	RADIONUKLID- NEUTRONENQUELLEN Kalibrierung, sonstige Anwendung	Stunde	(10-100) μ Sv	10
N4	BESCHLEUNIGER (ohne Abschirmung)			
	Kompaktzyklotron, 2-16 m	Stunde	200 μ Sv - 5 mSv	1,2-24
	Mediz. Zyklotron, 2-4 m	Stunde	(24-320) mSv	12-22
	Karin-14 MeV-Generator, 3-9m	Stunde	(2-15) mSv	10
	Schwerionenbeschleuniger (Vicksy)	Stunde	(3-11) μ Sv	0,3-1,3
	CERN, Streustrahlungsfeld	Stunde	(4-50) μ Sv	1,2-6,5
-	NATÜRLICHER NEUTRONEN-STRAHLENPEGEL	Jahr	(30-60) μ Sv	0,05-0,1

ANHANG D

KRITERIEN FÜR EINE PERSONENDOSIMETRIE MIT ALBEDONEUTRONEN-DOSIMETERN

Aufgrund der Empfehlung des Länderausschusses für Atomkernenergie werden in der BRD Neutronenfilmdosimeter durch Albedodosimeter ersetzt. Beruflich strahlenexponierte Personen werden nach der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und Röntgenverordnung (RöV) entsprechend dem Erwartungswert der Personendosis und dem Strahlenrisiko in Kategorie A oder B eingestuft. Die Entscheidung über den Einsatz von Albedodosimetern zur Personenüberwachung auf Neutronen hängt von dem zu erwartenden Anteil der Neutronen-Äquivalentdosis an der Personendosis ab. Eine Personenüberwachung auf Neutronen ist bei Arbeiten in Neutronen- bzw. Photonen-Neutronenstrahlungsfeldern erforderlich, wenn mit nennenswerten Neutronenexpositionen zu rechnen ist. Nach Auffassung der amtlichen Meßstellen liegt dann eine nennenswerte Neutronenexposition vor, wenn an Arbeitsplätzen bzw. bei bestimmten Arbeiten insbesondere im Kontrollbereich aufgrund vorliegender Ortsdosismessungen bzw. realistischen Abschätzungen der Erwartungswert der Personendosis durch Neutronenstrahlung mindestens 20 % der Personendosis durch Photonenstrahlung betragen kann. Zur Abschätzung der Neutronen-Äquivalentdosis sind auch ungünstige Bedingungen über die Aufenthaltsdauer und die jeweiligen Bestrahlungsumstände - unter Einbeziehung möglicher Zwischenfälle - in Erwägung zu ziehen.

Tab. D1 gibt einen Überblick über die Grenzwerte und die zu erwartenden Neutronen-Äquivalentdosen, ab denen ein Albedodosimeter zum Einsatz kommen sollte.

Das Erfordernis einer Personendosimetrie mit Albedodosimetern ergibt sich zusammenfassend, wenn für eine beruflich strahlenexponierte Person

- (a) keine Meßergebnisse vorliegen, die Auskunft über den tatsächlichen Anteil der Neutronen geben könnten,
- (b) in Photonen-Neutronen-Mischstrahlungsfeldern, wo Personendosimetrie vorgeschrieben ist, die Ortsdosisleistung durch Neutronen am Arbeitsplatz bzw. bei bestimmten Arbeiten an irgendeinem Ort mehr als 20 % der Photonen-Äquivalentdosisleistung betragen kann,
- (c) die Summe aus Neutronen-Äquivalentdosis und Photonen-Äquivalentdosis im Neutronenstrahlungsfeld 1/10 des Jahresgrenzwertes für Ganzkörper-

exposition, d.h. 5 mSv pro Jahr erreichen kann und im Mischstrahlungsfeld der Neutronen-Äquivalentdosisanteil 1 mSv pro Jahr überschreitet,

- (d) beim Umgang mit spaltbarem Material, auch wenn (a) und (b) nicht zutreffen, das Risiko einer Kritikalität besteht und auflagenbedingt zu berücksichtigen ist,
- (e) eine unfallbedingte Strahlenexposition durch Neutronen nicht ausgeschlossen werden kann,

Wenn eines dieser Einstufungskriterien zutrifft, ist eine Personenüberwachung auf Neutronen erforderlich, unabhängig vom Betrag der nachträglich gemessenen Personendosis. Das Albedoneutronendosimeter ist in diesen Fällen auch als amtliches Dosimeter zur Bestimmung der Photonendosis zugelassen, wenn die zuständige Behörde nach Abstimmung mit der Meßstelle und dem Genehmigungsinhaber nichts anderes festlegt.

In bestimmten Fällen hat es sich aber als zweckmäßig erwiesen, das Albedoneutronendosimeter zur Ermittlung einer Neutronen-Äquivalentdosis einzusetzen und die Photonen-Äquivalentdosis mit einem zusätzlichen amtlichen Film- bzw. Glasdosimeter zu bestimmen. Dies gilt insbesondere, wenn

- ein Umgang mit Neutronenquellen bzw. Aufenthalt in Neutronenstrahlungsfeldern nicht in jeder Überwachungsperiode erfolgt, z.B. bei Transport von Brennelementen, Brennelementwechsel in Reaktoren, Kalibrierung von Neutronenmeßgeräten,
- die Neutronenexposition bei zeitlich begrenzten Arbeiten bzw. an bestimmten Orten nur selten stattfindet, jedoch das Risiko einer Neutronenexposition zu überwachen ist,
- das Film- bzw. Glasdosimeter u.U. zusätzliche Aussagen über die Strahlenexposition durch Photonen ermöglicht.

Tab. D1: Grenzwerte der Personendosis als Kriterien für den Einsatz von Albedodosimetern in der Routineüberwachung

	Grenzwerte für die Personendosis pro Jahr
(1) Jahresdosisgrenzwert für Ganzkörperbestrahlung ¹⁾ (StrlSchV bzw. RöV) Personen der Kategorie A Kategorie B	50 mSv 15 mSv
(2) Grenzwert für Überwachung mit Personendosimetern ²⁾	5 mSv
(3) Überwachung mit Albedodosimetern (a) nur Neutronen (b) Photonen und Neutronen ³⁾ Neutronenanteil entspricht einer Ortsdosisleistung für 2000 h pro Jahr, 20 h pro Jahr	5 mSv 5 mSv 1 mSv 0,5 µSv/h 50 µSv/h

- 1) Summe aus externer und interner Strahlenexposition
- 2) 1/10 des Jahresgrenzwertes Kategorie A, ohne Berücksichtigung einer internen Strahlenexposition
- 3) Überwachung auf Neutronen wird empfohlen, wenn im Photonen-Neutronen-Mischstrahlungsfeld der Erwartungswert der Neutronendosis $H_n \geq 0,2 H_\gamma$ beträgt und Personendosiswerte nach (2) erwartet werden

Anhang E

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen (weitere Formelzeichen siehe Abschnitt 4)

A	unkorrigierte Anzeige vor Subtraktion einer Voranzeige
BE	Brennelement
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn
BRD	Bundesrepublik Deutschland
CR-39	Allyldiglykolpolykarbonat, Kernspurdetektor
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWR	Druckwasserreaktor
DOT	Computer code zur Berechnung der Neutronenspektren am HPRR
DR	Dosimetriesystem - Rechner
E	Energie
EIR	Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
Eurados/Cendos	European Radiation Dosimetry - A Co-operative European Research Project on the <u>C</u> ollection and <u>E</u> valuation of <u>N</u> eutron <u>D</u> osimetry Data
FMRB	Forschungsmehrzweckreaktor bei der PTB, Braunschweig
FR 2	Forschungsreaktor 2, KfK Karlsruhe
GSF	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH, Neuherberg
H*(10)	richtungsunabhängige Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe der ICRU-Kugel für Ortsdosimeter
H'(10)	richtungsabhängige Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe der ICRU-Kugel für Personendosimeter
H'(0,07)	richtungsabhängige Äquivalentdosis in 0,07 mm Tiefe der ICRU-Kugel
H _γ	Photonen-Äquivalentdosis
H _n	Neutronen-Äquivalentdosis
H _n (i)	Meßwert der Neutronen-Äquivalentdosis ermittelt aus der Meßwertdifferenz der Detektoren eines Albedodetektorpaares (i) (z.B. TLD600/700)
H _R	Referenzwert der Neutronen-Äquivalentdosis ermittelt bei Feldkalibrierungen
HPRR	Health Physics Research Reactor, ORNL Oak Ridge
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiological Units and Measurements
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
LWR	Leichtwasserreaktor

LET	Linear Energy Transfer, lineare Energieübertragung
M	korrigierte Anzeige nach Subtraktion einer Voranzeige
$M_n(i)$ $M_n(a)$ $M_n(c)$	korrigierte Anzeige durch Neutronenstrahlung für ein Albedodetektorpaar (i), den thermischen Neutronendetektor (a) im Albedodosimeter bzw. (c) im Zentrum der Polyäthylenkugel von 30 cm \varnothing
$M_{ns}(i)$ $M_{ns}(a)$	korrigierte Anzeige durch Neutronenstrahlung für ein Dosimetriesystem zur Feldkalibrierung ermittelt mit zwei diametral an der Kugeloberfläche angeordneten Albedodosimeterkapseln, Summe der Meßwertanzeigen in der Position (i) des Albedodetektors bzw. (a) des thermischen Neutronendetektors
MPA	Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Dortmund- Applerbeck
N1 bis N4	Anwendungsbereiche des Albedodosimeters in der Routineüberwachung
N	Kalibrierfaktor des Systems in Einheiten der Äquivalentdosis
N_o	Neutronenkalibrierfaktor zur Ermittlung von H_R aus der Anzeige von $M_n(c)$
$N_n(i)$	Neutronenkalibrierfaktor des Albedodetektors (i)
NWG	Nachweisgrenze
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
R	Ansprechvermögen
$R_Y(i)$	Photonenansprechvermögen des Albedodetektors (i)
$R_n(i)$	Neutronenansprechvermögen des Albedodetektors (i)
$R_{nr}(i)$	Neutronenansprechvermögen des Albedodetektors (i) in einem Cf-252-Referenzstrahlungsfeld
RöV	Röntgenverordnung
SM	Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg, Stuttgart
StrISchV	Strahlenschutzverordnung
TL	Thermolumineszenz
TLD	Thermolumineszenzdosimetrie
TLD600	Detektoren aus $^6\text{LiF:Mg,Ti}$
TLD700	Detektoren aus $^7\text{LiF:Mg,Ti}$
(a)	Detektorpaar (a) in der Position (a) der Albedodosimeterkapsel (thermischer Neutronendetektor)
(i)	Detektorpaar (i) in der Albedodosimeterkapsel (Albedodetektor)
(c)	Detektorpaar (c) im Zentrum der Polyäthylenkugel von 30 cm \varnothing