

KfK 2963
Mai 1980

**Entwicklung eines
automatischen
rechnergesteuerten
Auswertegerätes für
Radiophotolumineszenz-
Dosimeter zur Bestimmung der
Einfallrichtung,
Strahlenqualität und Dosis
von Photonenstrahlung**

W. König
Hauptabteilung Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 2963

Entwicklung eines automatischen rechnergesteuerten
Auswertegerätes für Radiophotolumineszenz-Dosimeter
zur Bestimmung der Einfallrichtung, Strahlenqualität
und Dosis von Photonenstrahlung

W. König

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Zur Interpretation eines gravierenden Bestrahlungsfalles in der Personen- und Unfalldosimetrie ist neben der Dosis an der Körperoberfläche die Kenntnis der Strahleneinfallrichtung und der Strahlenenergie wünschenswert. In der vorliegenden Arbeit wurde die differentielle Auswertemethode von Radiophotolumineszenz-Dosimetern erweitert, um im Gegensatz zur herkömmlichen Auswertemethode auch bei beliebiger, unbekannter Einfallrichtung Aussagen über Strahlenqualität, Strahleneinfallrichtung und Dosis machen zu können. Dazu werden in dem neu entwickelten automatischen Auswertegerät die Profile der Radiophotolumineszenz durch elektrisch drehbare Spiegel in den drei Achsen des würfelförmigen Dosimeterglases aufgenommen. Aus diesen Profilen kann bei den verwendeten Dosimetergläsern die Strahleneinfallrichtung im Energiebereich zwischen 13 keV und 55 keV ermittelt werden. Die Strahlenenergie kann zwischen 13 keV und 110 keV mit einem Fehler von weniger als 17 %, die Dosis zwischen 13 keV und 662 keV mit einem Fehler zwischen +30 % und -40 % bestimmt werden.

Development of an Automatic Computerized Reader for Radiophotoluminescence-Dosimeters with Determination of the Angle of Incidence, the Quality and Dose of Photon-Radiation

Abstract

For the interpretation of a severe case of irradiation in personal- and accidental dosimetry it is desirable

to know besides the dose at the surface of the body, the angle of incidence, and the energy of the radiation. In this work the differential way of evaluation of phosphatglass-dosimeters was expanded, so that in opposition to the traditional way of evaluation statements can be made about the quality, angle of incidence and dose of the radiation at any unknown angle of incidence. In the new developed automatic reader the profiles of the radiophotoluminescence in the three axes of the cube-shaped dosimeterglass are registered by means of electrically controllable mirrors. From the profiles of the applied dosimeterglass the angle of incidence can be computed at energies between 13 keV and 55 keV. The energy can be determined between 13 keV and 110 keV within a margin of error less than 17 %, the dose between 13 keV and 662 keV within a margin of error between +30 % and -40%.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1. Bisherige Anwendung der Radiophotolumi- neszenz in der Dosimetrie ionisierender Strahlung	1
1.2 Differentielle Auswertung von Phosphat- glasdosimetern	6
1.3 Aufgabenstellung	7
2. WECHSELWIRKUNG VON PHOTONENSTRAHLUNG MIT MATERIE	8
2.1 Arten der Wechselwirkung	8
2.2 Energieabgabe an Materie	10
2.3 Koeffizienten des Dosimeterglases DOS 8	10
2.4 Schwächung der Intensität bei ausge- blendetem parallelem Photonenbündel im Dosimeterglas	13
2.5 Energieabhängigkeit der Dosisempfind- lichkeit des Dosimeterglases DOS 8	16
3. GEOMETRISCHE BETRACHTUNG ZUM STRAHLENEINFALL IN DAS DOSIMETERGLAS	21
4. MESSUNG VON RPL-INTENSITÄTSPROFILEN	27
4.1 Abtasten der RPL-Intensität entlang der Koordinatenachsen (Scannen)	27
4.2 Bestimmen der Strahlenqualität	34

	Seite
4.3 Verfahren zur Messung von RPL-Intensitätsprofilen	36
4.3.1 Anforderungen an das Verfahren	36
4.3.2 Linearbewegung des Glases	38
4.3.3 Abtasten mit Glasfaserkegel als Lichtleiter	39
4.3.4 Abtasten durch Drehspiegel	41
4.4 Optische Kammer zur Messung von RPL-Intensitätsprofilen	42
4.5 Schrittweise Abtastung der RPL-Intensitätsprofile in drei Ebenen	45
5. EINFLUSS DES SCHRÄGEN EINFALLS UND DER INTENSITÄTSVERTEILUNG IM ABTASTENDEN UV-LICHTBÜNDEL	46
5.1 Einfluß der Intensitätsverteilung im Querschnitt des UV-Lichtbündels	46
5.1.1 Messen der Intensitätsverteilung im Querschnitt des anregenden UV-Lichtbündels	48
5.1.2 Einfluß der Intensitätsverteilung im UV-Lichtbündel auf das gemessene RPL-Intensitätsprofil	53
5.2 Schräger Einfall des UV-Lichtbündels in das Dosimeterglas	56
5.2.1 Änderung der Abtastbreite	58
5.2.2 Änderung des angeregten Glasvolumens	60
6. BAUSTEINE IM ANREGUNGSTEIL DES AUSWERTEGERÄTS	63
6.1 Glashalterung	63

	Seite	
6.2	UV-Lichtquelle	66
6.3	Optische Filter im Anregungsteil	69
6.4	Drift der Auslenkung des UV-Lichtbündels	69
6.5	Linearität des Antriebs der Scanner- spiegel	71
6.6	Wiedereinstellgenauigkeit der Scanner	72
7.	DER RPL-LICHTWEG ZUM DETEKTOR	74
7.1	Austritt des RPL-Lichtes aus dem Dosi- meterglas	74
7.2	Einfluß der rauhen Bodenfläche	78
7.3	Der Weg des RPL-Lichtes von der Aus- trittsfläche des Dosimeterglases zum Detektor	79
8.	BAUSTEINE IM RPL-LICHTMESSZWEIG	83
8.1	Aufgaben der einzelnen Bausteine	83
8.2	Optische Filter im RPL-Lichtmeßzweig	84
8.3	Photomultiplier als Detektor für das RPL-Licht	85
8.3.1	Optische Asymmetrie des Photomulti- pliers	86
8.3.2	Arbeitspunkt des Photomultipliers	86
8.3.3	Zeitliche Änderungen des Dunkelstroms	90
8.3.4	Einfluß von Temperatur- und Anoden- stromänderungen auf den	91

	Seite
	Verstärkungsfaktor des PM
8.4	Eigenschaften der Verstärker im Licht- meßzweig 93
8.4.1	Berechnung des resultierenden Ver- stärkungsfaktors und Einfluß der Tem- peratur im Strom-Spannungswandler 93
8.4.2	Tiefpaß im Lichtmeßzweig 96
8.4.3	Berechnung des Verstärkungsfaktors und Temperatureinflusses im regel- baren Verstärker 97
8.4.4	Linearität und zeitliche Konstanz der Verstärkung im RPL-Lichtmeßzweig 99
9.	GESAMTFUNKTION DES AUSWERTEGERÄTES 102
10.	RECHNERPROGRAMME ZUM BETRIEB DES AUSWERTEGERÄTES
10.1	Aufgabe der Programme und Datenfluß 104
10.2	Aufbau der Programme 106
10.3	Abgleich der Position des UV-Licht- bündels 107
10.3.1	Arbeitsweise des Abgleichverfahrens 107
10.3.2	Durchführung des Positionsabgleiches 109
10.4	Abgleich der Positionsanzeige 110
10.5	Bestimmung von Referenzprofilen 113
10.6	Messung und Auswertung der RPL-Intensi- tätsprofile 115
10.6.1	Aufnahme der RPL-Intensitätsprofile 116
10.6.2	Korrektur durch Referenzprofile und Ausgabe der RPL-Intensitätsprofile 116
10.6.3	Berechnen und Ausgeben der Strahlen- einfallrichtung 117

	Seite
10.6.4 Berechnen und Ausgeben der Strahlen- qualität	118
10.6.5 Berechnen der Dosis aus der Summe der RPL-Intensitäten	122
10.6.6 Bestimmen der Meßfehler	124
11. AUSWERTUNG VON DOSIMETERGLÄSERN BEI VERSCHIEDENEN STRAHLENQUALITÄTEN UND EINFALLSRICHTUNGEN	128
12. ZUSAMMENFASSUNG	134
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	138
VERZEICHNIS DER TABELLEN	143
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE	145
LITERATURVERZEICHNIS	149

1. EINLEITUNG

1.1 BISHERIGE ANWENDUNG DER RADIOPHOTOLUMINESZENZ IN DER DOSIMETRIE IONISIERENDER STRAHLUNG

Es ist seit 1912 bekannt, daß manche Festkörper durch das Einwirken ionisierender Strahlung ihr Lumineszenzverhalten ändern. <1,2>

Dabei werden zusätzlich zu den bestehenden Absorptionsbanden, der Grundgitterabsorption, die auf Elektronenübergängen zwischen Valenz- und Leitungsband beruht, und der Ausläuferabsorption, die auf die Beteiligung von Gitterstörungen zurückzuführen ist, neue Absorptionsbanden gebildet.

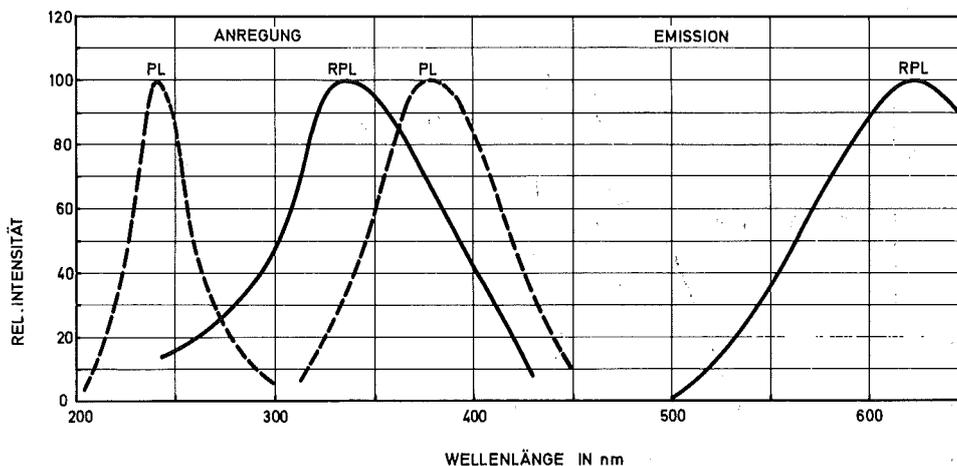


Abb. 1.1 SPEKTREN DER ANREGUNGS- UND EMISSIONSBANDEN
VON PL UND RPL BEI PHOSPHATGLÄSERN

Regt man den Festkörper in einer seiner Absorptionsbanden an, so sendet er Lumineszenzlicht aus, dessen Wellenlänge meist größer ist als die der Anregung. Diesen Vorgang bezeichnet man als Photolumineszenz, PL. Werden die durch die ionisierende Strahlung neu gebildeten Zen-

tren zur Emission angeregt, so spricht man von Radiophotolumineszenz, kurz RPL. (Abb. 1.1)

Die RPL von sogenannten Phosphatgläsern wurde von Schulman <3,4> zu Beginn der fünfziger Jahre in den USA erstmals in großem Umfang zur Dosimetrie ionisierender Strahlung benützt. Seine Gläser (Tab. 1.1) zeigten eine hohe, unerwünschte PL, die auch bei unbestrahltem Dosimeterglas eine Bestrahlung vortäuschte. Die Schwankungen dieser nicht strahleninduzierten Lumineszenz führten neben anderen Ursachen zu einer unteren Nachweisgrenze von zehn Röntgen für Photonenstrahlung. Die starke Abhängigkeit der RPL-Intensität von der Energie der ionisierenden Strahlung, die sogenannte Energieabhängigkeit, konnte einen unzulässig großen Fehler bei der Bestimmung der Dosis verursachen. (Abb. 1.2)

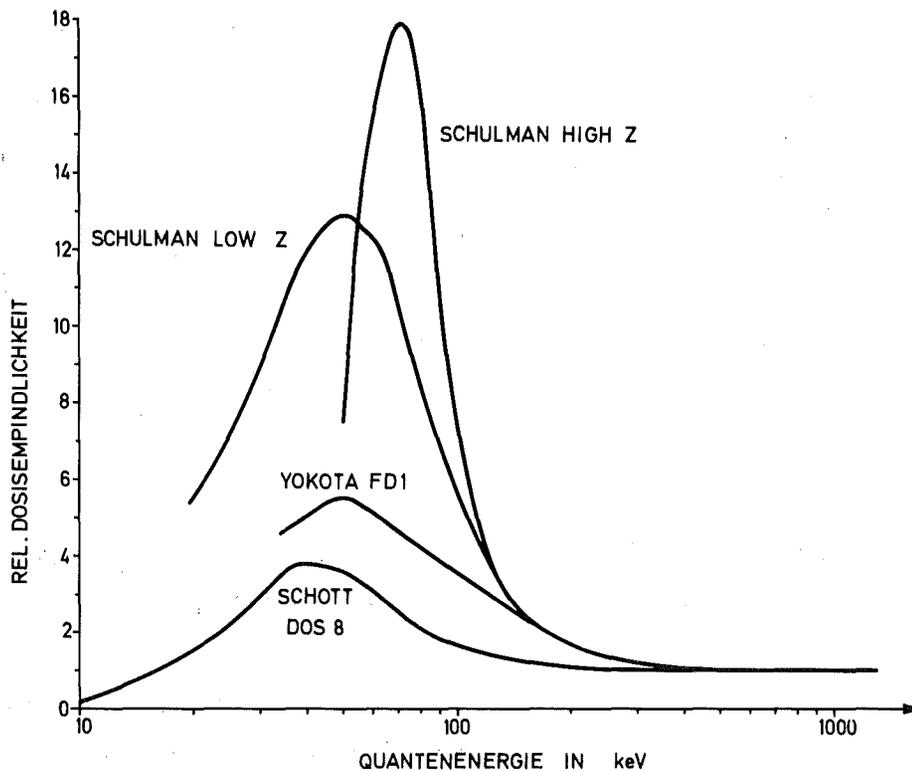


Abb. 1.2 ENERGIEABHÄNGIGKEIT DER DOSISANZEIGE VERSCHIEDENER DOSIMETERGLÄSER

Grundlegende Verbesserungen in der Zusammensetzung der Dosimetergläser, vor allem durch Yokota <5> in Japan führten zu einem modernen Dosimetersystem, das die zuverlässige Messung der Dosis von Photonenstrahlung im Dosisbereich zwischen 10 mR und etwa 10 000 R gestattet. Insbesondere in Deutschland werden heute Phosphatglasdosimeter in der Personen-, Orts- und Unfalldosimetrie eingesetzt. Auch in der Strahlentherapie zum Ausmessen von Feldverteilungen und in der Hochdosismessung an Bestrahlungseinrichtungen werden diese Dosimeter benützt.

Glastyp	Ag	Al	Li	P	O	sonst.
Schulman High Z	4,3	4,7	-	28,8	44,1	10,4 Ba 7,7 K
Schulman Low Z	4,3	4,7	1,9	33,7	52,3	3,1 Mg
Yokota FD 1	3,7	4,6	3,6	33,5	53,7	0,90 Ba
Schott D8	0,17	6,19	-	31,9	50,59	11,15 Na

Tab. 1.1 ZUSAMMENSETZUNG VERSCHIEDENER DOSIMETERGLÄSER,
ANTEILE IN GEWICHTSPROZENTEN <6,7>

Die heute verwendeten RPL-Dosimetergläser sind Metaphosphate wie $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$, $\text{K}(\text{PO}_3)_2$, NaPO_3 , denen Oxide verschiedener Metalle, insbesondere von Silber zugesetzt werden. Diese Zusätze erzeugen Fehlstellen in dem Glasgerüst aus Sauerstoff- und Phosphorionen. Ein einfaches Modell der RPL in einem Dosimeterglas ist in Abb. 1.3 dargestellt. Zwischen Valenz- und Leitungsband werden drei Arten von Störstellen angenommen. Neben den schon erwähnten Lumineszenzzentren und den strahleninduzierten

RPL-Zentren werden Haftstellen, sogenannte "traps" angenommen. Diese Haftstellen können durch Ionisation in das Leitungsband gehobene Elektronen vorübergehend festhalten. Durch thermische Anregung werden diese Elektronen anschließend wieder freigesetzt und bilden ebenfalls RPL-Zentren.

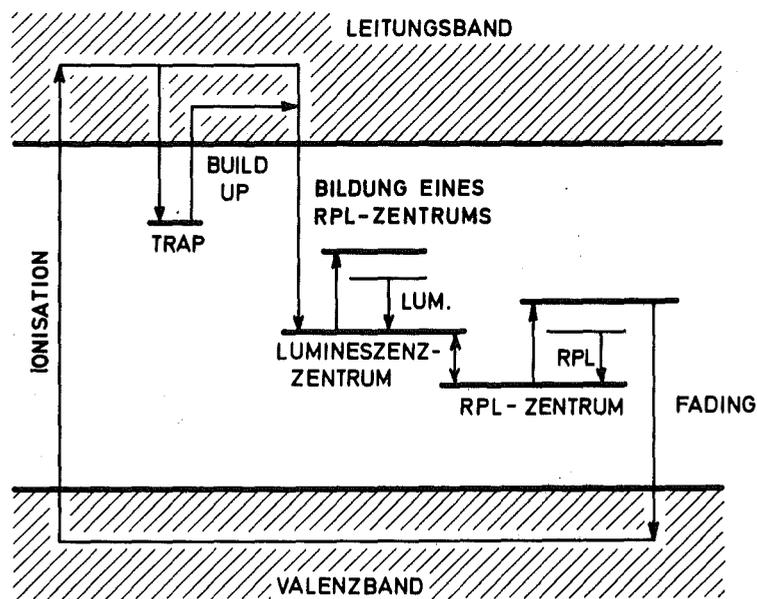


Abb. 1.3 EINFACHES BÄNDERMODELL DER RPL IN PHOSPHAT-GLÄSERN <8,9>

Werden die RPL-Zentren im Dosimeterauswertegerät durch Licht angeregt, dessen Wellenlänge innerhalb der Absorptionsbande der RPL liegt, so gehen sie in ein höheres Energieniveau über (Abb. 1.3). Zur Anregung dient üblicherweise eine UV-Lichtquelle mit einem UV-Filter, dessen Transmissionsmaximum bei 365 nm liegt (Abb. 1.4). Bei der Rückkehr in den Grundzustand strahlen die RPL-Zentren langwelligeres RPL-Licht ab, die Energiedifferenz wird an das Gitter abgegeben.

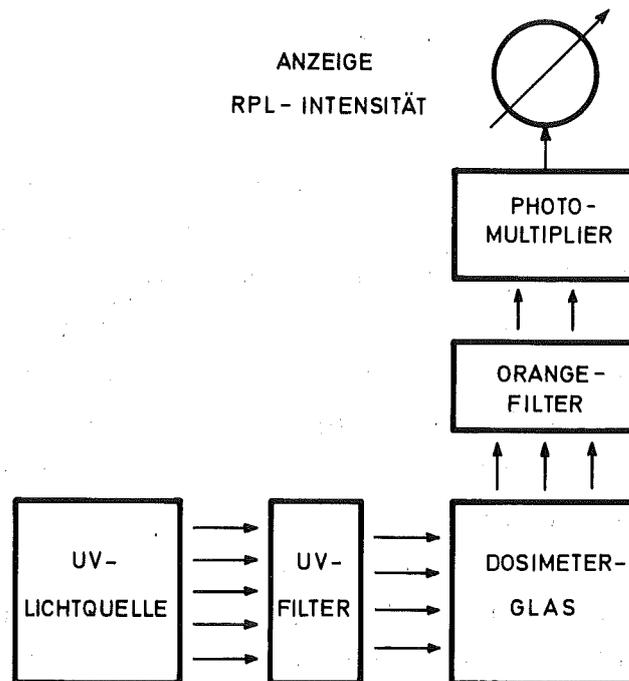


Abb. 1.4 PRINZIPIELLER AUFBAU EINES RPL-AUSWERTEGERÄTS

Die Intensität des RPL-Lichtes wird hinter einem Oran- gefilter durch einen Photomultiplier gemessen. Sie ist bei konstanter Anregung im Dosisbereich zwischen 10 mR und etwa 1000 R der Energiedosis der im Glas absorbier- ten ionisierenden Strahlung proportional. Bei höheren Dosen schließt sich ein nichtlinearer Bereich an, der seine Ursache in einer Selbstabsorption des UV- und des RPL-Lichtes durch kolloidal ausgeschiedenes Silber hat. Das Orangefilter soll gestreute Anteile des Anregungs- liches sowie nicht strahleninduziertes PL-Licht zurück- halten.

1.2 DIFFERENTIELLE AUSWERTUNG VON PHOSPHATGLAS- DOSIMETERN

Die in Kap. 1.1 beschriebene Auswertemethode für RPL-dosimeter, bei der das gesamte Volumen des Dosimeterglases gleichzeitig angeregt wird, liefert keine Information über Richtung und Qualität der ionisierenden Strahlung. Vielmehr ist man bemüht, durch Abdecken der Glasdosimeter bei der Bestrahlung mit geeigneten Filtern die Energieabhängigkeit der Anzeige (Abb. 1.2) der Dosimeter zu kompensieren, um die Dosis luftäquivalent oder gewebeäquivalent zu messen.

Ein anderer Weg besteht darin, die Schwächung der Intensität der ionisierenden Strahlung im Dosimeterglas zur Bestimmung der Energie der Strahlung zu benutzen. <10,11, 12> Bei diesem sogenannten differentiellen Auswerteverfahren wird das Dosimeterglas in Richtung des Strahleneinfalls in verschiedenen Glastiefen zur RPL angeregt. Durch dieses Abtasten mit dem anregenden UV-Licht erhält man ein Profil der RPL-Intensität im Dosimeterglas, aus dem man unter bestimmten Voraussetzungen wie

- Bestrahlung aus nur einer Richtung,
- Abtasten in der (bekannten) Richtung des Strahleneinfalls und
- geeignete Strahlenqualität

die Qualität und die Dosis der Strahlung ermitteln kann.

1.3 AUFGABENSTELLUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit war es,

- diese differentielle Auswertemethode zu erweitern, um auch bei beliebiger, unbekannter Strahleneinfallrichtung Aussagen über Strahlenqualität, Strahleneinfallrichtung und Dosis machen zu können,
- ein Auswertegerät zur differentiellen Messung zu entwickeln, das einen automatischen Ablauf der Messung und eine selbsttätige Ermittlung der erwähnten Größen vorweist.

2. WECHSELWIRKUNG VON PHOTONENSTRAHLUNG MIT MATERIE

2.1 ARTEN DER WECHSELWIRKUNG

Trifft ionisierende Strahlung auf Materie, so können verschiedene Wechselwirkungen beobachtet werden. Dabei gibt die Strahlung insbesondere über Sekundär-Elektronen Energie ab.

Handelt es sich um Photonen, so sind Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung - und bei sehr großen Energien Kernphotoeffekt - möglich. Die Wahrscheinlichkeit, mit der jeder dieser Effekte auftritt, ist eine Funktion der Photonenenergie E und der Ordnungszahl Z der absorbierenden Materie. <13>

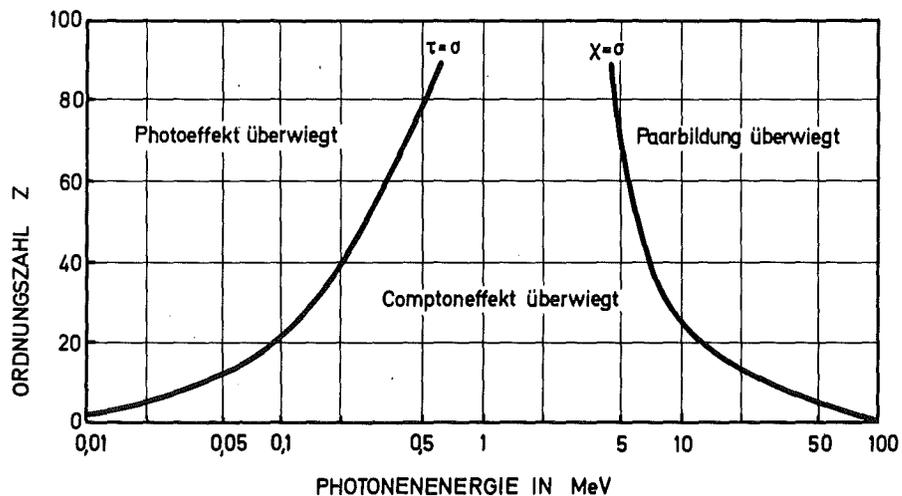


Abb. 2.1 EINFLUSS VON ORDNUNGSZAHL UND PHOTONENENERGIE AUF DIE WAHRSCHEINLICHKEIT VON PHOTOEFFEKT, COMPTONEFFEKT UND PAARBILDUNG

Als Maß für die Wahrscheinlichkeit des Photoeffekts dient der Photomassenabsorptionskoeffizient

$$\frac{\tau}{\rho} \sim Z^5 \cdot E^{-3,5} \quad (2.1)$$

für die Wahrscheinlichkeit des Comptoneffekts der Comptonmassenabsorptionskoeffizient

$$\frac{\sigma}{\rho} \sim Z \cdot E^{-\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

für die Wahrscheinlichkeit der Paarbildung der Massenpaarbildungskoeffizient

$$\frac{\kappa}{\rho} \sim Z^2 \ln(h_p \cdot \nu_0 - 2m_0 c^2) \quad (2.3)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit, h_p das Planksche Wirkungsquantum, m_0 die Ruhemasse und ν_0 die Frequenz des Photons. Die angeführten Abhängigkeiten der Koeffizienten von der Ordnungszahl Z sind Näherungen. Insbesondere für Energien, die der K-Kante oder der L-Kante des betrachteten Materials nahekommen, ändern sich die Koeffizienten sprunghaft. Diese drei Prozesse bewirken, daß die Photonen beim Durchgang durch Materie durch Ionisation Energie abgeben. Insgesamt betrachtet wird hierbei die Photonenstrahlung beim Durchgang durch Materie geschwächt, so daß man die Koeffizienten zweckmäßigerweise zu einem einzigen Massenschwächungskoeffizienten zusammenfaßt.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho} \quad (2.4)$$

Dieser Koeffizient beschreibt die Abnahme der Anzahl der Photonen pro Längeneinheit, solange keine Wechselwirkungen der Photonen mit Kernen eine Rolle spielen.

Diese müssen erst bei Energien oberhalb einiger MeV berücksichtigt werden.

2.2 ENERGIEABGABE AN MATERIE

Für die Dosimetrie wichtig ist der Anteil der Photonenenergie, der als kinetische Energie an die bei der Ionisation freiwerdenden Elektronen abgegeben wird. Er wird durch den Massenenergieumwandlungskoeffizienten η/ρ beschrieben. Bei Stoffen mit hoher Ordnungszahl Z wird ein Teil der kinetischen Energie wieder in Bremsstrahlung umgesetzt, die unter Umständen den Absorber verläßt. Deshalb beschreibt man einen dosimetrischen Effekt am zweckmäßigsten durch den Massenenergieabsorptionskoeffizienten η'/ρ

Hierbei ist
$$\frac{\eta'}{\rho} \leq \frac{\eta}{\rho} \quad (2.5)$$

2.3 KOEFFIZIENTEN DES DOSIMETERGLASES DOS 8

Handelt es sich bei der betrachteten absorbierenden Materie um ein Stoffgemisch oder eine Verbindung, so können die Koeffizienten der einzelnen Bestandteile nach ihren Anteilen gewichtet und zu einem gesamten Koeffizienten zusammengefaßt werden. <14>

$$\frac{\mu}{\rho}(E) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\mu}{\rho} \right]_i (E) \cdot w_i \quad (2.6)$$

Dabei ist w_i der Anteil des Stoffes i in Gewichtspro-

zenten. Entsprechendes gilt für den Massenenergieabsorptionskoeffizienten η'/ρ .

In der vorliegenden Arbeit wurden Dosimetergläser vom Typ DOS 8 der Firma Schott & Gen. in Mainz verwendet. Zur Berechnung der entsprechenden Koeffizienten dieses Glases wurden die Angaben des Herstellers in Tab. 2.1 bezüglich der Glaszusammensetzung zugrunde gelegt.

Bestandteile	Al	P	O	Na	Ag
Gewichtsproz.	6.19	31.9	50.59	11.15	0.17
Ordnungsz. Z	13	15	8	11	47
K-Kante/KeV	1.9	2.6	0.66	1.3	25.5

Tab. 2.1 ZUSAMMENSETZUNG DES DOSIMETERGLASES DOS 8

Die Zahlenwerte der Massenschwächungskoeffizienten und der Massenenergieabsorptionskoeffizienten der einzelnen Bestandteile wurden <15,16,17> entnommen; sie sind in Tab. 2.2 aufgeführt. Als spezifisches Gewicht des Glases DOS 8 wurde $\rho = 2.58 \text{ g/cm}^3$ ermittelt.

Energie in keV	Aluminium		Phosphor		Sauerstoff		Natrium		Silber		DOS 8	
	π/ρ in cm^2/g	μ/ρ in cm^2/g										
10	26,1	26,8	40,6	41,4	5,5	5,94	15,4	15,9	105	108	19,2	19,8
15	7,64	8,06	12,3	12,7	1,49	1,80	4,43	4,79	31,8	33,4	5,70	6,05
20	3,15	3,48	5,11	5,49	0,586	0,840	1,77	2,06	13,7	14,9	2,34	2,65
30	0,879	1,12	1,47	1,73	0,162	0,370	0,483	0,705	36,6	37,3	0,721	0,95
40	0,350	0,558	0,583	0,803	0,0698	0,254	0,194	0,388	16,6	17,1	0,293	0,492
50	0,176	0,360	0,287	0,481	0,0409	0,208	0,0994	0,272	8,83	9,21	0,149	0,327
60	0,104	0,270	0,168	0,343	0,0304	0,189	0,0644	0,224	5,36	5,67	0,092	0,256
80	0,0534	0,199	0,0790	0,229	0,0245	0,167	0,0370	0,178	2,38	2,61	0,049	0,194
100	0,0373	0,169	0,0501	0,185	0,0235	0,155	0,0285	0,155	1,27	1,46	0,036	0,168
150	0,0283	0,138	0,0316	0,143	0,0252	0,137	0,0258	0,134	0,406	0,536	0,028	0,139
200	0,0276	0,122	0,0291	0,125	0,0270	0,124	0,0266	0,120	0,192	0,296	0,028	0,124
300	0,0284	0,104	0,0290	0,106	0,0290	0,107	0,0279	0,103	0,0767	0,154	0,029	0,106
400	0,0288	0,0927	0,0291	0,0935	0,0296	0,0956	0,0284	0,0918	0,0498	0,113	0,029	0,094
500	0,0288	0,0846	0,0290	0,0850	0,0297	0,0871	0,0285	0,0836	0,0386	0,0921	0,029	0,086
600	0,0287	0,0780	0,0289	0,0785	0,0296	0,0805	0,0284	0,0771	0,0339	0,0804	0,029	0,079
800	0,0279	0,0684	0,0280	0,0687	0,0289	0,0708	0,0277	0,0677	0,0294	0,0671	0,028	0,070
1000	0,0270	0,0614	0,0271	0,0617	0,0280	0,0636	0,0268	0,0608	0,0271	0,0589	0,028	0,063
Gew. %	6,19		31,9		50,59		11,15		0,17		100	

Tab. 2.2 Koeffizienten der Bestandteile des Dosimeter-
GLASES DOS 8

Aus den Daten von Tab. 2.2 wurden nach Gleichung 2.6

die Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ und die Massenenergieabsorptionskoeffizienten η'/ρ für das Dosimeterglas DOS 8 berechnet und in Abb. 2.2 als Funktion der Photonenenergie E dargestellt. Multiplikation mit dem spezifischen Gewicht des Glases ergibt die linearen Schwächungskoeffizienten μ und Energieabsorptionskoeffizienten η' .

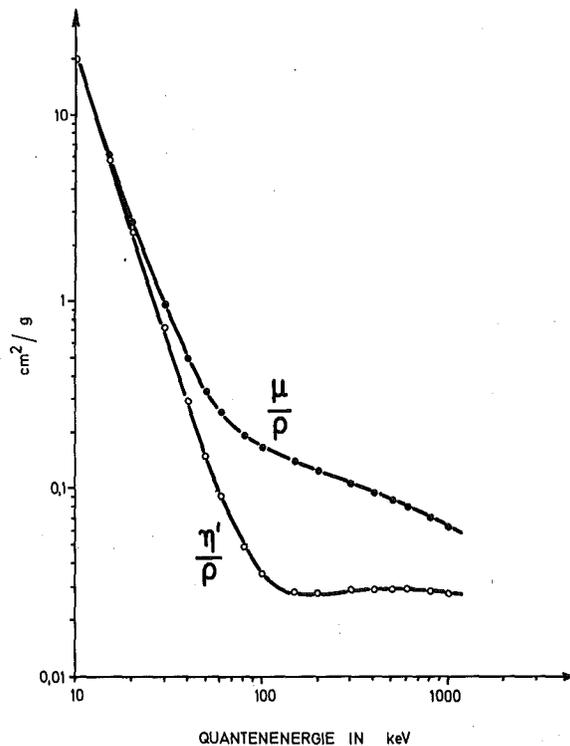


Abb. 2.2 MASSENSCHWÄCHUNGSKOEFFIZIENT μ/ρ UND MASSENERGIEABSORPTIONSKOEFFIZIENT η'/ρ VON DOS 8

2.4 SCHWÄCHUNG DER INTENSITÄT BEI AUSGEBLENDETEM PARALLELEM PHOTONENBÜNDEL IM DOSIMETERGLAS

Für eine Geometrie, wie sie in Abb. 2.3 skizziert ist, soll eine Abschätzung der Schwächung der Intensität R_p eines Photonenbündels im Dosimeterglas durchgeführt wer-

den. Eine Schwächung, d.h. eine Verringerung der Anzahl der Photonen, die das Glas der Dicke dx wieder verläßt, kann im Dosimeterglas hauptsächlich erfolgen durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung.

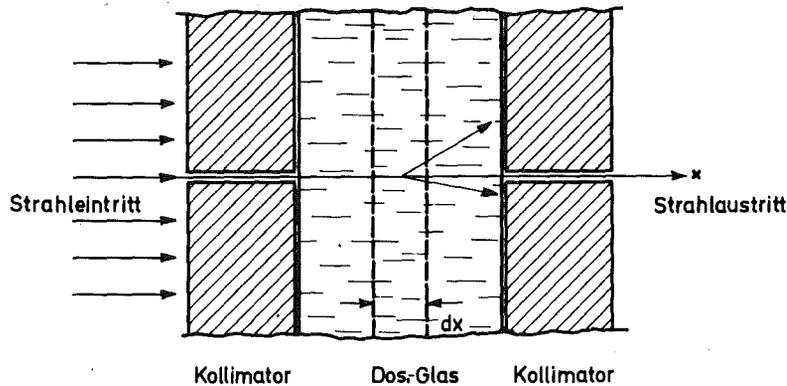


Abb. 2.3 GEOMETRIE BEI AUSGEBLENDETEM STRAHL

Hierbei wird vereinfachend angenommen, daß alle einfallenden und alle austretenden Photonen gleiche Energie besitzen. Weiterhin wird der Anteil der gestreuten Photonen im austretenden Bündel vernachlässigt.

Nimmt man an, daß die Abnahme der Anzahl der Photonen im Volumenelement der Dicke dx der Anzahl der Photonen am Ort x proportional ist, d.h.

$$-\frac{dR_p}{dx} = \mu \cdot R_p(x) \quad (2.7)$$

so erhält man als Lösung

$$R_p(x) = R_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.8)$$

Bei nicht kollimiert einfallendem Photonenbündel tritt ein durch einen zusätzlichen Faktor modifizierter exponentieller Abfall auf. Die Schwächung des Photonenbündels nach Gl. 2.8 führt mit zunehmender Glastiefe zu

einer Abnahme der Anzahl der RPL-Zentren. Dieser Vorgang ist von der Photonenenergie abhängig und wird durch den linearen Schwächungskoeffizienten $\mu(E)$ gekennzeichnet. Als Abfallkonstante S wird der Kehrwert von $\mu(E)$ bezeichnet. Er hat die Dimension Länge. In Abb. 2.4 ist diese "1/e-Glastiefe" S als Funktion der Photonenenergie E für das Dosimeterglas DOS 8 aufgetragen.

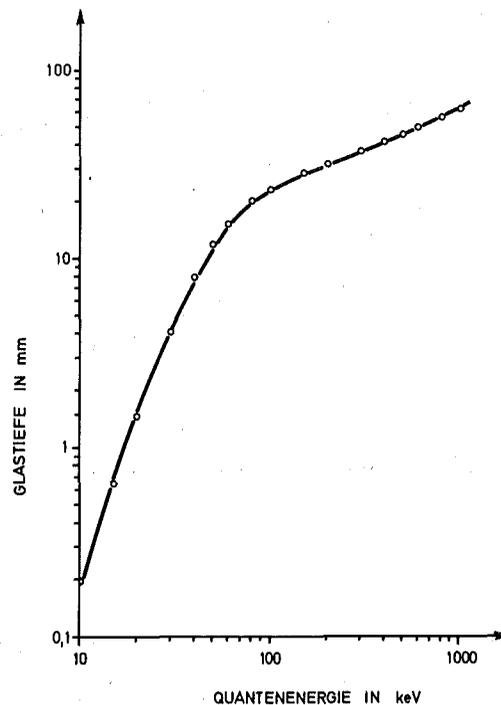


Abb. 2.4 GLASTIEFE FÜR EINEN ABFALL DER RPL-INTENSITÄT
AUF 1/e

Aus dem experimentell ermittelten Profil der RPL in einem Dosimeterglas kann danach die entsprechende Glastiefe und damit die mittlere Photonenenergie bestimmt werden. Unter der zuvor gemachten Annahme, daß gestreute Photonen nicht berücksichtigt werden, ergeben sich aus Gl. 2.8 in erster Näherung die in Abb. 2.5 dargestellten RPL-In-

tensitätsprofile im Dosimeterglas DOS 8 als Funktion der Glastiefe bei verschiedenen Energien der Photonenstrahlung.

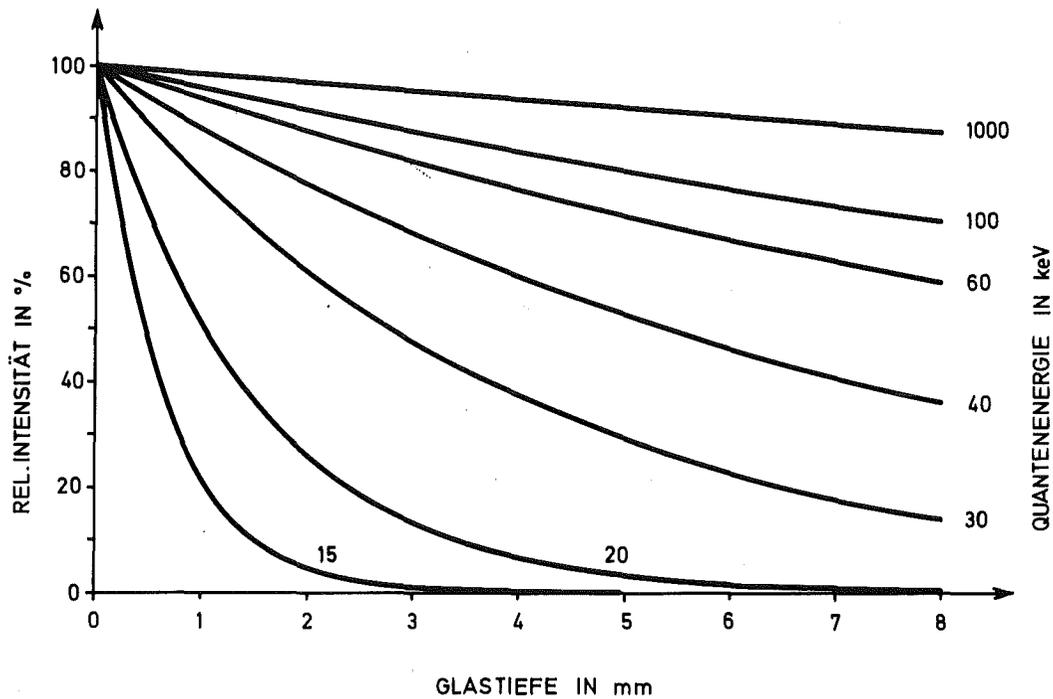


Abb. 2.5 BERECHNETE RPL-INTENSITÄTSPROFILE BEI VERSCHIEDENEN ENERGIEN DER ZUR BESTRAHLUNG VERWENDETEN PHOTONEN

2.5 ENERGIEABHÄNGIGKEIT DER DOSISEMPFINDLICHKEIT DES DOSIMETERGLASES DOS 8

Als Maß für die Intensität der Photonenstrahlung ist ihre Fluenz Φ geeignet. Man versteht darunter die An-

zahl der Photonen, die während eines Zeitraumes dt in ein Meßvolumen von der Form einer Kugel mit dem Querschnitt dA eintreten. Hat die Fluenz im Luftraum vor dem Eintreten in das Dosimeterglas die Größe Φ_0 , so wird sie mit zunehmender Glastiefe x durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung geschwächt. Wie in Kap. 2.4 gezeigt wurde, läßt sich die Schwächung der Intensität von Photonenstrahlung im Dosimeterglas durch den linearen Schwächungskoeffizienten $\mu(E)$ beschreiben. Aus Gl. 2.8 folgt:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (2.9)$$

Einfacher als die Fluenz ist die Standardionendosis D zu messen. Es besteht der Zusammenhang

$$\Phi = K_D(E) \cdot D \quad (2.10)$$

K_D ist eine Konstante. Im folgenden wird von einer konstanten Standardionendosis vor dem Eintritt in das Dosimeterglas ausgegangen.

Die Photonen in der Glastiefe x übertragen durch Ionisation Energie an das Dosimeterglas. Dabei wird eine zur absorbierten Energie proportionale Anzahl $F_R(x)$ von RPL-Zentren gebildet. Die Abgabe der Energie wird durch den linearen Energieabsorptionskoeffizienten $\eta'(E)$ gekennzeichnet. Damit wird die Dichte $F_R(x)$ der Fluoreszenzzentren in der Glastiefe x in erster Näherung:

$$F_R(x) = K_F \cdot \Phi(x) \cdot \eta'(E) \quad (2.11)$$

Dabei ist K_F das Verhältnis der absorbierten Energie zur Zahl der daraus gebildeten und bei der Auswertung angeregten RPL-Zentren. Hierbei wird der Einfluß von

Comptonquanten und Sekundärelektronen aus dem benachbarten Glasvolumen nicht berücksichtigt. Bei der Messung der RPL-Intensität des Dosimeterglases im Auswertegerät wird ein der Summe des Fluoreszenzlichtes im gesamten durch das UV-Licht angeregten Glasteilvolumen V proportionaler Anteil L gemessen. Nimmt man an, daß der Bruchteil des Lichtes des in einem Teilvolumen erzeugten RPL-Lichtes, der den Photomultiplier erreicht, unabhängig vom Ort des Teilvolumens im Dosimeterglas ist, so ergibt sich die Intensität $L'(E)$ des vom Multiplier gemessenen RPL-Lichtes durch Integration über alle Teilvolumina zu:

$$L'(E) \sim K_F \cdot \iiint F_R dV \quad (2.12)$$

Da die Dichte F_R der Fluoreszenzzentren nur eine Funktion der Koordinate x in Richtung der parallelen Photonenstrahlung ist, kann das Volumenintegral in Gl. 2.10 ersetzt werden durch

$$\begin{aligned} L'(E) &\sim K_F \cdot A^2 \int F_R(x) dx \\ &\sim K_F \cdot A^2 \int_0^{c'} K_D(E) \cdot D \cdot e^{-\mu(E) \cdot x} \cdot \eta'(E) dx \end{aligned} \quad (2.13)$$

Dabei ist A^2 der Querschnitt des Dosimeterglases senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der parallelen Photonenstrahlen, c' die Ausdehnung des Glases in Richtung ihrer Ausbreitung.

Bezieht man $L'(E)$ auf den Meßwert $L'(E_0)$ für eine Energie der Photonenstrahlung von $E_0 = 662$ keV, wie sie z.B. ^{137}Cs aussendet, so erhält man die relative Dosisempfindlichkeit $R_D(E)$.

$$R_D(E) = \frac{K_D(E) \frac{\eta'(E)}{\mu(E)} [1 - e^{-c'\mu(E)}]}{K_D(E_0) \frac{\eta'(E_0)}{\mu(E_0)} [1 - e^{-c'\mu(E_0)}]} \quad (2.14)$$

$R_D(E)$ wurde als Funktion der Photonenenergie E für ein Dosimeterglas vom Typ DOS 8 mit den Abmessungen $8 \times 8 \times 4.7 \text{ mm}^3$ berechnet und in Abb. 2.6 dargestellt.

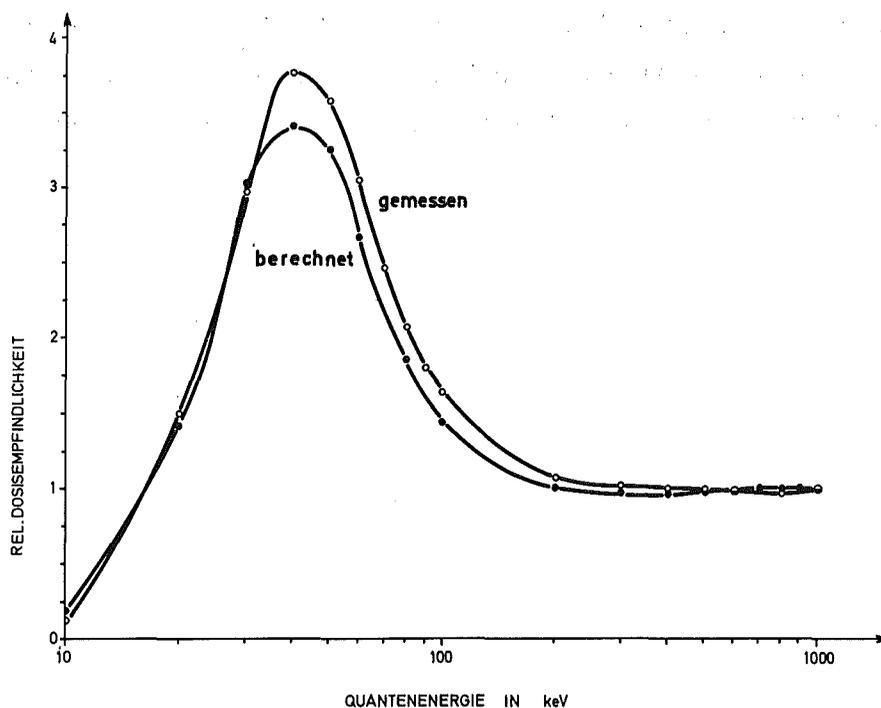


Abb. 2.6 RELATIVE DOSISEMPFINDLICHKEIT DES GLASES DOS 8

Die experimentell ermittelte Abhängigkeit der Dosisempfindlichkeit von der Photonenenergie E in Abb. 2.6 erhält man durch Bestrahlen verschiedener Dosimeter mit der gleichen Standardionendosis D bei verschiedenen Energien. Die Darstellung wurde derart normiert, daß die relative Empfindlichkeit bei der Photonenenergie von ^{137}Cs (662 keV) 1 beträgt. Die Unterschiede zwischen der berechneten und der experimentell ermittelten Kurve sind zum einen darauf zurückzuführen, daß bei der experimentellen Bestrahlung nicht monochromatische Strah-

lung, sondern hartgefilterte Röntgenstrahlung verwendet wurde, zum anderen, daß bei der Berechnung, wie schon erwähnt, Comptonquanten und Sekundärelektronen aus dem umgebenden Glasvolumen nicht berücksichtigt wurden.

Mit dem Faktor $R_D(E)$ läßt sich also bei zuvor bestimmter Energie E aus dem gemessenen Fluoreszenzlicht $L(E)$ die relative Dosisempfindlichkeit des Dosimeterglases korrigieren und die Standardionendosis D bestimmen.

3. GEOMETRISCHE BETRACHTUNG ZUM STRAHLENEINFALL IN DAS DOSIMETERGLAS

In dem folgenden Abschnitt sollen die geometrischen Verhältnisse beim Einfall einer parallelen Schar von Photonenstrahlen in das Dosimeterglas untersucht werden. Diese Betrachtung läßt erkennen, daß aus dem gemessenen Verlauf der RPL-Intensität in drei zueinander senkrechten Achsen im Glaswürfel die Strahleneinfallsrichtung und die Qualität der Strahlung ermittelt werden können.

Legt man in den Glaswürfel ein dreiachsiges kartesisches Koordinatensystem nach Abb. 3.1, so ist jeder Punkt des Würfels durch seine Koordinaten (x,y,z) eindeutig beschrieben. <18>

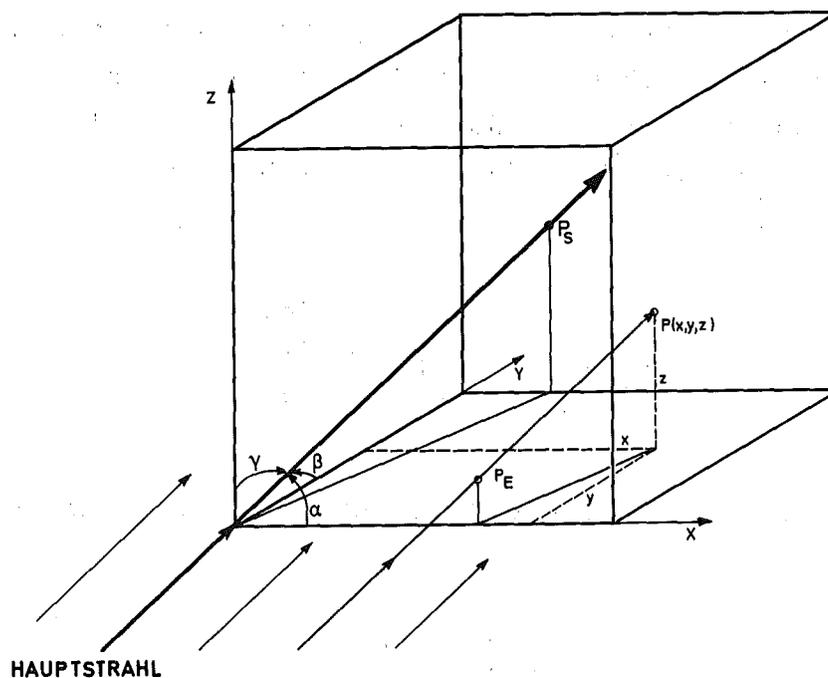


Abb. 3.1 EINFALL EINER PARALLELEN SCHAR VON PHOTONEN-
STRAHLEN IN DAS DOSIMETERGLAS

Setzt man den Dosimeterwürfel einer parallelen Schar von Photonenstrahlen aus, so wird jeder Punkt P im Glaswürfel genau von einem Photonenstrahl getroffen. Bei der folgenden Betrachtung werden durch Comptonstreuung abgelenkte Photonen vernachlässigt. Die Intensität $R_p(x,y,z)$ des Photonenstrahls im Glas nimmt exponentiell, wie in Kap. 2.3 dargestellt, mit dem im Dosimeterglas durchlaufenen Weg ab. Dieser Weg l ist die Strecke zwischen dem Eintrittspunkt P_E in den Dosimeterkörper und dem betrachteten Punkt P.

$$R_p(l) = R_0 \cdot e^{-\mu \cdot l} \quad (3.1)$$

Es soll nun für jeden Punkt $P(x,y,z)$ im Dosimeterwürfel die Intensität des Photonenstrahls bei beliebiger Einfallrichtung bestimmt werden.

Aus Abb. 3.1 ergeben sich folgende Beziehungen: Ein Strahl des parallelen Bündels, genannt "Hauptstrahl", tritt in einem Eckpunkt $P_0(0,0,0)$ des Würfels ein. Dieser Hauptstrahl verläßt den Würfel im "Hauptaustrittspunkt" $P_S(x_S, y_S, z_S)$. Die drei Koordinatenachsen mit den Einheitsvektoren

$$\vec{e}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \vec{e}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \vec{e}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.2,3,4)$$

und der Hauptstrahl, gekennzeichnet durch seinen Einheitsvektor

$$\vec{h} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

schließen jeweils miteinander die Winkel α , β und γ ein.

Zwischen diesen Winkeln besteht die Beziehung

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (3.6)$$

Der Hauptstrahl bestimmt mit der x-Achse die Ebene E_1 , mit der y-Achse die Ebene E_2 , mit der z-Achse die Ebene E_3 (Abb. 3.2).

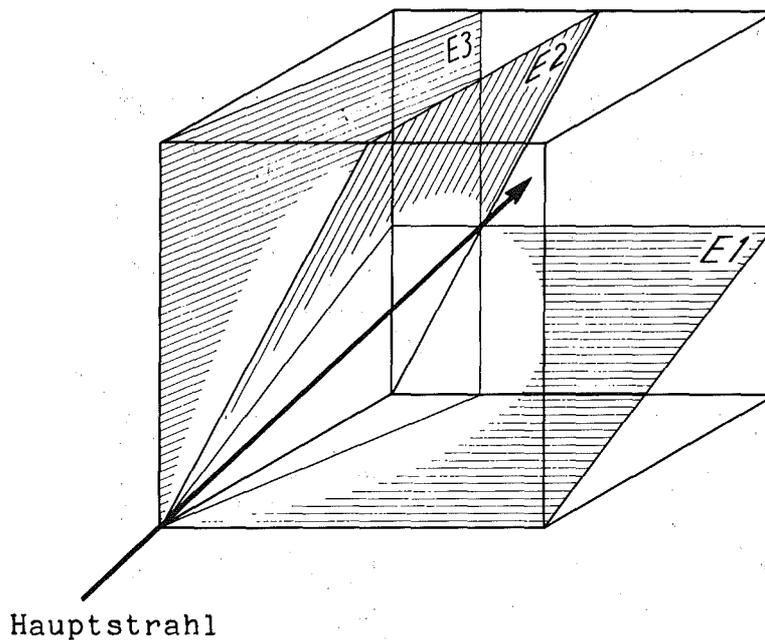


Abb. 3.2 HAUPTSTRAHL MIT EBENEN E_1 , E_2 , E_3

Die Gleichungen der Ebenen ergeben sich zu

$$E_1: y \cos \alpha - z \cos \beta = 0$$

$$E_2: z \cos \alpha - x \cos \gamma = 0 \quad (3.7, 8, 9)$$

$$E_3: x \cos \beta - y \cos \alpha = 0$$

Diese drei Ebenen teilen mit den sechs Randflächen den

Würfel in sechs Teilvolumina V_1 bis V_6 . (Abb. 3.3)

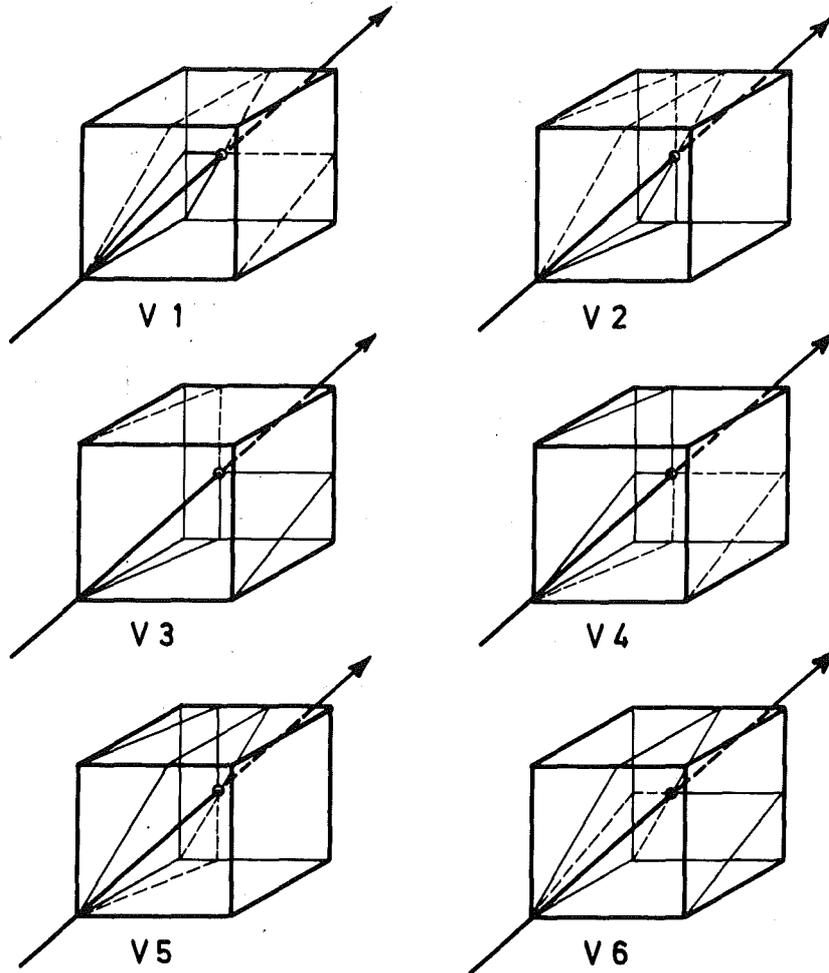


Abb. 3.3 TEILVOLUMINA IM GLASWÜRFEL

Betrachtet man einen Punkt $P_{23}(x_{23}, y_{23}, z_{23})$ in dem Teilvolumen V_2 oder V_3 , so liegt der zugehörige Eintrittspunkt P_{E23} auf der Seitenfläche des Würfels, die von der x -Achse und der y -Achse bestimmt wird. Die Gleichung der Geraden durch P_{E23} und P_{23} ergibt sich zu:

$$\frac{x-x_{23}}{\cos \alpha} = \frac{y-y_{23}}{\cos \beta} = \frac{z-z_{23}}{\cos \gamma} \quad (3.10)$$

Für alle Punkte der xy-Ebene, also auch für P_{E23} gilt:

$$z = 0, \quad z_{E23} = 0 \quad (3.11, 12)$$

Daraus folgt:

$$\frac{x_{E23} - x_{23}}{\cos \alpha} = -\frac{z_{23}}{\cos \gamma}, \quad \frac{y_{E23} - y_{23}}{\cos \beta} = \frac{z_{23}}{\cos \gamma} \quad (3.13, 14)$$

Daraus berechnen sich die Koordinaten des Eintrittspunktes P_{E23} zu

$$P_{E23} = \begin{bmatrix} x_{23} - z_{23} \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} \\ y_{23} + z_{23} \frac{\cos \beta}{\cos \gamma} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Der Abstand l der beiden Punkte P_{E23} und P_{23} berechnet sich zu:

$$l_{23}(x_{23}, y_{23}, z_{23})$$

$$= \sqrt{\left(x_{23} - x_{23} + z_{23} \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma}\right)^2 + \left(y_{23} - y_{23} + z_{23} \frac{\cos \beta}{\cos \gamma}\right)^2 + z_{23}^2} \quad (3.16)$$

$$l_{23}(z_{23}) = \frac{z_{23}}{\cos \gamma}$$

Liegt $P = P_{56}$ im Volumen V_5 oder V_6 , so ist die Eintrittsfläche die x-z-Ebene. Die Koordinaten des Eintrittspunktes P_{E56} errechnen sich dann entsprechend zu

$$P_{E56} = \begin{bmatrix} x_{56} - y_{56} \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \\ z_{56} - y_{56} \frac{\cos \gamma}{\cos \beta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

und der Abstand

$$l_{56} = \frac{y_{56}}{\cos \beta} \quad (3.18)$$

Liegt $P = P_{14}$ im Volumen V_1 oder V_4 , so ergibt sich der Abstand zu

$$l_{14} = \frac{x_{14}}{\cos \alpha} \quad (3.19)$$

Nimmt man entsprechend Gleichung 3.1 einen exponentiellen Abfall der RPL-Intensität als Funktion des durchlaufenen Weges im Dosimeterglas an, so ergibt sich die Intensität der RPL in einem Punkt P im Teilvolumen

$$V_2 \text{ oder } V_3 \text{ zu: } R_{p23} = R_0 \cdot e^{-z_{23} \frac{\mu}{\cos \gamma}} \quad (3.20)$$

$$V_5 \text{ oder } V_6 \text{ zu: } R_{p56} = R_0 \cdot e^{-y_{56} \frac{\mu}{\cos \beta}} \quad (3.21)$$

$$V_1 \text{ oder } V_4 \text{ zu: } R_{p14} = R_0 \cdot e^{-x_{14} \frac{\mu}{\cos \alpha}} \quad (3.22)$$

4. MESSUNG VON RPL-INTENSITÄTSPROFILEN

4.1 ABTASTEN DER RPL-INTENSITÄT ENTLANG DER KOORDINATEN-ACHSEN (SCANNEN)

Wird ein quaderförmiges Teilvolumen des Glaswürfels, wie in Abb. 4.1 dargestellt, zur RPL angeregt, so "sieht" der Detektor die Summe Q der RPL-Intensitäten aller Punkte in diesem Teilvolumen.

$$Q = \sum_{i=1}^M R_{pi} \quad (4.1)$$

Dabei ist M die Anzahl aller Punkte in dem angeregten Teilvolumen.

Verschiebt man dieses Teilvolumen entlang einer Koordinatenachse, so erhält man ein RPL-Intensitätsprofil entlang dieser Achse. Dieser Vorgang wird im folgenden als Abtasten oder Scannen bezeichnet. Es ist prinzipiell möglich, die Summation innerhalb dieses Teilvolumens durch eine dreidimensionale Integration über der Funktion der RPL-Intensität durchzuführen, so daß man einen geschlossenen mathematischen Ausdruck für das Signal des Detektors beim Scannen entlang dieser Koordinatenachse erhält. Der rechnerische Aufwand wird aber sehr groß, da das quaderförmige Meßvolumen in bis zu sechs Teilvolumina zerfällt, deren Begrenzungsflächen zum Teil zu den Seitenflächen des Würfels nicht parallel sind. Deshalb wurde ein Näherungsverfahren entwickelt, das die Verhältnisse beim Scannen beliebig genau nachbildet. Dazu wurde ein dreidimensionales Punktgitter von N Punkten P_{ijk} mit $N = 17$ in den Würfel gelegt. Der Abstand benachbarter Punkte ist konstant und entspricht 0.5 mm.

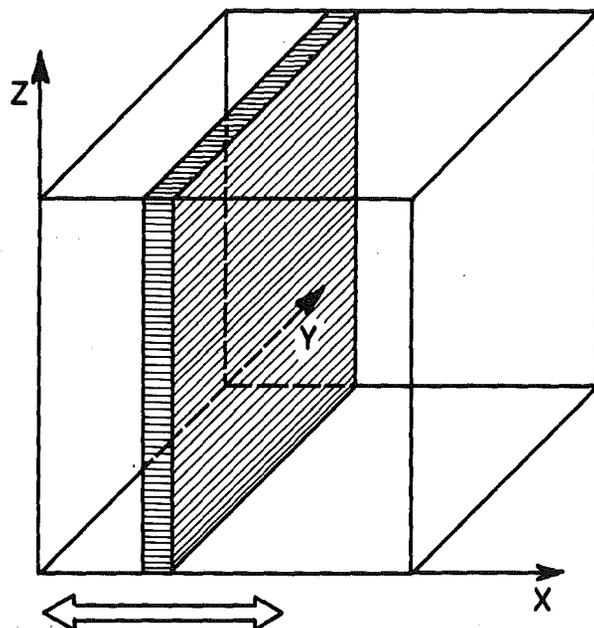
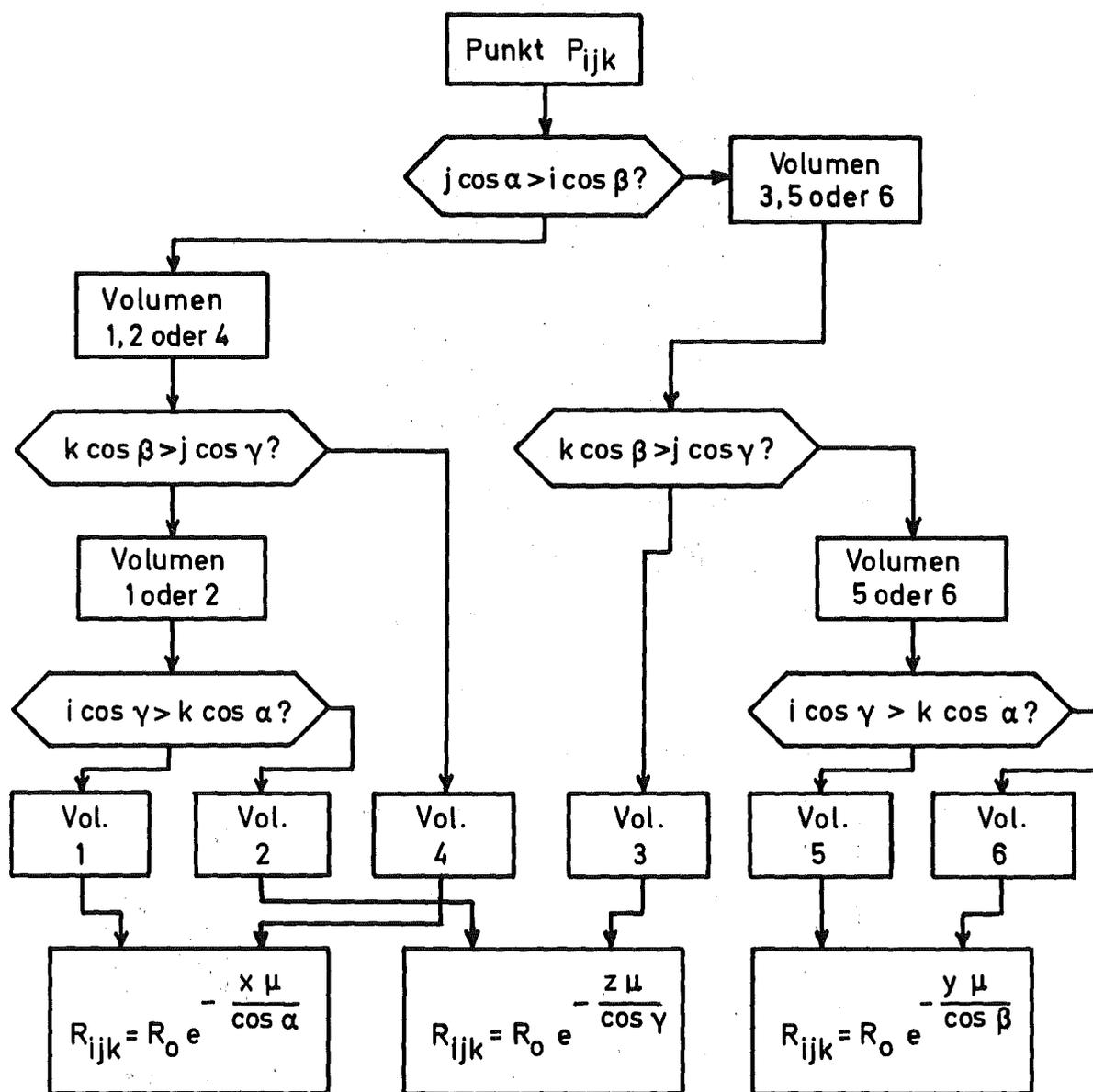


Abb. 4.1 VERSCHIEBEN DES MESSVOLUMENS BEIM SCANNEN

im Glas. Nacheinander wird nun für jeden Punkt P_{ijk} untersucht, in welchem der in Abb. 3.3 dargestellten Teilvolumina V_1 bis V_6 des Würfels er liegt. Dann wird die am Ort dieses Punktes herrschende RPL-Intensität nach Gl. 3.20, 3.21 oder 3.22 berechnet. So erhält man ein dreidimensionales Feld R_p der Größe N^3 , das die Intensität im Glaswürfel für $N \rightarrow \infty$ beliebig genau beschreibt. Für ein festes i werden alle Elemente R_{ijk} des Feldes zu der Summe $S(i)$ addiert. Durchläuft nun i alle möglichen Werte, so erhält man das eindimensionale Feld S . Seine Elemente $S(i)$ stellen das Profil der RPL-Intensität dar, das man ähnlich auch beim Abtasten eines Dosimeterglases entlang der x -Achse erhält. Entsprechend verfährt man entlang der y - und der z -Achse und erhält so bei beliebigen Strahleneinfallswinkeln

für jedes Dosimeterglas drei zueinander gehörende RPL--
Intensitätsprofile. Für genügend großes N wird dieses
Verfahren beliebig genau. Im folgenden Diagramm ist
dieses Verfahren noch einmal zusammengefaßt:



Tab. 4.1 FLUSSDIAGRAMM ZUR BESTIMMUNG DER LAGE EINES
PUNKTES IM DOSIMETERGLASWÜRFEL

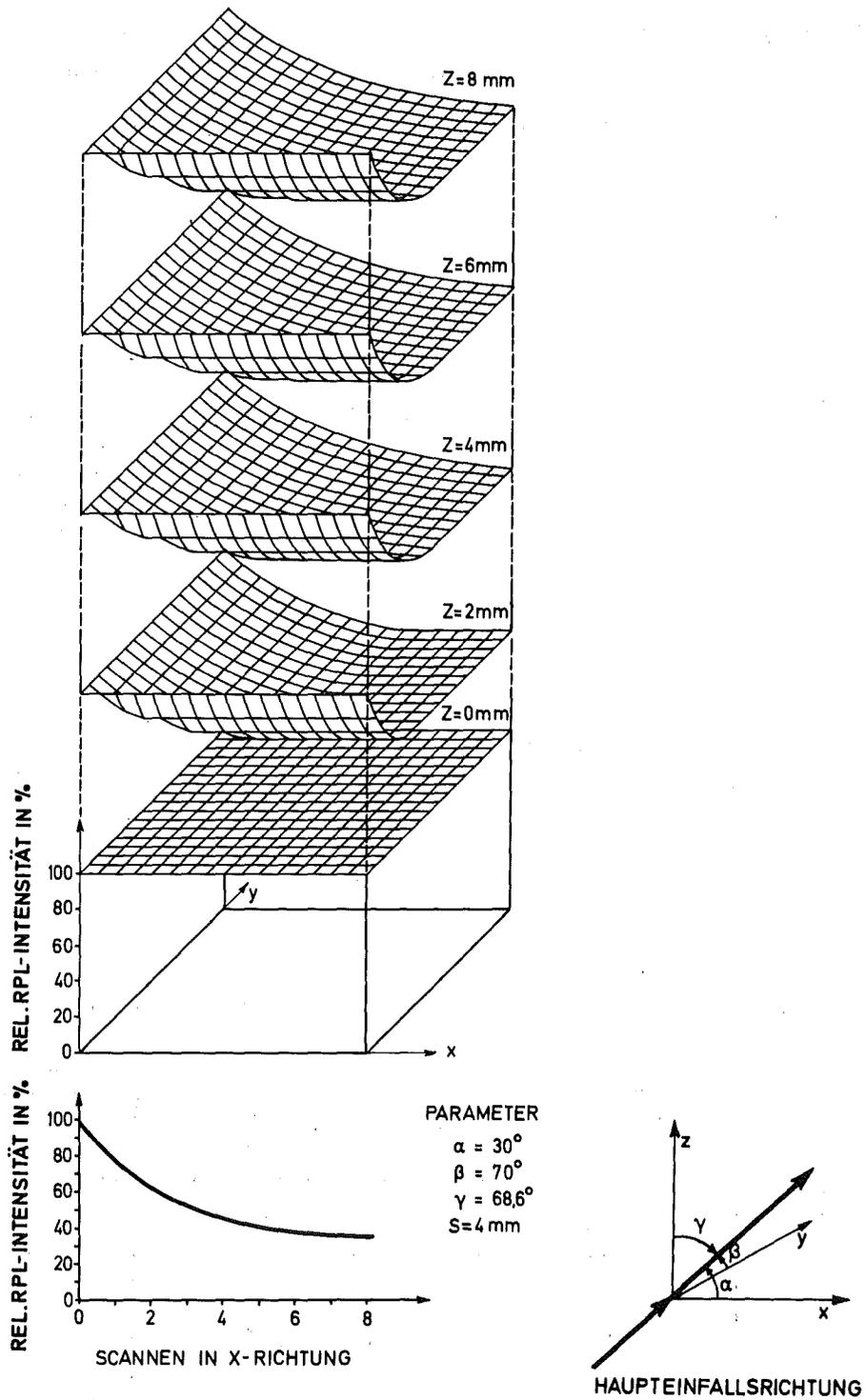


Abb. 4.2 RPL-INTENSITÄT IN VERSCHIEDENEN GLASTIEFEN ALS ERGEBNIS EINES RECHENMODELLS

Nach dem Diagramm in Tab. 4.1 wurde ein Rechenprogramm erstellt und damit die Verhältnisse beim Scannen für verschiedene Winkel α , β und γ zwischen dem Hauptstrahl und den Koordinatenachsen nachgebildet. Ebenso wurde die Abfallkonstante S variiert. Sie stellt, wie in Kap. 2.4 gezeigt wurde, die Glastiefe dar, bei der die Intensität in den Knotenpunkten des Gitters in verschiedenen Schichten des Glases in verschiedenen Schichten des Glases sowie das Scannen in x-Richtung als Summation der RPL-Intensität aller Punkte für ein konstantes x .

Abb. 4.2 veranschaulicht das Berechnen der RPL-Intensität in den Knotenpunkte des Gitters in verschiedenen Schichten des Glases sowie das Scannen in x-Richtung als Summation der RPL-Intensität aller Punkte für ein konstantes x .

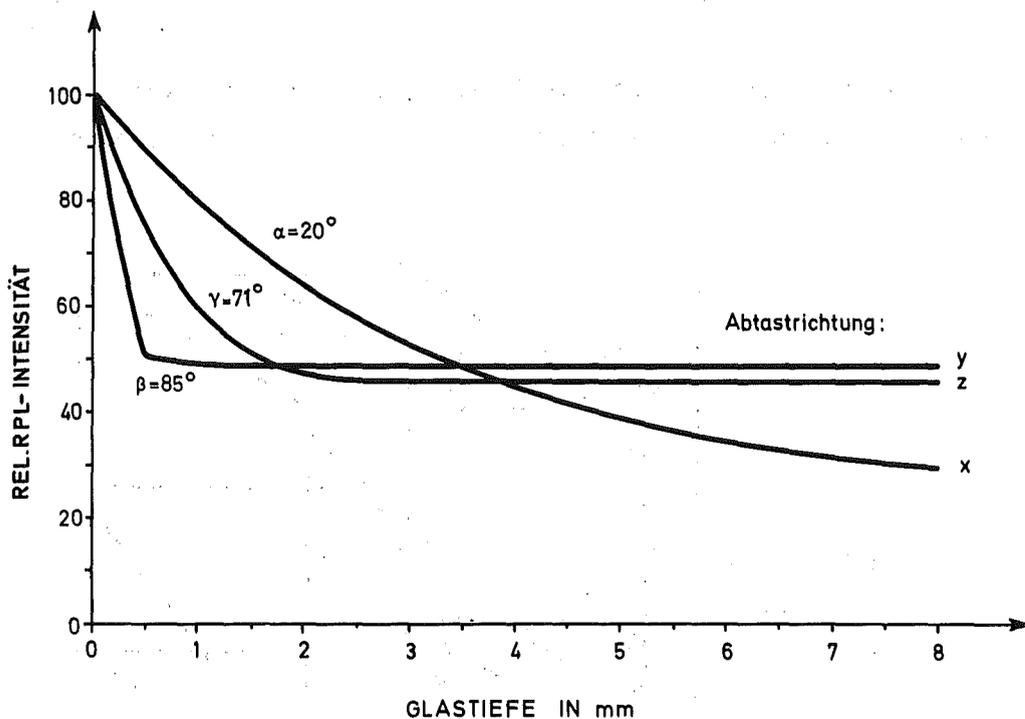


Abb. 4.3 BERECHNETE RPL-INTENSITÄTSPROFILE BEIM ABTASTEN ENTLANG DER x -, y - UND z -ACHSE BEI EINER BESTRAHLUNG MIT 25 keV-PHOTONEN UND EINER ENFALLSRICHTUNG MIT $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 85^\circ$, $\gamma = 71^\circ$

Abb. 4.3 zeigt die drei RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases, wie sie sich als Resultat des mathematischen Modells ergeben. Die Winkel α , β und γ sind dabei die Winkel des Hauptstrahls zur x-, y- und z-Achse des Koordinatensystems; sie kennzeichnen, wie in Kap. 3.2 gezeigt wurde, die Richtung des Einfalls der Photonenstrahlen in das Dosimeterglas. Die Energie der Strahlung hat dabei einen konstanten Wert.

Betrachtet man die einzelnen Profile, so fällt folgendes auf:

- Je größer der Winkel zur Koordinatenachse, in deren Richtung das Profil aufgenommen wurde, desto steiler ist der Abfall in den ersten Millimetern Glastiefe.
- Zwei der drei RPL-Intensitätsprofile besitzen einen Bereich, in dem die Intensität konstant bleibt.

Letzteres wird verständlich, wenn man die Abtastverhältnisse entlang der x-Achse in Abb. 4.4 betrachtet.

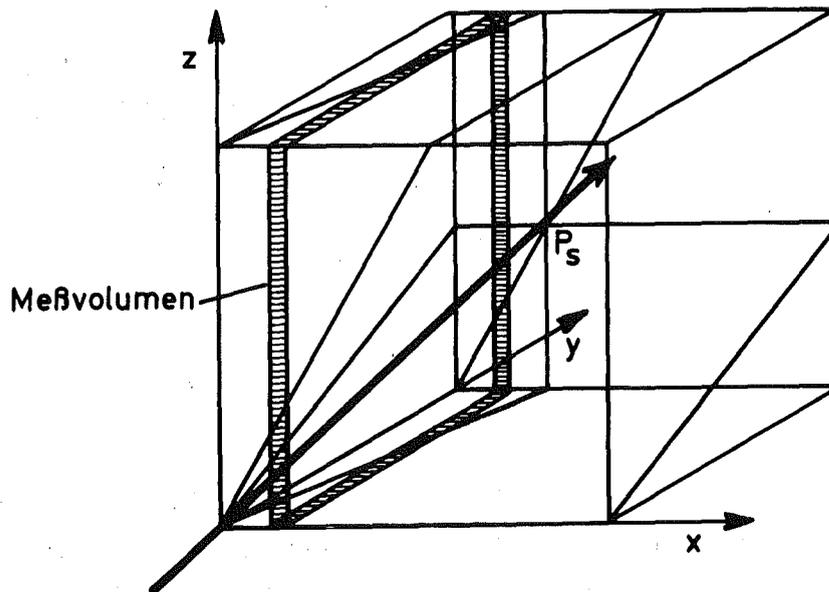


Abb. 4.4: ABTASTEN ENTLANG DER x-ACHSE

Die Koordinaten des Austrittspunktes P_S des Hauptstrahles seien x_S , y_S , und z_S . Befindet sich das quaderförmige Meßvolumen bei kleinerem x als $x = x_S$, so enthält es unter anderem Punkte aus den Teilvolumina V_1 und V_4 . Bei ihnen ist die RPL-Intensität eine Funktion der x -Koordinate (Gl. 3.22) und damit wird die Summe der Intensitäten im Meßvolumen ebenfalls eine Funktion von x . Für $x > x_S$ sind nur die Räume V_3 , V_5 und V_6 beteiligt; dort ist $R = R(y)$ oder $R = R(z)$ und damit die Summe der Intensitäten unabhängig von x . Entsprechend wird die Summe der Intensitäten im Meßvolumen unabhängig von y für $y > y_S$ beim Scannen in y -Richtung und unabhängig von z für $z > z_S$ beim Scannen in z -Richtung.

Diese Betrachtung läßt sich für eine Analyse der Strahleneinfallsrichtung umkehren. Die drei RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases seien für $x > x_S$, $y > y_S$ und $z > z_S$ parallel zur Abszisse. Dann sind x_S , y_S und z_S die Koordinaten des Austrittspunktes des Hauptstrahles. Aus ihnen lassen sich die Winkel α , β und γ berechnen, die der Hauptstrahl mit den Koordinatenachsen einschließt. Es ist:

$$\alpha = \arccos \frac{x_S}{\sqrt{x_S^2 + y_S^2 + z_S^2}} \quad \beta = \arccos \frac{y_S}{\sqrt{x_S^2 + y_S^2 + z_S^2}} \quad (4.2)$$

(4.3)

$$\gamma = \arccos \frac{z_S}{\sqrt{x_S^2 + y_S^2 + z_S^2}} \quad (4.4)$$

Dabei liegt der Austrittspunkt des Hauptstrahles entweder in der Ebene mit $x_S = A$ oder $z_S = A$, wobei A die Kantenlänge des Würfels ist. Daraus folgt:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (4.5)$$

4.2 BESTIMMEN DER STRAHLENQUALITÄT

Überlagert man die drei durch Abtasten in x-, y- und z-Richtung gewonnenen RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases, so erhält man für die jeweiligen Bestrahlungsverhältnisse das RPL-Summenprofil R_S dieses Glases. Dieses Summenprofil wurde für vier verschiedene Strahleneinfallrichtungen und Strahlenqualitäten berechnet, wobei die Strahlenqualität durch die in Kap. 2.4 definierte Abfallkonstante S gekennzeichnet ist. Vergleicht man die Summenprofile bei gleicher Abfallkonstanten S für verschiedene Kombinationen der Einfallswinkel, so unterscheiden sich diese Profile nur wenig. Es zeigt sich, daß die relative RPL-Intensität im RPL-Summenprofil im wesentlichen nur von der Strahlenqualität bestimmt wird.

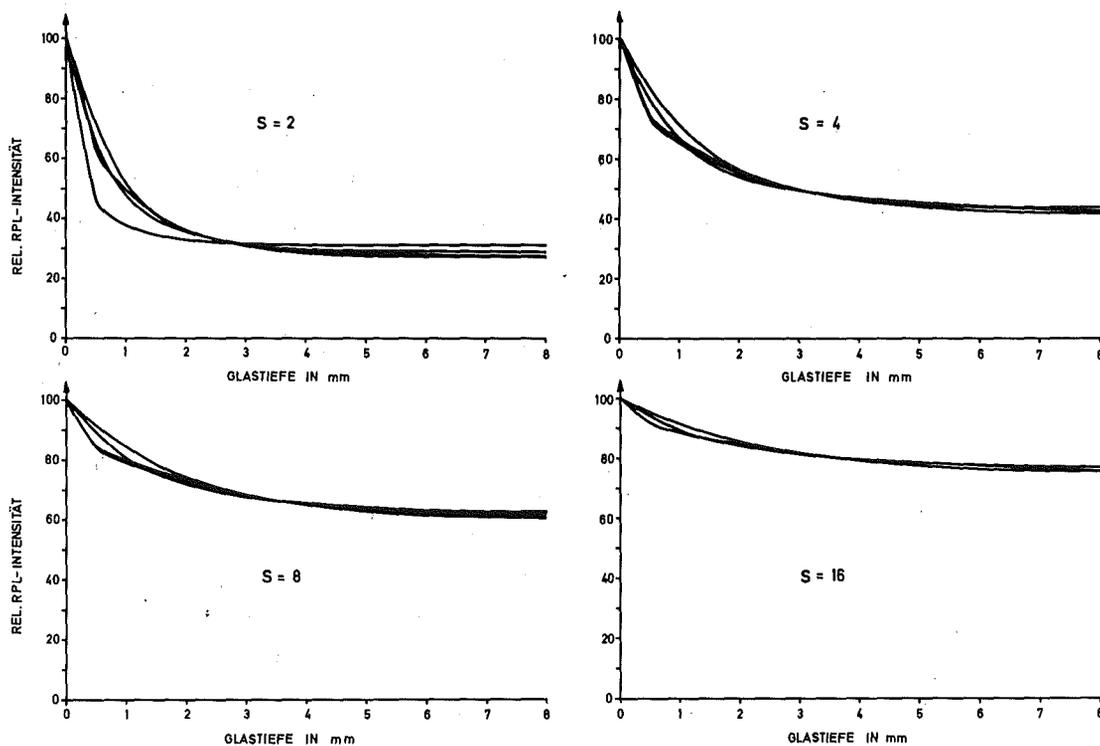


Abb. 4.5 SUMMENPROFILE BEI VERSCHIEDENEN EINFALLSRICHTUNGEN

In Abb. 4.5 wurden benutzt:

Einfallswinkel- kombinationen in Grad:	Abfallkonstante S in mm:	Entspricht Strahlenquali- tät in keV:
45 89 45	2	23
30 60 89	4	30
65 70 30	8	41
54 55 55	16	65

Abb. 4.6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem experimentell gemessenen Abfall der RPL-Intensität im Summenprofil und der Abfallkonstanten S. Die angegebene Streubreite umfaßt die verschiedenen Strahleneinfallsrichtungen.

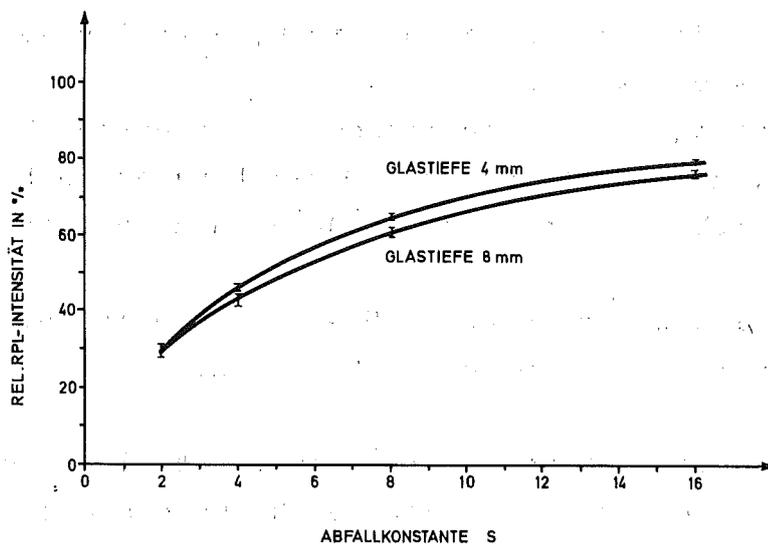


Abb. 4.6 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN DER RELATIVEN RPL-INTENSITÄT IN VERSCHIEDENEN GLASTIEFEN UND DER ABFALLKONSTANTEN S

Aufgrund dieser theoretischen Betrachtung ist es für jede beliebige Einfallrichtung möglich, mit Hilfe des RPL-Summenprofils die Strahlenqualität zu bestimmen.

4.3 VERFAHREN ZUR MESSUNG VON RPL-INTENSITÄTSPROFILIEN

4.3.1 ANFORDERUNGEN AN DAS VERFAHREN

Es sollen nun verschiedene technische Möglichkeiten diskutiert werden, die dreidimensionale RPL-Intensitätsverteilung im Dosimeterglas abzutasten.

Zur Verwirklichung dieser Aufgabe muß

- der Ablauf der Messung automatisch, notfalls auch von Hand gesteuert werden,
- die Abtastung in drei zueinander senkrechten Ebenen erfolgen, möglichst ohne das Dosimeterglas zu bewegen,
- die zeitliche Reihenfolge der Abtastung variiert werden können,
- die Position des anregenden UV-Lichtbündels relativ zum Dosimeterglas reproduzierbar sein.

Die folgende Betrachtung soll zeigen, daß eine Reproduzierbarkeit der Positionierung von beispielsweise 0,1 mm für die Bestimmung der Einfallrichtung ausreichend ist. Werden durch mangelnde Reproduzierbarkeit der Stellung des UV-Bündels relativ zum Dosimeterglas bei der Abtastung für die Koordinaten des Hauptaustrittspunktes $P_S(x_S, y_S, z_S)$ die falschen Werte $P_S(x_S + \Delta x, y_S + \Delta y, z_S + \Delta z)$ gemessen, so hat das auf die Bestimmung der

Einfallsrichtung folgende Auswirkungen:

Nach Gl. 4.2 bis Gl. 4.4 sind die Einfallswinkel des Hauptstrahles relativ zu den Koordinatenachsen mit den richtigen Koordinaten:

$$\alpha = \arccos \frac{x_s}{B} \quad (4.6)$$

$$\beta = \arccos \frac{y_s}{B} \quad (4.8)$$

$$\gamma = \arccos \frac{z_s}{B} \quad (4.10)$$

mit den falschen Koordinaten:

$$\alpha_f = \arccos \frac{x_s + \Delta x}{B'} \quad (4.7)$$

$$\beta_f = \arccos \frac{y_s + \Delta y}{B'} \quad (4.9)$$

$$\gamma_f = \arccos \frac{z_s + \Delta z}{B'} \quad (4.11)$$

$$B = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2} \quad (4.12)$$

$$B' = \sqrt{(x_s + \Delta x)^2 + (y_s + \Delta y)^2 + (z_s + \Delta z)^2} \quad (4.13)$$

Sind zum Beispiel:

$$x_s = y_s = z_s = 4 \text{ mm}$$

so errechnen sich die wahren Winkel:

$$\alpha = 54,78^\circ$$

$$\beta = 54,78^\circ$$

$$\gamma = 54,78^\circ$$

und die Meßfehler:

$$\Delta x = -\Delta y = \Delta z = 0,1 \text{ mm} \quad (4.14, 15)$$

und die falschen Einfallswinkel zu:

$$\alpha_f = 54,09^\circ \quad | \text{Fehler} | < 0,8^\circ$$

$$\beta_f = 56,11^\circ \quad < 1,8^\circ$$

$$\gamma_f = 54,09^\circ \quad < 0,8^\circ$$

Für die Abtastung eines Dosimeterglaswürfels in drei

zueinander senkrechten Ebenen bieten sich folgende Verfahren an:

4.3.2 LINEARBEWEGUNG DES GLASES

Hierbei wird das Dosimeterglas auf einem Meßtisch senkrecht zum UV-Lichtbündel bewegt. Das anregende UV-Licht trifft durch einen Schlitz auf ein Teilvolumen des Glases.

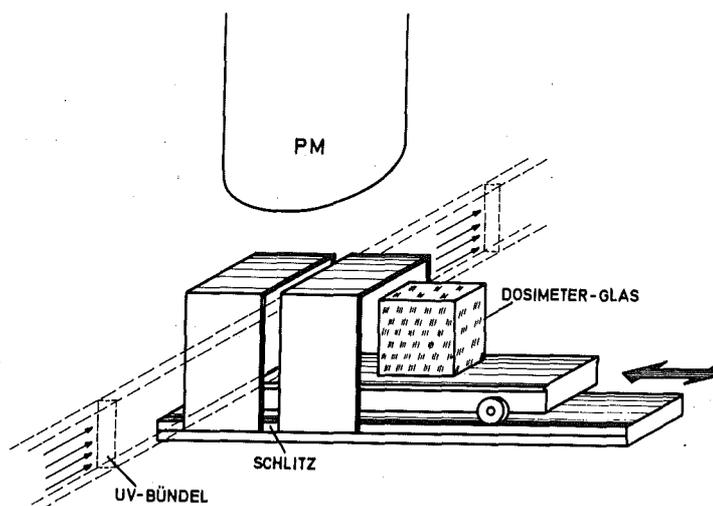


Abb. 4.7. ABTASTEN MIT LINEARBEWEGUNG DES GLASES

Der Antrieb erfolgt über einen Gleichstrom- oder Schrittmotor mit Getriebe, die Wegmessung über Codierlineal, Inkremental-Weggeber oder Potentiometer. Bei Schrittmotoren kann der zurückgelegte Weg durch Zählen der Schritte ermittelt werden.

Vorteile sind hier eine hohe Genauigkeit der Positionierung bis auf $\pm 1\mu\text{m}$, kein Fehler durch Temperaturdrift,

sowie der stets senkrechte Eintritt des UV-Bündels in das Dosimeterglas. Als Nachteil anzusehen ist die mechanische Vorrichtung zum Drehen und Abtasten des Glases in den drei Koordinatenachsen. Für die drei Meßtische mit Wegmeßsystemen sind hierbei viele mechanische Teile nötig und große Massen zu bewegen. Ferner ist die Vorgabe des Sollwertes der Position nicht einfach, eine Variation des Abtastmusters schwierig, so daß dieser hohe konstruktive Aufwand nicht zu vertreten ist. <19,20>

4.3.3 ABTASTEN MIT GLASFASERKEGEL ALS LICHTLEITER

Auch bei diesem Verfahren wird das Dosimeterglas während der Abtastung nicht bewegt. Das ganze Glasvolumen wird gleichzeitig zur RPL angeregt. <21-26>

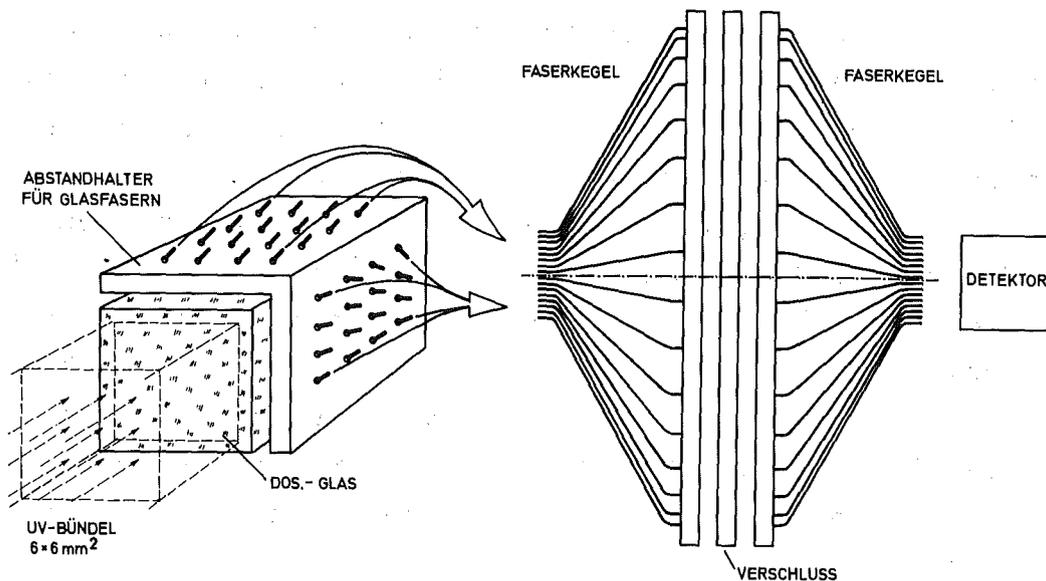


Abb. 4.8 ABTASTEN ÜBER LICHTLEITER

Je ein geordnetes Bündel von Glasfasern wird über drei zueinander senkrechten Oberflächen des Dosimeterwürfels angeordnet. Sie bilden jeweils eine zweidimensionale Matrix von Lichtleiterenden. Das andere Ende einer jeden Glasfaser ist an den Detektor angekoppelt. Dazwischen liegt ein elektrisch steuerbarer optischer Verschuß. Auf der Seite des Detektors kann der Abstand der Faserenden untereinander größer sein als auf der Seite, die dem Dosimeterglas zugewandt ist. Dadurch können die Abmessungen des Verschlusses größer sein, als die Oberfläche des Dosimeterwürfels, so daß die Anforderung an die mechanische Präzision der Anordnung geringer wird. Als steuerbarer optischer Verschuß wäre eine rotierende Scheibe mit spiralförmig angeordneten Löchern denkbar ("Nipkow-Scheibe") oder eine Flüssigkristallzelle mit matrixförmig angeordneten Elektroden.

Als vorteilhaft anzusehen ist, daß mechanische Genauigkeit nur bei nicht bewegten Teilen nötig wird, nämlich bei der Herstellung und Anordnung des Glasfaserbündels und daß das Dosimeterglas bei der Auswertung nicht bewegt wird. Nachteilig ist die begrenzte räumliche Auflösung, bedingt durch die begrenzte Anzahl von Lichtfasern, die auf der zur Verfügung stehenden Fläche von 8 mm x 8 mm angeordnet werden können, sowie der hohe Preis einer Einzelanfertigung der Glasfaseroptik. Durch den großen Öffnungswinkel der Glasfasern von 22° in Luft und $14,4^\circ$ in Dosimeterglas werden auch benachbarte Glasbereiche mitgemessen. Ferner ist bei einer rotierenden Scheibe als Verschuß das Abtastmuster starr festgelegt. Bei Flüssigkristallen ist der zur Zeit erreichbare Kontrast von höchstens 1 : 100 für diese Anwendung unzureichend.

4.3.4 ABTASTEN DURCH DREHSPIEGEL

Das parallel ausgeblendete UV-Lichtbündel wird zur Messung der RPL-Intensitätsprofile durch eine Anordnung von elektrisch drehbaren Spiegeln nacheinander auf verschiedene zueinander senkrechte Flächen des Glaswürfels gelenkt.

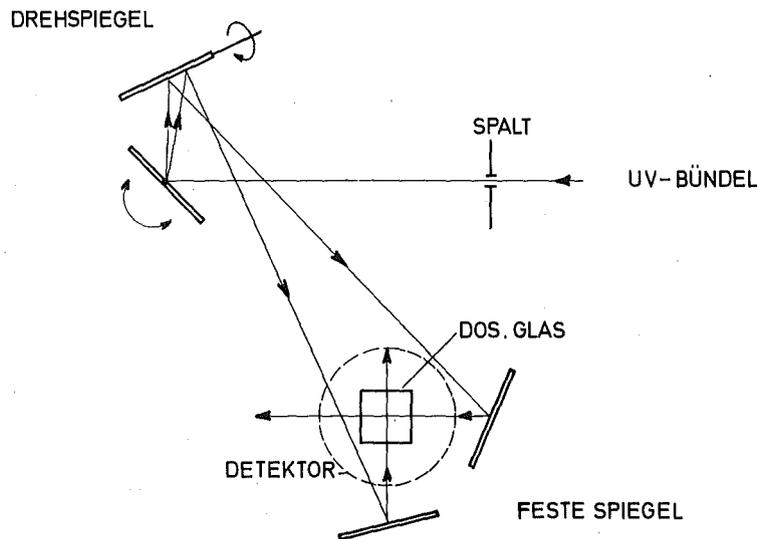


Abb. 4.9 ABTASTEN MIT DREHSPIEGEL

Durch einen schwenkbaren Spalt, durch zwei im Strahlengang aufeinanderfolgende Spiegel mit zueinander senkrechten Drehachsen und durch zwei feste Spiegel ist eine Abtastung in drei zueinander senkrechten Ebenen im Glas möglich, ohne das Dosimeterglas zu bewegen.

Als Vorteile sind zu nennen:

Es sind nur geringe Massen zu bewegen (Scannerspiegel) und es treten nur Drehbewegungen auf. Dadurch ist eine präzise Lagerung einfach zu erreichen und eine hohe Le-

bensdauer möglich. Die Auslenkung der Spiegel ist proportional dem eingepprägten Strom. Dies vereinfacht die Ansteuerung einer bestimmten Position des UV-Bündels im Glas. Die Abtastung kann schnell erfolgen, das Abtastmuster ist leicht veränderbar. Durch die optische Anordnung nach Abb. 4.9 kann ein Dosimeterglas in drei Achsen abgetastet werden, ohne das Glas zu drehen oder überhaupt zu bewegen. Der geringe Aufwand führt zu einem erheblich geringeren Preis als bei den beiden zuvor gezeigten Lösungen. <27,28>

Nachteile sind:

Das UV-Bündel trifft am Rand nicht senkrecht auf die Eintrittsfläche des Glases. Dieser Fehler beträgt bei horizontalem Abtasten $0,87^\circ$, beim Abtasten in der dritten Achse $0,98^\circ$ aufgrund des kürzeren "Lichtzeigers" zwischen dem bewegten Spiegel und dem Glas. Da die Auslenkung des Drehspiegels in Analogtechnik erfolgen muß, sind örtliche Abweichungen vom Sollwert durch Drift möglich. Eine Regelung der jeweiligen Position des UV-Lichtbündels ist schwierig, da sie nur mit großem Aufwand gemessen werden kann.

Eine Bewertung der Vor- und Nachteile der drei Lösungen führte zur Entscheidung für eine Anordnung zur Abtastung über Drehspiegel nach Abb. 4.9.

4.4 OPTISCHE KAMMER ZUR MESSUNG VON RPL-INTENSITÄTS-PROFILEN

Entsprechend der Anordnung in Abb. 4.10 wurde eine lichtdichte optische Kammer zur Messung von RPL-Intensitäts-

profilen entwickelt und gebaut.

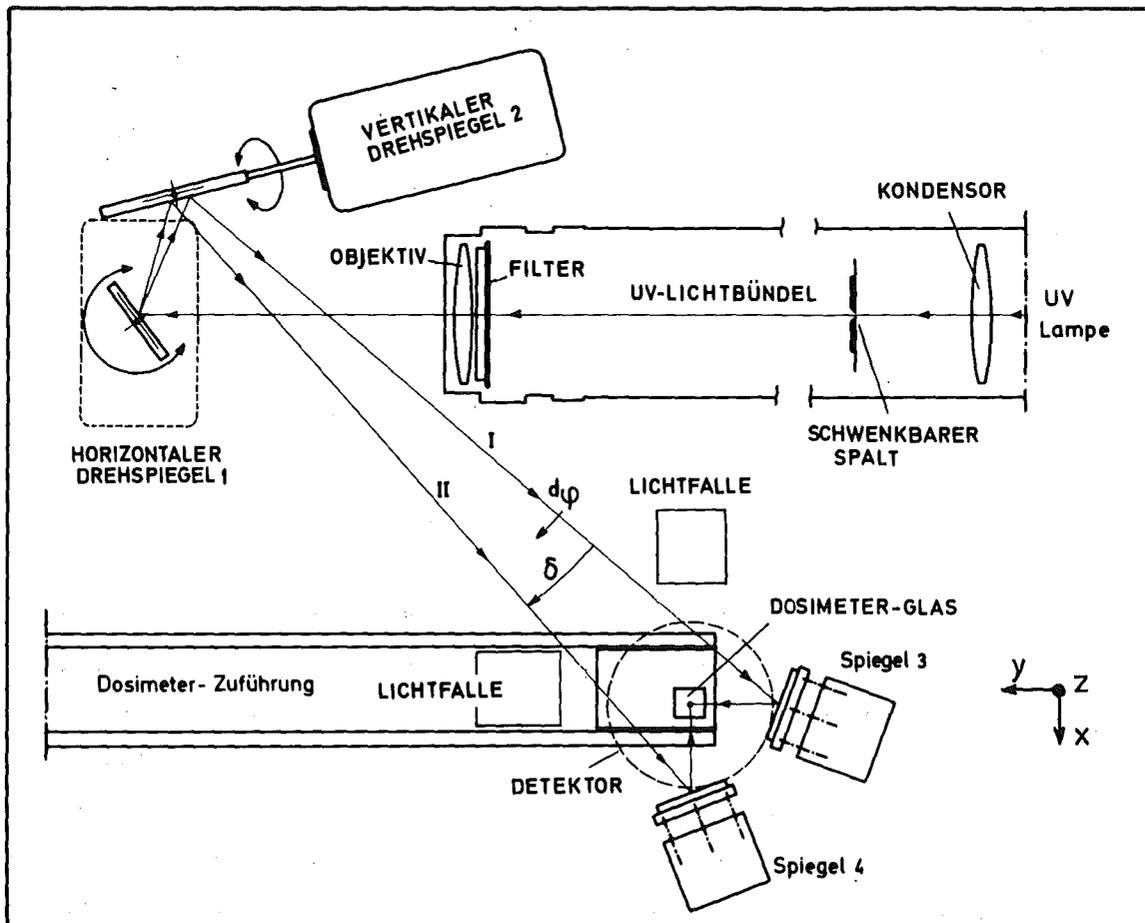


Abb. 4.10 OPTISCHE KAMMER ZUR MESSUNG VON RPL-INTENSITÄTS-
TÄTSPROFILIEN

Das Licht einer UV-Lampe, einer Quecksilberdampfdrucklampe vom Typ OSRAM HBO 100W2, wird durch einen Kondensator und einen schwenkbaren Spalt zu einem schmalen Lichtbündel der Größe 6 mm x 0,2 mm ausgeblendet. Die Helligkeit der UV-Lampe wird durch einen Sensor gemessen

und auf einen konstanten Wert geregelt. Ein UV-Filter begrenzt das Spektrum auf die zur RPL-Anregung erwünschte 365 nm-Linie. Der Spalt wird durch das Objektiv über den horizontalen und den vertikalen Drehspiegel sowie über einen der beiden festen Spiegel auf das Dosimeterglas im Maßstab 1 : 1 abgebildet (Abb. 4.11).

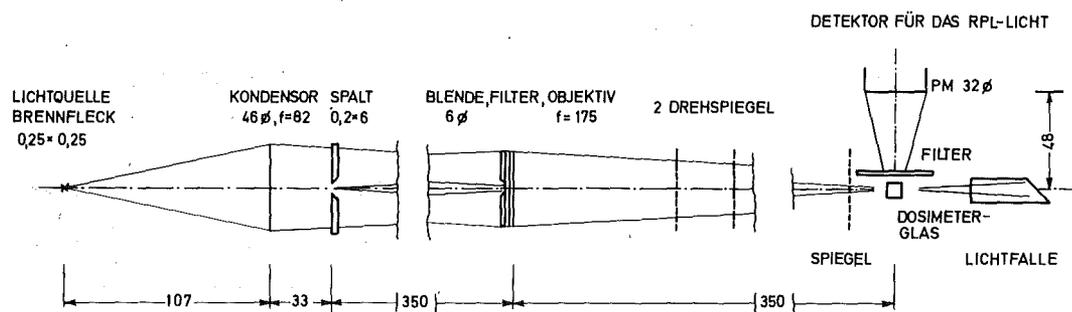


Abb. 4.11 STRAHLENGANG IM OPTISCHEN SYSTEM

Das UV-Bündel regt ein Teilvolumen des Glases von etwa $8 \times 6 \times 0,2 \text{ mm}^3$ zur Fluoreszenz an. Die RPL-Intensität wird senkrecht zum anregenden Lichtbündel mit einem feststehenden, vertikal angeordneten Photomultiplier gemessen. UV-Streulicht und die Primärfluoreszenz werden durch ein vorgeseztes Orangefilter stark geschwächt. Der Anteil des Anregungslichtes, der aus dem Dosimeterglas wieder austritt, wird in einer Lichtfalle absorbiert.

4.5 SCHRITTWEISE ABTASTUNG DER RPL-INTENSITÄTSPROFILE IN DREI EBENEN

Zu Beginn einer Abtastung des RPL-Intensitätsprofils in x-Richtung steht der schwenkbare Spalt in der gezeichneten vertikalen Stellung (Abb. 4.10). Der horizontale Drehspiegel 1 wird durch einen elektrischen Strom dI um einen Winkel $d\varphi$ gedreht und dann in der neuen Stellung festgehalten. Der vertikale Drehspiegel 2 wird durch einen konstanten Strom in seiner Winkellage fixiert. Die RPL-Intensität des durch das UV-Bündel angeregten Glasteilvolumens wird gemessen und im Rechner gespeichert. Danach wird der horizontale Drehspiegel erneut um einen Winkel $d\varphi$ gedreht, das UV-Bündel im Glas um ein Stück dx verschoben und wieder die RPL-Intensität gemessen. Auf diese Weise erhält man zeitlich nacheinander eine punktweise Aufnahme des RPL-Intensitätsprofils im Dosimeterglas in x-Richtung. Die Abtastung in y-Richtung erfolgt in gleicher Weise wieder mit vertikalem Spalt. Zuvor wird der horizontale Drehspiegel um einen Winkel $d\delta$ gedreht, so daß das UV-Bündel II auf das Dosimeterglas trifft. Zur Abtastung in z-Richtung wird der horizontale Drehspiegel in Position I festgehalten, der Spalt mittels zweier Zugmagnete in die horizontale Stellung geschwenkt und das nun horizontal liegende UV-Bündel I durch Drehen des Spiegels 2 in z-Richtung über das Glas bewegt.

5. EINFLUSS DES SCHRÄGEN EINFALLS UND DER INTENSITÄTS- VERTEILUNG IM ABTASTENDEN UV-LICHTBÜNDEL

5.1 EINFLUSS DER INTENSITÄTSVERTEILUNG IM QUERSCHNITT DES UV-LICHTBÜNDELS

Um ein ausreichend großes Meßsignal zu erhalten, muß die differentielle Messung einer RPL-Intensität im Glas stets über einen größeren Volumenbereich erfolgen. Die Breite d des abtastenden UV-Lichtbündels führt aber zu einer "Unschärfe" des Abtastvorganges. Hinzu kommt, daß auch der Intensitätsverlauf des UV-Lichtes im Querschnitt des anregenden Lichtbündels einen Einfluß hat auf das Ergebnis des Abtastvorganges. Verwendet man zur optischen Abtastung einer räumlichen Verteilung $R(x)$ einen optischen Spalt mit der örtlichen Lichtdurchlässigkeit $I(x)$, dann erhält man hinter dem Spalt anstelle der Verteilung $R(x)$ ihr Bild $F(x)$. Die Intensitätsverteilung $F(x)$ ergibt sich zu

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} R(z) \cdot I(x-z) dz \quad (5.1)$$

Tastet man die Funktion $R(x)$ nicht durch einen optischen Spalt, sondern durch ein zur RPL anregendes UV-Lichtbündel ab, so entspricht der örtlichen Lichtdurchlässigkeit des Spaltes $I(x)$ die Lichtintensitätsverteilung im Querschnitt des Bündels. Diese Funktion $I(x)$ wird in der Literatur auch als "Spaltfunktion" bezeichnet. Da die Durchlässigkeit des optischen Spaltes für $x < x_1$ und $x > x_2$ vernachlässigt werden kann, wobei durch Verschieben des Koordinatennullpunktes stets $x_1 = 0$ möglich

ist, ist in Gl. 5.1 eine Integration von 0 bis x_2 ausreichend. Sie kann somit als Faltungsprodukt dargestellt werden. <29,30,31>

$$F(x) = I(x) * R(x) \text{ o} \rightarrow I(s) \cdot R(s) \quad (5.2)$$

Will man den Einfluß von UV-Lichtbündeln unterschiedlicher Breite d und mit unterschiedlichem Intensitätsverlauf $I(x)$ auf das RPL-Intensitätsprofil untersuchen, so kann man Gl. 5.2 benützen. Hierbei werden die Laplace-Transformierten von $I(x)$ und $R(x)$ berechnet, das Produkt gebildet und anschließend rücktransformiert. Liegen die Funktionen aber nicht in geschlossener Form vor, sondern als eine Reihe von diskreten Stützwerten als Ergebnis einer Messung, so ist es einfacher, die Integration von Gl. 5.1 punktweise durchzuführen.

$$F_i = \sum_{i=0}^N R_i \cdot I'_i \quad I'_i = I_{i-k} \quad (5.3,4)$$

Dabei durchläuft k alle Werte von 0 bis N , N ist die Anzahl der Stützpunkte für die Funktion R , i die Anzahl der diskreten Verschiebungen des Spaltes beim Abtasten. Der Abstand der Stützwerte h' ist konstant. Beim Abtasten von R wird zuerst der Spalt, beziehungsweise das UV-Lichtbündel I um $h' \cdot k$ verschoben, er geht über in den Spalt I' nach Gl. 5.4. In Abb. 5.1 ist der Spalt in verschiedenen Positionen dargestellt, darunter die durch Multiplikation und Summation nach Gl. 5.3 gewonnene Bildfunktion F_i .

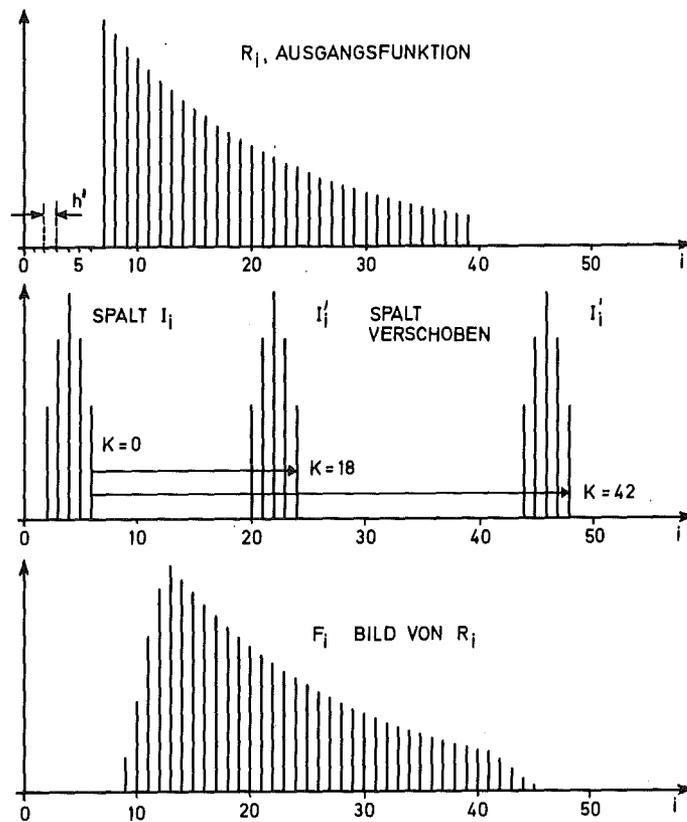


Abb. 5.1 ABTASTEN DURCH VERSCHIEBEN EINES SPALTES

5.1.1 MESSEN DER INTENSITÄTSVERTEILUNG IM QUERSCHNITT DES ANREGENDEN UV-LICHTBÜNDELS

Der Intensitätsverlauf im UV-Lichtbündel quer zur optischen Achse wurde mit der Anordnung nach Abb. 5.2 gemessen.

Die Messung erfolgte an der Stelle im Strahlengang,

an der sich beim Auswerten eines Dosimeters das Dosimeterglas befindet.

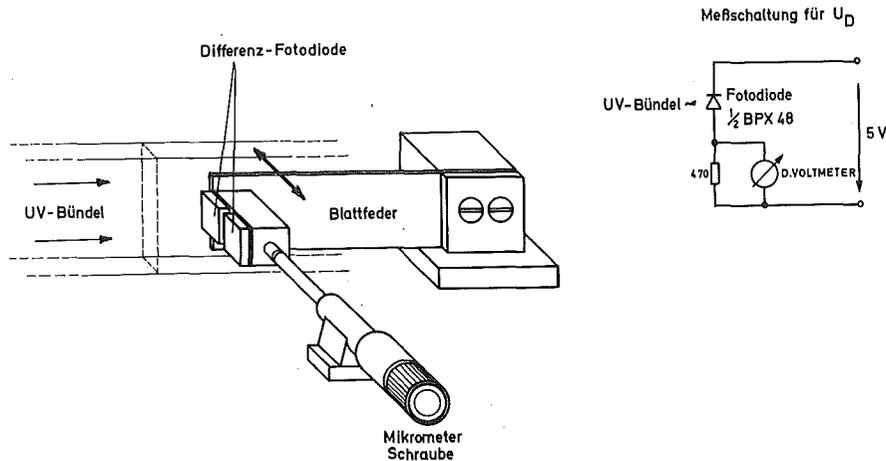


Abb. 5.2 ANORDNUNG ZUM MESSEN DES INTENSITÄTSVERLAUFS
IM UV-LICHTBÜNDEL

Der schwenkbare optische Spalt, der durch das UV-Lichtbündel mittels der Optik auf das Dosimeterglas abgebildet wird, hat eine Höhe von 6 mm und eine Breite von 0,2 mm. Als Detektor bei dieser Messung wird nur eine Hälfte einer Differenz-Photodiode vom Typ BPX 48 der Firma Siemens benutzt. Sie wird in Sperrrichtung betrieben. Bei einem Arbeitswiderstand von 470 Ohm ist ihre Ausgangsspannung linear zur Gesamtintensität des auftreffenden Lichtes. Diese Photodiode, welche üblicherweise als Detektor für Positionierungsaufgaben eingesetzt wird, besteht aus zwei gleichartigen, elektrisch getrennten Dioden, deren aktive Flächen durch einen Spalt von 50 getrennt sind. Für die hier betrachtete Anwendung ist es besonders günstig, daß diese Flächen durch gerade Kanten begrenzt werden. Mit der Vorrichtung in Abb. 5.2 läßt sich die Photodiode genau reproduzierbar quer zum UV-Lichtbündel bewegen. Da die Diode auf der Blattfeder befestigt ist, muß bei ihrer Auslenkung durch die Mikrometerschraube eine entsprechende Abweichung von der gera-

den Bahn berücksichtigt werden. <32>

Der gesuchte Verlauf der UV-Lichtintensität in x -Richtung sei $I(x)$. Die Vorderkante der aktiven Fläche der Photo-diode wird bis zur Stelle $x = x_{n-1}$ in den Strahlengang gefahren (Abb. 5.2).

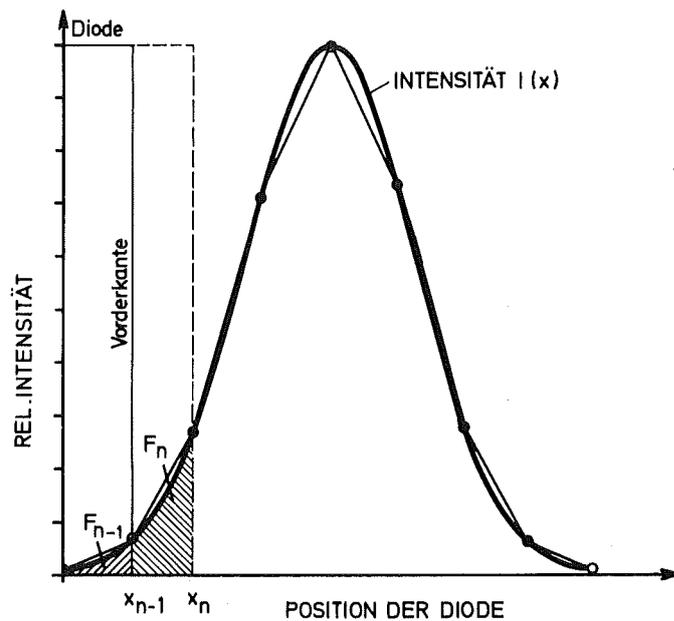


Abb. 5.3 ANNÄHERUNG DES LICHTINTENSITÄTSVERLAUFS DURCH POLYGONZUG

Dann trifft der schraffierte Anteil F_{n-1} des UV-Lichtbündels auf die Diodenfläche und erzeugt die Spannung $U_D(x_{n-1})$. Wird die Diode bis zur Stelle x_n in den Strahlengang gebracht, wirkt $F_{n-1} + F_n$ auf die Detektorfläche und erzeugt $U_D(x_n)$.

Zur Vereinfachung wird der stetige Verlauf von $I(x)$ durch einen Polygonzug angenähert. Dies erscheint zulässig, da durch Vergrößern der Anzahl der Stützpunkte die Nähe-

rung beliebig genau wird. Die Flächen F_{n-1} und F_n werden dann zu zwei Trapezflächen F'_{n-1} und F'_n .

$$U_D(x_{n-1}) \sim F_{n-1} = \int_0^{x_{n-1}} I(x) dx \quad (5.5)$$

$$\approx F'_{n-1} = \frac{1}{2} [I(0) + I(x_{n-1})] [x_{n-1} - 0]$$

$$U_D(x_n) \sim F_{n-1} + F_n = \int_0^{x_n} I(x) dx \quad (5.6)$$

$$\approx F'_{n-1} + F'_n = F'_{n-1} + \frac{1}{2} [I(x_{n-1}) + I(x_n)] [x_n - x_{n-1}]$$

Daraus folgt:

$$U_D(x_n) - U_D(x_{n-1}) \approx F'_n = \frac{1}{2} [I(x_{n-1}) + I(x_n)] [x_n - x_{n-1}] \quad (5.7)$$

Wird ein Stützwert $I(x_m)$ inmitten des Intervalls x_{n-1} bis x_n eingeführt, so kann

$$\frac{1}{2} [I(x_{n-1}) + I(x_n)] \text{ durch } I(x_m) \quad (5.8)$$

ersetzt werden. Damit wird

$$I(x_m) \sim \frac{U_D(x_n) - U_D(x_{n-1})}{x_n - x_{n-1}} \quad (5.9)$$

Das bedeutet, daß sich aus den Differenzen der gemessenen Diodenspannungen der Intensitätsverlauf im Querschnitt

des UV-Lichtbündels ermitteln lässt.

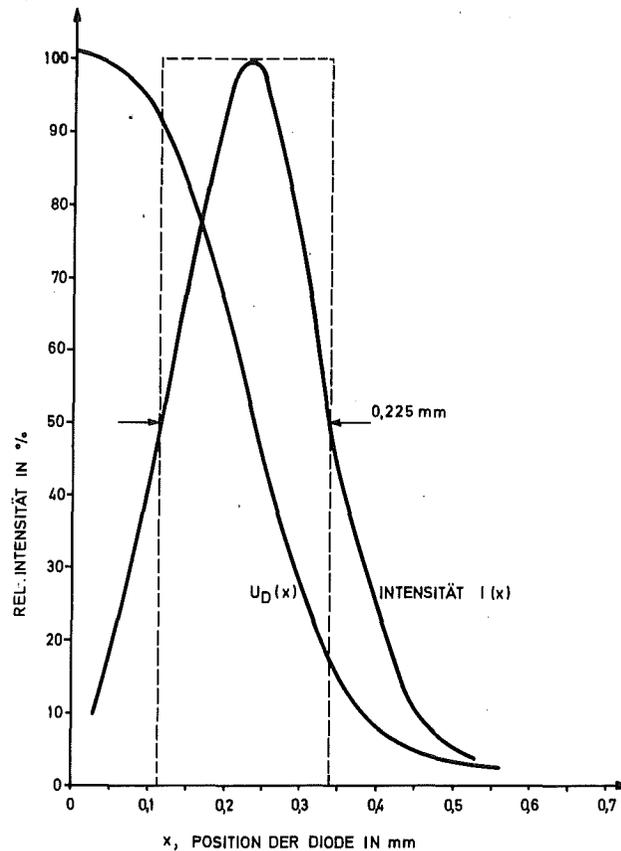


Abb. 5.4 ERMITTELN DES INTENSITÄTSVERLAUFS IM QUERSCHNITT DES UV-LICHTBÜNDELS AUS DER SPANNUNG DER PHOTODIODE

Abb. 5.4 zeigt den gemessenen Verlauf der Diodenspannung als Funktion der Position der Photodiode und den daraus nach Gl. 5.9 berechneten Verlauf der Intensität im Querschnitt des UV-Lichtbündels. Wie aus dieser Abbildung zu ersehen ist, ist die Intensität innerhalb eines Bereiches von 0,22 mm noch größer als 50% des Maximalwertes. Diese Breite des "optischen Spaltes" weicht geringfügig ab von der Breite des "physischen Spaltes" im Auswertegerät mit 0,2 mm.

5.1.2 EINFLUSS DER INTENSITÄTSVERTEILUNG IM UV-LICHT- BÜNDEL AUF DAS GEMESSENE RPL-INTENSITÄTSPROFIL

Abb. 5.5 zeigt ein RPL-Intensitätsprofil, wie es beim Abtasten des Dosimeterglases mit einem rechteckigen UV-Lichtbündel der Breite $d = 0,2$ mm zu erwarten ist, Abb. 5.6 beim Abtasten mit dem vorliegenden UV-Lichtbündel. Aus den Abb. 5.5 und 5.6 ist zu ersehen, daß die Breite eines Bündels die Steigung beim Eintritt und den Abfall beim Austritt beeinflusst, die abgerundete Form im Querschnitt des UV-Bündels das RPL-Intensitätsprofil beim Ein- und Austritt abrundet. Das Profil wird demnach beim Ein- und beim Austritt in einer Breite verändert, die der Breite des abtastenden UV-Lichtbündels entspricht. In den restlichen Glaszonen hat die Spaltfunktion, das heißt die Intensitätsverteilung im UV-Lichtbündel, keinen verfälschenden Einfluß auf die Form des gemessenen RPL-Intensitätsprofils, solange das Bündel schmal ist. Insbesondere bleibt das Verhältnis der Signale aus verschiedenen Glastiefen entlang einer Achse erhalten, wie die folgende Darstellung zeigt:

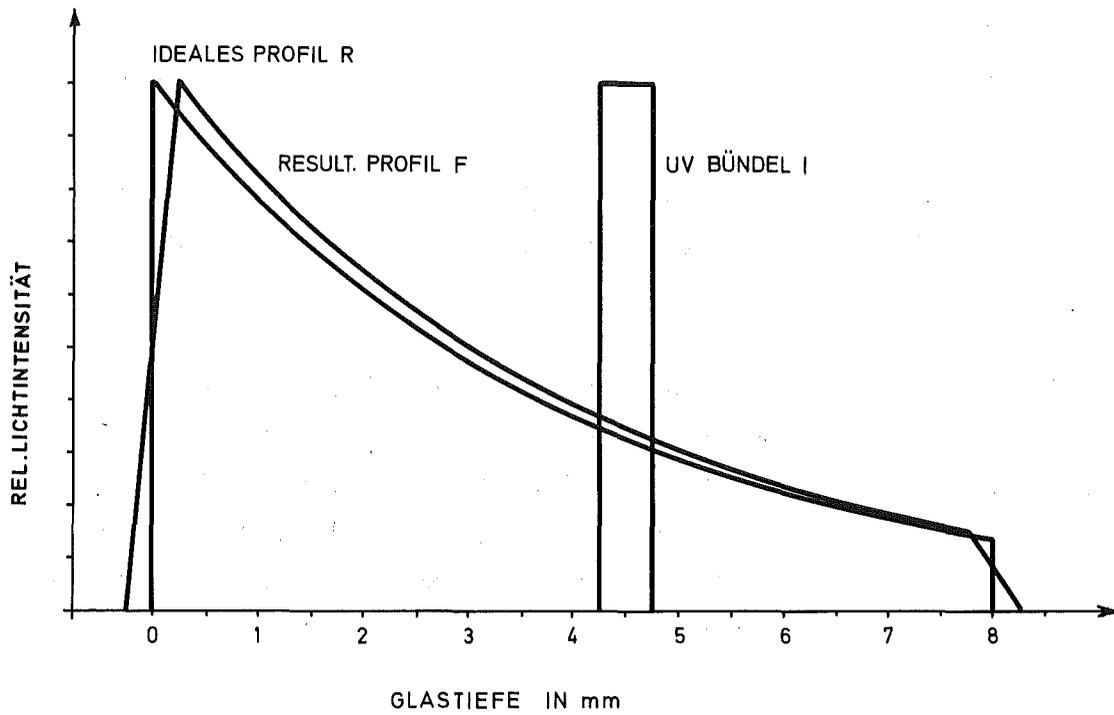


Abb. 5.5 ABTASTEN MIT IDEALEM UV-LICHTBÜNDEL

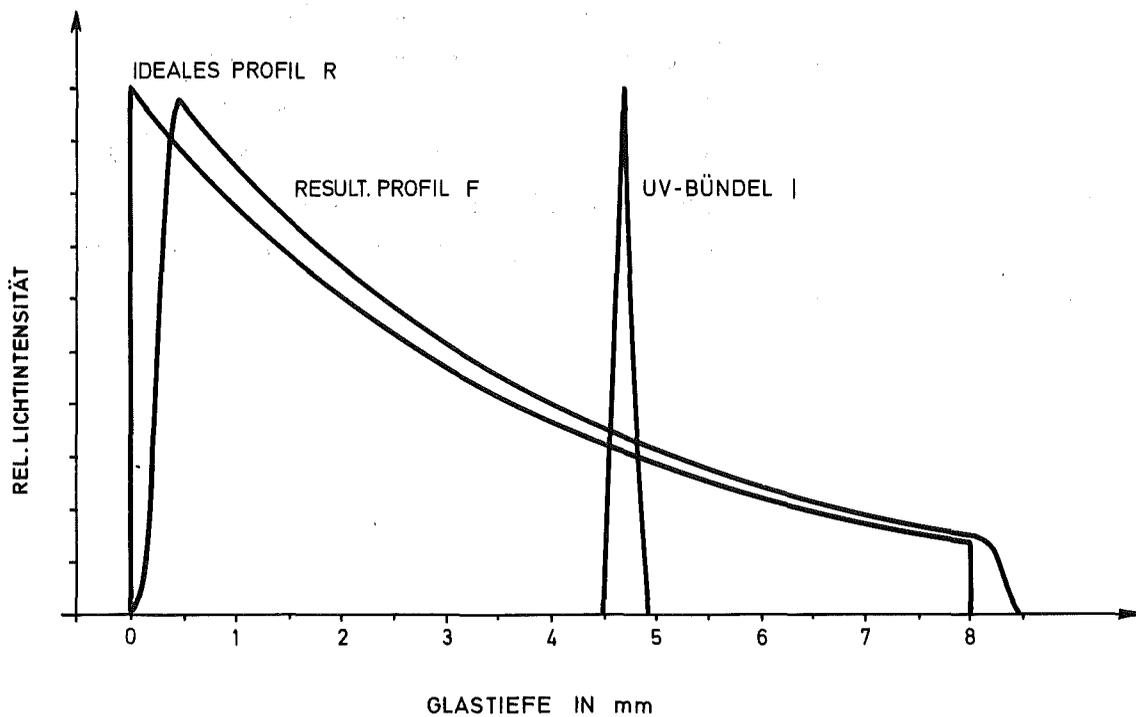


Abb. 5.6 ABTASTEN MIT REALEM UV-LICHTBÜNDEL

Es seien $R_1(x_1)$ und $R_2(x_1 + \Delta x)$ die RPL-Intensitäten

an den Stellen x_1 und $x_1 + \Delta x$. Nach Gl. 5.1 erhält man beim Abtasten mit dem UV-Lichtbündel an der Stelle x_1 das Signal F_1 :

$$F(x_1) = \int_{-\infty}^{\infty} R(z) \cdot I(x_1 - z) dz \quad (5.10)$$

Da die Breite $d = 0,2$ mm des abtastenden UV-Lichtbündels klein ist im Vergleich zur Breite $A = 8$ mm des RPL-Profiles, kann die Intensität R innerhalb eines Bereiches

$$x_1 - d/2 < x < x_1 + d/2 \quad (5.11)$$

und

$$x_1 + \Delta x - d/2 < x < x_1 + \Delta x + d/2 \quad (5.12)$$

durch die konstanten Werte R_1 und R_2 angenähert werden. Damit wird

$$F(x_1) \approx R_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} I(x_1 - z) dz = R_1 \cdot K_{\text{Spalt}} \quad (5.13)$$

und

$$F(x_2) \approx R_2 \cdot K_{\text{Spalt}} \quad (5.14)$$

wobei K_{Spalt} , die Fläche unter der Kurve der Intensitätsverteilung des UV-Lichtbündels, einen konstanten Wert hat, unabhängig vom Ort x der Abtastung. Somit wird

$$\frac{F(x_1)}{F(x_2)} \approx \frac{R_1}{R_2} \quad (5.15)$$

Das bedeutet, daß beim Abtasten mit schmalem UV-Licht-

bündel der für die Strahlenqualität spezifische Abfall des RPL-Intensitätsprofils unverfälscht wiedergegeben wird.

5.2 SCHRÄGER EINFALL DES UV-LICHTBÜNDELS IN DAS DOSIMETERGLAS

Die Positionierung des Dosimeterhalters in der optischen Kammer wird derartig justiert, daß das UV-Lichtbündel

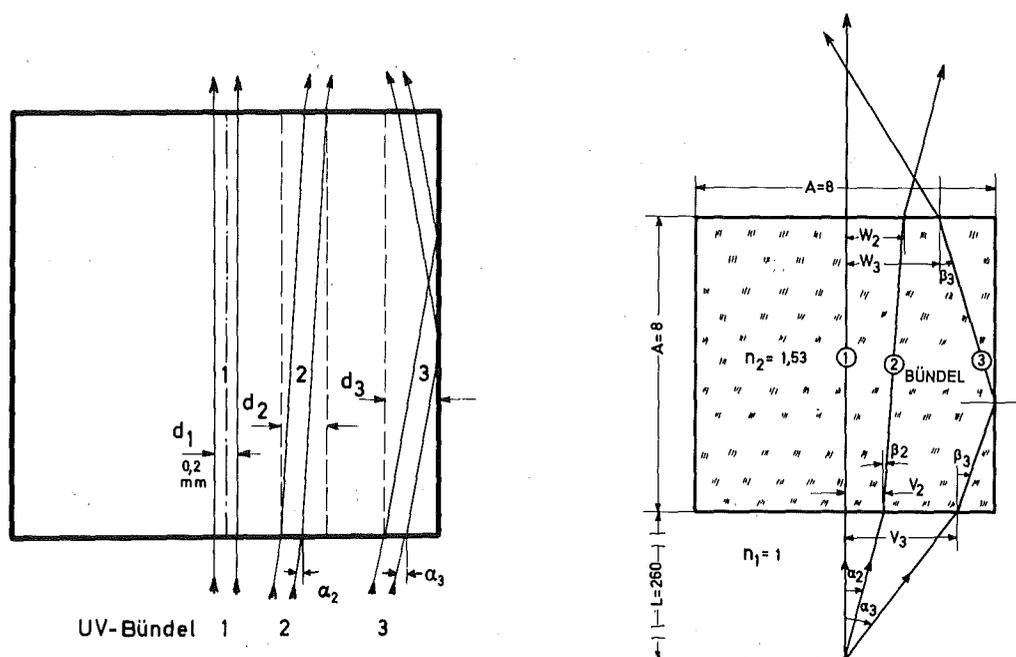


Abb. 5.7, 5.8 SCHRÄGER EINFALL DES UV-LICHTBÜNDELS IN DAS DOSIMETERGLAS

in der Mitte des Dosimeterglases senkrecht auftrifft (Bündel 1 in Abb. 5.8). Für alle anderen Punkte der Eintrittsfläche des Glases erfolgt der Einfall unter einem Winkel $\alpha \neq 0^\circ$, das Bündel wird gebrochen und verläßt

das Dosimeterglas wieder parallel zum einfallenden Bündel. (Bündel 2 in Abb. 5.8)

Die Brechung an den Grenzflächen Luft-Glas wird beschrieben durch das Snellius' sche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.16)$$

Dabei sind α' und β' die Winkel des Strahles zum Lot in Luft beziehungsweise im Glas, n_1 und n_2 die optischen Brechungsindizes in Luft und Glas. Für $\alpha' = \pi/2$ tritt Totalreflektion des Lichtstrahles in das Glas auf. Mit $n_1 = 1$, $n_{21} = 1,53$ bei der Wellenlänge von 365 nm des UV-Anregungslichtes und $n_{22} = 1.51$ bei 600 nm innerhalb des Wellenlängenbereichs des RPL-Lichtes, erhält man für die Grenzwinkel der Totalreflektion <33>:

$$\alpha'_{1TR} = 40,81^\circ \quad \text{bei } \lambda = 365\text{nm}$$

$$\alpha'_{2TR} = 41,47^\circ \quad \text{bei } \lambda = 600\text{nm}$$

Überschreitet beim Abtasten des Dosimeterglases der Einfallswinkel α' ein bestimmtes Maß, so trifft das gebrochene UV-Lichtbündel im Glasinnern eine Seitenfläche und wird total reflektiert, falls der Winkel $90^\circ - \alpha'$ größer als der Grenzwinkel der Totalreflektion ist (Bündel 3). An der Austrittsfläche wird dieses Bündel erneut gebrochen und verläßt das Glas wieder unter dem Winkel α' , spiegelbildlich zum einfallenden Bündel.

Der schräge Einfall des anregenden UV-Lichtbündels führt dazu, daß sich sowohl die Breite der angeregten Glaszone als auch das angeregte Glasvolumen ändern.

5.2.1 ÄNDERUNG DER ABTASTBREITE

Bei senkrechtem Einfall in Glasmitte nimmt das angeregte Glasvolumen eine Breite von

$$d_1 = 0,2 \text{ mm}$$

ein.

Bei schrägem Einfall überstreicht das UV-Lichtbündel eine Glaszone der Breite d_2 oder d_3 , die Qualität der Abtastung wird schlechter. (Abb. 5.7)

Im folgenden Abschnitt soll dieser Effekt untersucht werden.

Aus Abb. 5.8, Bündel 2, sind folgende Beziehungen abzuleiten:

$$\alpha'_2 = \arctan\left(\frac{v_2}{L}\right) \quad (5.17)$$

$$\beta'_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha'_2}{n_2}\right) \quad (5.18)$$

$$\beta'_{TR} = \arcsin\left(\frac{1}{1,53}\right) \quad (5.19)$$

$$W_2 = v_2 + A \cdot \tan \beta'_2 \quad (5.20)$$

Für $v = 4 \text{ mm}$, am Glasrand, fällt das UV-Lichtbündel unter

$$\alpha'_{\max} = 0,92^\circ$$

ein, wird gebrochen und schließt im Glas einen Winkel von

$$\beta'_{\max} = 0,63^\circ$$

mit dem Lot ein. Für $w_2 > 4$ mm trifft das Bündel im Glasinnern auf eine Seitenfläche (Abb. 5.8). Es wird dort total reflektiert, da es flacher als der Grenzwinkel β'_{1TR} auftrifft. Ohne Totalreflektion verläßt das Bündel 2 das Glas unter dem Winkel α'_2 . Es hat insgesamt eine Breite von

$$d = d_1 + A \cdot \tan \beta'_2 \quad (5.21)$$

erfaßt.

Erfolgt Totalreflektion (Bündel 3), so bildet das austretende Bündel den Winkel $-\alpha'_3$ mit dem Lot; es überdeckt eine Breite von

$$d = |A/2 - U_3| \quad (5.22)$$

wobei u_3 gleich der kleineren der beiden Längen v_3 und w_3 ist.

In Abb. 5.9 ist die effektive Abtastbreite d des UV-Lichtbündels innerhalb des Glasvolumens als Funktion des Eintrittsortes aufgetragen.

Die wirksame Breite des UV-Lichtbündels liegt also, ohne Berücksichtigung des Intensitätsverlaufs im Querschnitt des Bündels (Kap. 5.2.3), zwischen 0,2 mm in Glasmitte und 0,28 mm am Rand, im Mittel etwa bei 0,24 mm.

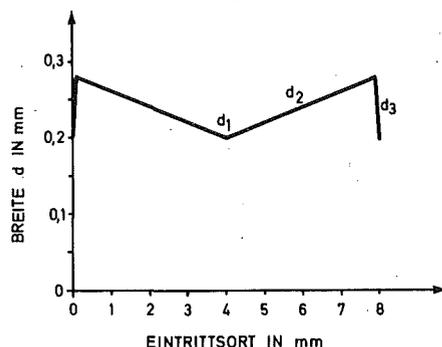


Abb. 5.9 EFFEKTIVE ABTASTBREITE DES UV-LICHTBÜNDELS

Für die Schrittweite beim Abtasten der RPL-Intensitätsprofile in x-, y- und z-Richtung wurde

$$s = 0,2 \text{ mm}$$

festgelegt, was bei einer Glasbreite von 8 mm genau 40 Abtastpunkte ergibt. Damit werden in Glasmitte beim Abtasten alle Glasbereiche lückenlos erfaßt, gegen den Rand hin überdecken sich die Volumina in verschiedenen Glastiefen bis zu $\pm 0,08 \text{ mm}$.

5.2.2 ÄNDERUNG DES ANGEREGTEN GLASVOLUMENS

Bei senkrechtem Einfall entsprechend Bündel 1 in Abb. 5.10 und bei idealer Intensitätsverteilung im UV-Lichtbündel besteht das angeregte Volumen V_1 aus einem Quader mit der Grundfläche

$$F_K = 0,2 \cdot 6 \text{ mm}^2 \quad (5.23)$$

und einer Höhe h gleich der Kantenlänge des Glaswürfels.

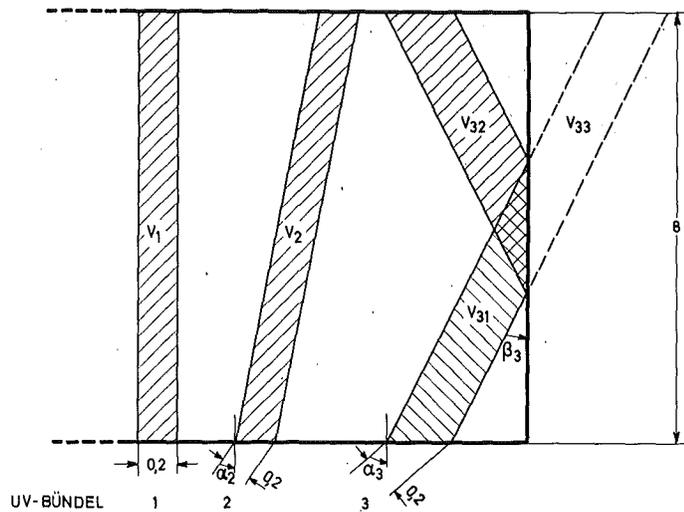


Abb. 5.10 ANGEREGTES GLASVOLUMEN

Das Volumen errechnet sich zu

$$V_1 = F_K \cdot h = 0,2 \cdot 6 \cdot 8 \text{ mm}^3 \quad (5.24)$$

Bei schrägem Einfall ohne Totalreflektion entsprechend Bündel 2 in Abb. 5.7 hat das angeregte Volumen die Form eines Prismas mit der Grundfläche

$$F = 6 / \cos \alpha' \text{ mm}^2 \quad (5.25)$$

und der Höhe h . Das angeregte Volumen beträgt somit

$$V_2 = \frac{0,2}{\cos \alpha'} \cdot 6 \cdot 8 \text{ mm}^3 \quad (5.26)$$

Bei schrägem Einfall mit Totalreflektion entsprechend Bündel 3 in Abb. 5.7 wird das UV-Lichtbündel innen an der Seitenfläche total reflektiert. Damit besteht das angeregte Volumen aus zwei Teilprismen V_{31} und V_{32} , de-

ren Deckflächen senkrecht auf ihren Grundflächen stehen. Sie überdecken sich in einem Teilbereich, in dem das UV-Licht und damit die RPL die doppelte Intensität der anderen Bereiche haben. Das Teilvolumen V_{32} ist aber genauso groß wie V_{33} , das heißt, das gesamte angeregte Volumen ist

$$V_3 = V_2 = \frac{0,2}{\cos \alpha'} \cdot 6 \cdot 8 \text{ mm}^3 \quad (5.27)$$

Da der maximale Winkel β'_3 im Glas nur $0,63^\circ$ beträgt, weicht das angeregte Volumen im ungünstigsten Fall um $0,006045 \%$ vom Volumen bei senkrechtem Einfall ab. Deshalb kann der Einfluß der Änderung des angeregten Glasvolumens bei schrägem Einfall des UV-Lichtbündels auf die Form des RPL-Intensitätsprofils vernachlässigt werden.

6. BAUSTEINE IM ANREGUNGSTEIL DES AUSWERTEGERÄTS

In dem folgenden Abschnitt sollen die einzelnen Bausteine beschrieben werden, die dazu dienen, das Dosimeterglas im Auswertegerät in einer definierten Lage zu halten und das anregende UV-Licht während des Ab tastens in die gewünschte Zone des Glases zu bringen (Abb. 6.1).

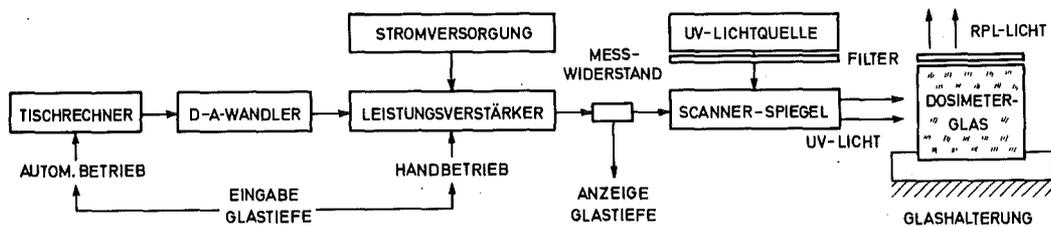


Abb. 6.1 BAUSTEINE IM ANREGUNGSZWEIG

6.1 GLASHALTERUNG

Das RPL-Dosimeterglas ist empfindlich gegen mechanische Einwirkungen, Verunreinigungen der Glasoberfläche zeigen oft Eigenfluoreszenz oder absorbieren Anregungs- und RPL-Licht, langandauernde Einwirkung von UV-Licht verringert den Meßwert. Deshalb muß der Glaskörper gegen diese Einflüsse durch eine Glashalterung mit Kapselung geschützt werden.

Um eine eindeutige Zuordnung zwischen Dosimeterbenutzer und Dosimeter sicherzustellen, muß entweder der Glaskörper selbst gekennzeichnet sein, oder der Glashalter trägt eine Kennzeichnung und ist fest mit dem Glaskörper verbunden.

Für eine vollautomatische Auswertung einer grösseren Zahl von Dosimetern ist es günstig, diese in einem Maga-

zin gemeinsam in das Auswertegerät einzusetzen und sie dann einzeln in die Meßposition zu fahren. Einrichtungen zum Transportieren der Dosimeter im Auswertegerät sollten aus den oben genannten Gründen nicht am Glas selbst angreifen, sondern an einem Glashalter.

Um eine Absorption der zu messenden ionisierenden Strahlung in der Kapselung zu vermeiden, soll die Kapselung nur ein geringes Flächengewicht aufweisen.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich folgende Anforderungen an das System Glashalter-Kapselung:

- dichte Kapselung zum Schutz gegen Schmutz, Licht und Feuchtigkeit,
- geringes Flächengewicht der Kapselung,
- Platz für Kennzeichnung zur Identifizierung,
- das Glas soll zur Abtastung weitgehend frei stehen,
- die Glashalterung muß beständig sein gegenüber Lösungsmitteln beim Reinigen des Glases,
- die Halterung muß beständig sein gegen die hohe Temperatur von 400° C beim Löschen des Meßwerts.

Um diesen Forderungen zu entsprechen, wurde eine Glashalterung nach Abb. 6.2, 6.3 entwickelt. Bei beiden konstruktiven Ausführungen wird das Dosimeterglas durch ein federndes Element (Zunge in Abb. 6.2, Edelstahldraht-Bügel in Abb. 6.3) gegen eine Fläche gedrückt und so durch Kraftschluß gehalten. Durch das Anpressen wird die Lage des Glaskörpers relativ zu zwei Außenkanten des Trägers genau definiert. Alle Kanten des Glaswürfels werden nicht belastet, um ein Splittern des Glases zu vermeiden.

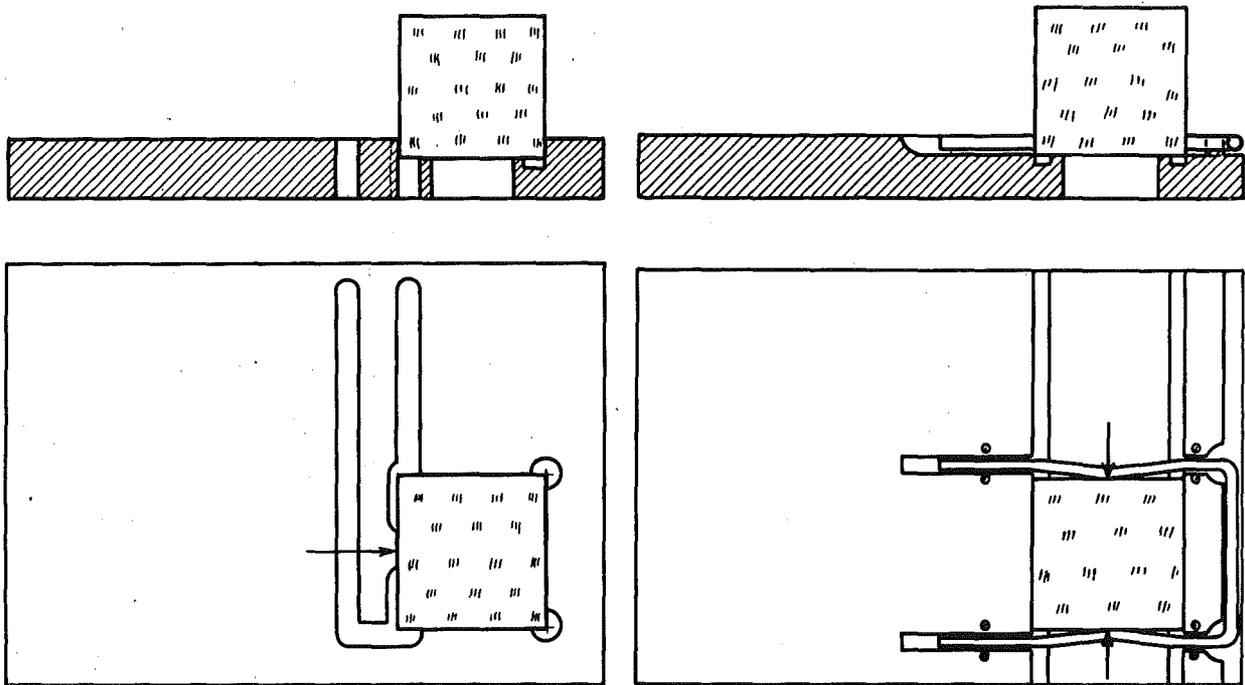


Abb. 6.2, 6.3 KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNGEN DER GLASHALTERUNG

Die Klemmverbindung zwischen Glas und Glashalter ist einfach lösbar, so daß defekte Gläser ausgetauscht werden können und sie ist temperaturbeständig. Lediglich ein Glasvolumen von $8 \times 8 \times 1 \text{ mm}^3$ ist durch den Glashalter abgedeckt und kann bei der Auswertung nicht ausgenutzt werden, das restliche Volumen von $8 \times 8 \times 7 \text{ mm}^3$ ist für das abtastende UV-Lichtbündel zugänglich.

6.2 UV-LICHTQUELLE

Als Lichtquelle für die RPL-Anregung wurde eine Quecksilberdampf-Höchstdrucklampe der Firma OSRAM, Typ HBO 100 W2 gewählt. Das Spektrum dieser Lampe besteht aus einem Kontinuum zwischen 250 nm und 750 nm, dem die Quecksilberlinien überlagert sind. Aufgrund des hohen Innendrucks von etwa 70 Kp/cm^2 im Betrieb erscheinen die Hg-Linien verbreitert (Abb. 6.4). Vorteilhaft erweist sich, daß die Lampe bei richtiger Gestaltung des Lampengehäuses ausschließlich durch Konvektion gekühlt werden kann, eine zusätzliche Gebläsekühlung ist nicht erforderlich. Die leuchtende Fläche besitzt eine Ausdehnung von nur $0,25 \times 0,25 \text{ mm}^2$, so daß eine scharfe optische Abbildung möglich ist. <34,35>

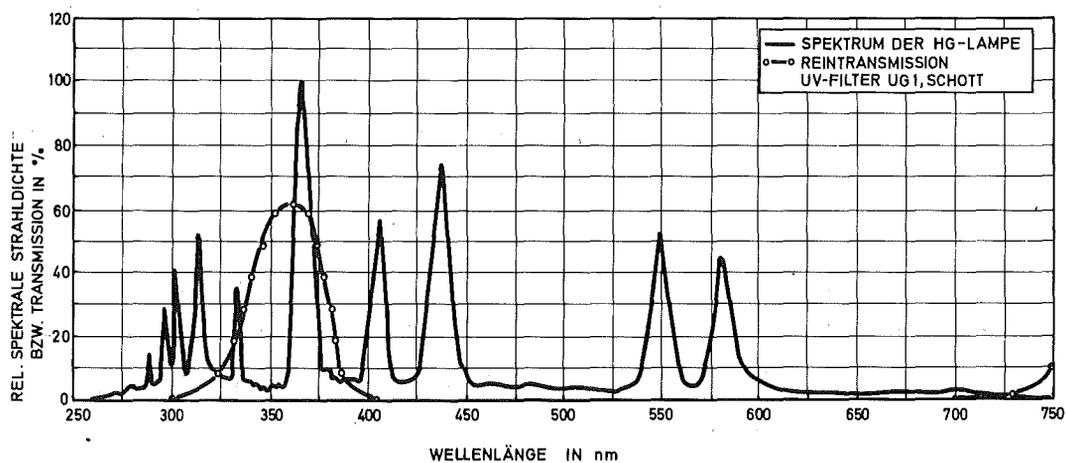


Abb. 6.4 SPEKTRUM DER UV-LICHTQUELLE UND REINTRANSMISSION DES OPTISCHEN FILTERS IM ANREGUNGSZWEIG

Da die durch UV-Anregung erzeugte RPL-Intensität in weiten Grenzen proportional der Intensität des UV-Lichtes ist, muß die Lichtstärke der UV-Lampe auf einen konstan-

ten Wert geregelt werden (Abb. 6.5). Als Meßfühler dient ein CdS-Photowiderstand hinter einem Grauglasfilter, das Stellglied ist der Hauptregler der Stromversorgung der Lampe. Ein mit Thyristoren bestückter Vorregler im Eingangsteil gleicht Netzspannungsschwankungen aus und begrenzt die Verlustleistung des Hauptreglers auf 200 W.

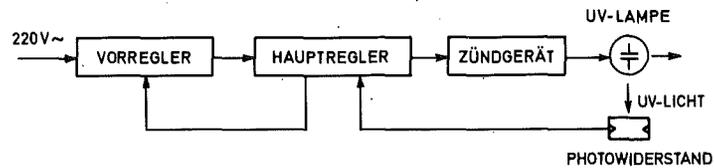


Abb. 6.5 REGELUNG DER LICHTSTÄRKE DER UV-LICHTQUELLE

Während des Zündvorganges wird der Betriebsspannung, je nach Anzahl der Betriebsstunden 10 V bis 40 V, die zur Zündung der Lampe erforderliche Hochspannung im Kilovolt-Bereich überlagert.

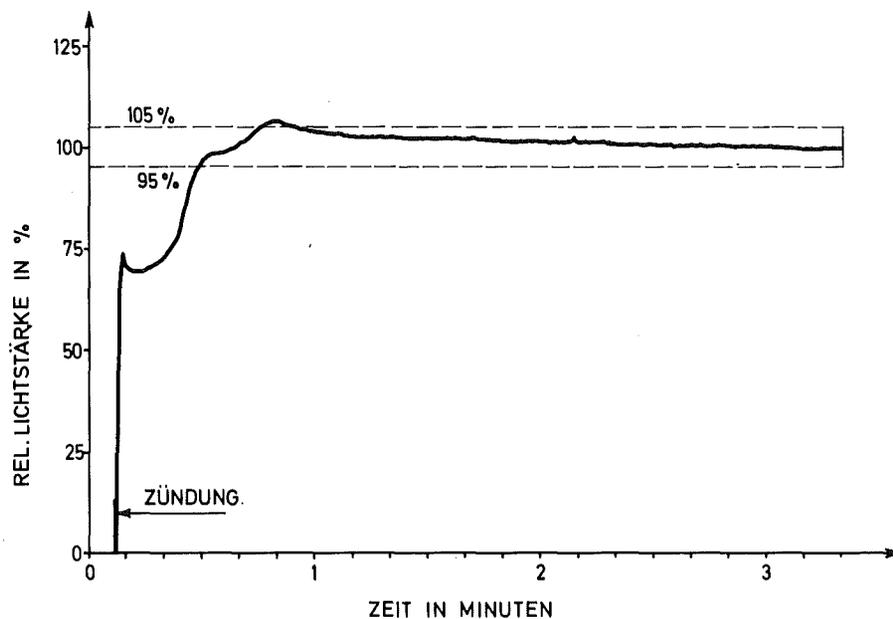


Abb. 6.6 ANLAUFVORGANG DER QUECKSILBERDAMPFLAMPE

Nach Angabe des Herstellers der Stromversorgung bewirken Schwankungen der Netzspannung von $\pm 10\%$ eine Änderung der Ausgangsspannung der Stromversorgung von maximal $\pm 1\%$. Helligkeitsschwankungen, die von der Lampe verursacht werden, werden innerhalb einer Mikrosekunde ausgeglichen. Bei nicht geregelter Stromversorgung dauert der Anlaufvorgang nach dem Zünden etwa 15 Minuten. Durch die Regelung verkürzt sich diese Zeit auf 3 Minuten, danach ändert sich die Lichtstärke um weniger als $\pm 1\%$ (Abb. 6.6). Auch innerhalb eines längeren Zeitraumes (eine Stunde) ist die Änderung der Lichtstärke kleiner als $\pm 1\%$ des Mittelwerts (Abb. 6.7). Mit zunehmendem Alter steigt die Brennspannung einer Quecksilberdampf-Höchstdrucklampe. Durch die Regelung wird der Strom derart nachgeführt, daß die Lichtstärke einen konstanten Wert behält. Überschreitet die zugeführte elektrische Leistung den zulässigen oberen Grenzwert, meldet die Stromversorgung optisch und akustisch "Lebensdauer-Ende" der verwendeten Lampe.

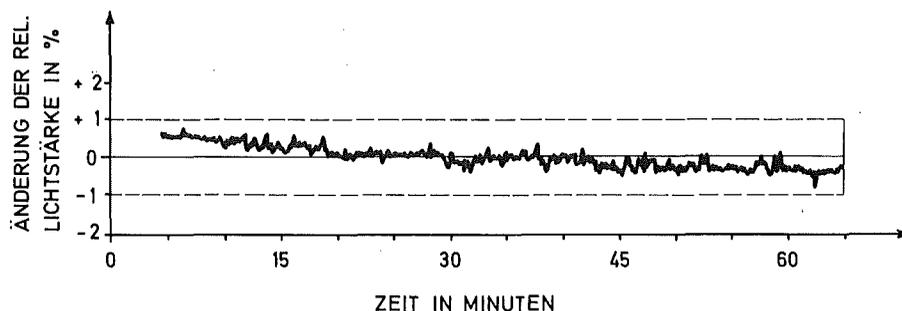


Abb. 6.7 ÄNDERUNG DER LICHTSTÄRKE DER UV-LICHT-QUELLE IM BETRIEBSWARMEN ZUSTAND

6.3 OPTISCHE FILTER IM ANREGUNGSTEIL

Weil das Maximum der strahleninduzierten Absorption des RPL-Glases zwischen 300 nm und 400 nm liegt, wird dieser Anteil aus dem Spektrum der Quecksilberdampf-Lampe ausgefiltert. Dazu dient ein Farbglasfilter der Firma SCHOTT & GEN. vom Typ UG1. Abb. 6.4 zeigt den Reintransmissionsgrad dieses Filters, das heißt das Verhältnis zwischen durchgelassener und absorbiertes Strahlungsintensität, bezogen auf die Transmission einer Luftschicht entsprechender Dicke. Ein weiterer Anteil von 9% geht durch Reflektion an den beiden Grenzflächen Luft-Glas verloren. Störend ist die Transmission dieses Filters von etwa 10% bei 750 nm, da sie in den Bereich des zu messenden RPL-Lichtes fällt.

6.4 DRIFT DER AUSLENKUNG DES UV-LICHTBÜNDELS

Die Meßanordnung nach Abb. 6.8 wurde eingesetzt, um eine eventuelle Abweichung der Position des UV-Lichtbündels von ihrem Sollwert zu messen. Insbesondere Änderungen der Position, bedingt durch Drift der Bausteine, die zur Auslenkung des Lichtbündels dienen (Abb. 6.2), würden sich im praktischen Gebrauch des Auswertegeräts störend auswirken. Im Gegensatz zur Anwendung in Kap. 5.2 werden hier beide Dioden der Differenz-Photodiode BPX 48 in einer Brückenschaltung benützt. Anstelle eines Dosimeterwürfels wird ein Träger mit der Differenz-Photodiode

in die Meßposition im Auswertegerät gebracht, so daß der Steg zwischen den beiden Dioden sich in einer Lage entsprechend einer Glastiefe von 4 mm der x-Achse befindet. Der Scannerspiegel zur horizontalen Ablenkung des UV-Lichtbündels wird über Tischrechner, A-D-Wandler, Leistungsverstärker und Meßwiderstand ausgelenkt, bis das UV-Lichtbündel beide Photodioden mit gleicher Intensität beleuchtet. Damit wird die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers $U_a = 0$.

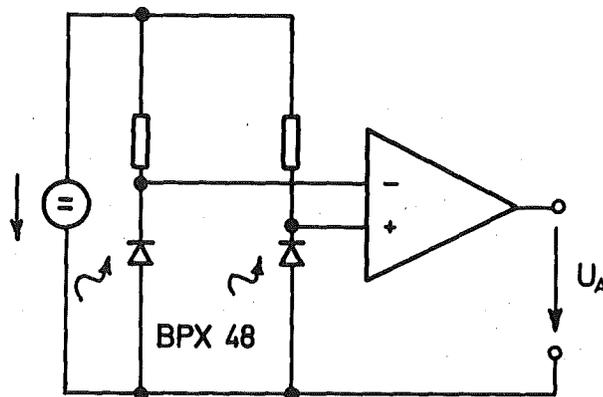


Abb. 6.8 MESSUNG DER KONSTANZ DER AUSLENKUNG DES UV-LICHTBÜNDELS

Die Änderung der Spannung U_a in dieser Meßanordnung betrug während eines Zeitraumes von einer Stunde nach der Inbetriebnahme der Bausteine weniger als 10 Mikrovolt, entsprechend einer Änderung der Position des UV-Lichtbündels in der Ebene des Dosimeterglases von weniger als 3/100 mm. Dies entspricht einem Drehwinkel des Scannerspiegels von $0,000\ 002^\circ$ oder 0,375% der Kantenlänge des Dosimeterwürfels. Auch bei Vorgabe der Solltiefe über das Präzisionspotentiometer in der Betriebsart "Handbetrieb" wurde keine größere Abweichung gemessen. Im betriebswarmen Zustand nach 20 Minuten waren mit der

beschriebenen Meßanordnung keine Änderungen der Strahlposition mehr meßbar. Sie liegen demnach unter 0,01 mm und sind für den praktischen Gebrauch des Auswertegeräts zu vernachlässigen.

6.5 LINEARITÄT DES ANTRIEBS DER SCANNERSPIEGEL

In der in Kap. 10.3 näher beschriebenen rechnergeführten Abgleichmethode zur Justierung der Position des UV-Lichtbündels wird anstelle eines Dosimeterglases ein sogenannter Justierwürfel in das Auswertegerät eingelegt.

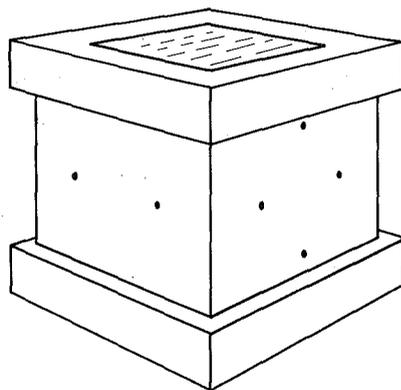


Abb. 6.9 JUSTIERWÜRFEL ZUM ABGLEICH DER POSITION
DES UV-LICHTBÜNDELS

Dieser trägt verschiedene Bohrungen entsprechend einer Glastiefe von 2 mm und 6 mm in den drei Koordinatenachsen. Trifft das UV-Lichtbündel beim Abtasten durch eine der Bohrungen auf das mit hoher Dosis bestrahlte RPL-Glas

im Innern des Justierwürfels, so registriert das Auswertegerät die angeregte RPL und erkennt damit, daß sich das UV-Lichtbündel in der Position "2 mm" oder "6 mm" befindet. Auf diese Weise werden den Positionen "2 mm" und "6 mm" jeder Achse eindeutig die entsprechenden Steuerspannungen und Scannerströme zugeordnet. Um die dazwischenliegenden vier Millimeter zu durchfahren, wird der x-y-Scannerspiegel um insgesamt $0,92^\circ$ ausgelenkt. Der maximale Linearitätsfehler, das heißt die größtmögliche Abweichung der Beziehung zwischen Drehwinkel und Strom durch den Scannerantrieb von dem idealen linearen Verlauf liegt nach Angabe des Herstellers <28> innerhalb von einem Prozent des zulässigen Arbeitsbereiches von 6° . Dies entspricht einer größtmöglichen Abweichung der Position des UV-Lichtbündels von $\pm 0,13$ mm. Über die Verteilung des Linearitätsfehlers über den Drehwinkel macht der Hersteller keine Angaben und eine Messung dieser Verteilung war mir aufgrund des erforderlichen hohen technischen Aufwandes nicht möglich. Es ist aber anzunehmen, daß der Linearitätsfehler innerhalb des genutzten Bereiches von etwa 15% des maximalen Winkels des Scanners nicht die ganze Fehlerbreite überstreicht, so daß der resultierende Fehler der Position des UV-Lichtbündels bedingt durch den Linearitätsfehler des Scanners bei etwa $\pm 0,02$ mm liegen dürfte.

6.6 WIEDEREINTELLGENAUIGKEIT DER SCANNER

Die Wiedereinstellgenauigkeit der verwendeten Scanner beträgt nach <28> 0,05%. Das bedeutet, daß eine Position des UV-Lichtbündels im Dosimeterglas, welche eine

größtmögliche Auslenkung der Scanner von 6° erfordert, bei wiederholtem Ansteuern mit einer Abweichung von höchstens $\pm 0,007$ mm erreicht würde.

Demnach sind Fehler bei der Positionierung des UV-Lichtbündels durch mangelnde Linearität und Wiedereinstellgenauigkeit mit jeweils $\pm 0,02$ mm kleiner als die effektive Breite $d = 0,22$ mm des Bündels, so daß sie im praktischen Gebrauch des Auswertegeräts nicht von Bedeutung sind.

7. DER RPL-LICHTWEG ZUM DETEKTOR

Bei Anregung eines RPL-Zentrums im Dosimeterglas wird das Fluoreszenzlicht in alle Richtungen des Raumes mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausgestrahlt. Das RPL-Zentrum entspricht deshalb einer Punktquelle mit konstantem Strahlungsfluß in alle Raumwinkelemente $d\Omega$. Betrachtet man ein RPL-Zentrum am Ort $P(x,y,z)$ im Dosimeterglas, so wird nur ein Bruchteil des RPL-Lichtes durch die obere Glasfläche austreten und auf den Detektor auftreffen. Zur Messung einer RPL-Verteilung im Dosimeterglas ist es erforderlich, daß der vom Detektor erfaßte Anteil der Lichtquanten aus dem Raumwinkel $\Omega(x,y,z)$ weitgehend unabhängig vom Ort $P(x,y,z)$ des RPL-Zentrums ist. Andernfalls muß bei bekannter Verteilung der Trefferwahrscheinlichkeit die gemessene RPL-Verteilung korrigiert werden.

7.1 AUSTRITT DES RPL-LICHTES AUS DEM DOSIMETERGLAS

Wie hängt nun der vom Detektor erfaßte Raumwinkel $\Omega(x,y,z)$ vom Ort $P(x,y,z)$ des RPL-Zentrums im Dosimeterglas ab?

Eine ähnliche Aufgabe ergibt sich beim Berechnen der Sammelgeometrie eines Szintillationszählers. Dort bewirkt eine Abhängigkeit des genutzten Raumwinkels vom Ort im Szintillator eine unerwünschte Änderung des Amplitudenspektrums.

Für eine erste Abschätzung der Verhältnisse werden folgende Vereinfachungen gemacht:

- Die Absorption des Fluoreszenzlichtes im Glas wird

vernachlässigt.

- Das Glas ist homogen.
- Die Lichtquelle am Ort $P(x,y,z)$ ist isotrop.
- Alle sechs Oberflächen des Dosimeterglases sind rechtwinklig zueinander und ideal glatt poliert.

Abb. 7.1 zeigt einen Schnitt durch das Dosimeterglas parallel zur x-y-Ebene. Der Grenzwinkel der Totalreflektion für das RPL-Licht wurde berechnet zu $\alpha'_{2TR} = 41,47^\circ$. Trifft ein Lichtstrahl vom Punkt $P(x,y,z)$ wie Strahl 1 eine Seitenfläche unter einem Winkel α' , wobei α' kleiner als der Grenzwinkel der Totalreflektion ist, so wird er gebrochen und verläßt das Glas. Ist der Winkel zwischen dem Strahl und der Normalen der Seitenfläche größer als der Grenzwinkel, so wird der Strahl total reflektiert. Er trifft wie Strahl 2 auf eine angrenzende Seitenfläche unter einem Winkel, der ebenfalls größer als der Grenzwinkel ist (Abb. 7.1).

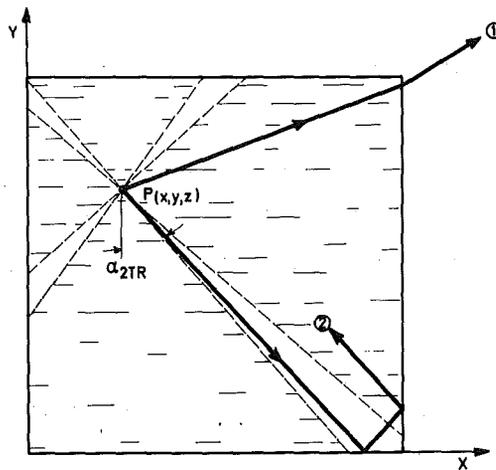


Abb. 7.1 AUSTRETENDER UND TOTAL REFLEKTIERTER STRAHL

Es läßt sich zeigen, daß ein Strahl, der einmal total reflektiert wurde, das Glas nicht mehr verlassen kann. Von jedem Punkt P im Glas lassen sich sechs Kegel bestimmen, deren Grundflächen auf den sechs Begrenzungsflächen des Würfels liegen. Ihr Öffnungswinkel ist gleich dem doppelten Grenzwinkel der Totalreflektion. <36-39>

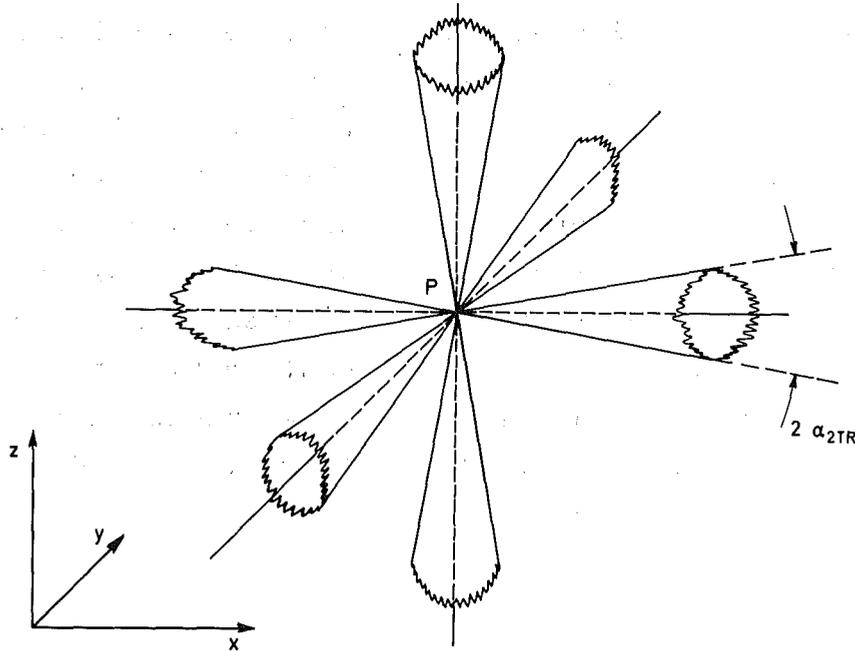


Abb. 7.2 LICHTAUSSTRITTSKEGEL IM DOSIMETERGLAS

Alles Licht innerhalb der Kegel kann den Würfel verlassen, alles Licht außerhalb der Kegel bleibt im Dosimeterglas gefangen. Der Anteil des gefangenen Lichtes F_T ist nach <36>

$$F_T = 3 \cdot \frac{\sqrt{n^2 - 1}}{n} - 2 \approx 25,95 \% \quad (7.1)$$

Dabei ist n der optische Brechungsindex des Dosimeterglases im Bereich der Wellenlänge der RPL. Aus jeder der sechs Begrenzungsflächen des Dosimeterglases tritt der gleiche Anteil an Licht aus, nämlich der Anteil in-

nerhalb eines Kegels,

$$\frac{1}{6} F_E = \frac{1}{6} [1 - F_T] \quad (7.2)$$

Wie Abb. 7.3 zeigt, kann keine Deckfläche mehr Licht abgeben auf Kosten einer anderen, da ein Lichtstrahl innerhalb eines Kegels eine benachbarte Deckfläche stets unter einem zu flachen Winkel trifft. Er wird dort total reflektiert und tritt endgültig durch "seine" Fläche aus.

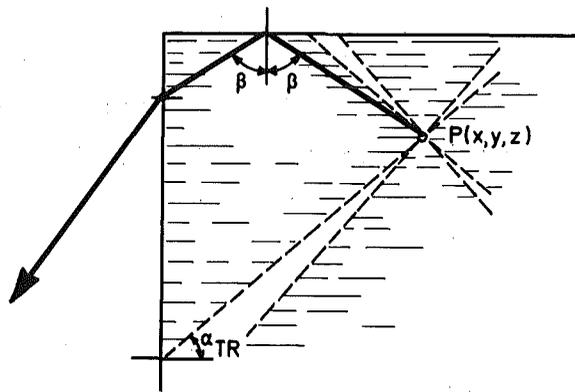


Abb. 7.3 AUSTRITTSKEGEL SCHNEIDET NACHBARFLÄCHE

Der Anteil $\frac{1}{6} \cdot F_E$ des Lichtes einer Punktquelle am Ort $P(x,y,z)$, welcher das Glas durch die obere Deckfläche verläßt, ist also bei den anfangs gemachten Vereinfachungen unabhängig von den Koordinaten des Punktes und beträgt etwa 12,34% des gesamten ausgesandten Lichtes. Der Anteil bleibt der gleiche für alle quaderförmigen Dosimetergläser, gleichgültig, ob es sich um einen Würfel oder eine flache Platte handelt. Dieser Effekt wird gerne benützt, um kleine Detektoren an die Schmalseiten großer Szintillatorvolumina anzukoppeln.

7.2 EINFLUSS DER RAUHEN BODENFLÄCHE

Fünf der sechs Oberflächen des Dosimeterwürfels sind poliert, die Bodenfläche ist aufgeraut. Diese Fläche reflektiert einfallendes Licht diffus, die Verhältnisse lassen sich in Näherung durch das Gesetz von Lambert beschreiben:

$$dI_{\epsilon} = dI_0 \cdot \cos \epsilon \quad (7.3)$$

Dabei ist I_{ϵ} die Strahldichte auf der Meßfläche, I_0 die maximale Strahldichte und ϵ der Winkel zwischen der Normalen der Meßfläche und der Richtung des einfallenden Strahles. Dieses Gesetz macht keine Aussage über den Verlauf eines bestimmten Strahles, der auf die diffus reflektierende Fläche trifft.

Folgende Möglichkeiten sind für jeden Strahl gegeben:

- Reflexion und Austritt durch eine Seitenfläche;
- Reflexion, dann Totalreflexion an einer Seitenfläche, Brechung an der Deckfläche, Austritt;
- Reflexion, dann Reflexion an allen folgenden Flächen und der Strahl bleibt im Glas.

Der Anteil des Lichtes, der von einem beliebigen Punkt P die Bodenfläche trifft, ist nach Gl. 7.3 unabhängig vom Ort des Punktes. Der Anteil, der anschließend so vom Boden zurückgestreut wird, daß er an der Deckfläche austritt, ist ebenso unabhängig vom Ort des Punktes P. Damit tritt auch bei Berücksichtigung einer diffus reflektierenden Bodenfläche von jedem Punkt des Körpers der gleiche Anteil an Licht durch die dem Detektor zugewandte Deckfläche.

7.3 DER WEG DES RPL-LICHTES VON DER AUSTRITTSFLÄCHE DES DOSIMETERGLASES ZUM DETEKTOR

Wie im vorigen Kapitel festgestellt wurde, ist der Anteil des Lichtes einer punktförmigen Quelle im Glas, der an einer Deckfläche austritt, unabhängig vom Ort des Punktes im Glas. Trotzdem kann der Anteil des Lichtes, der den Detektor, das heißt die Kathode des Photomultipliers erreicht, ortsabhängig sein. In Abb. 7.4 sind verschiedene Wege gezeichnet, auf denen das Licht, ausgehend von einem Punkt $P(x,y,z)$, das Glas durch die Deckfläche verlassen kann.

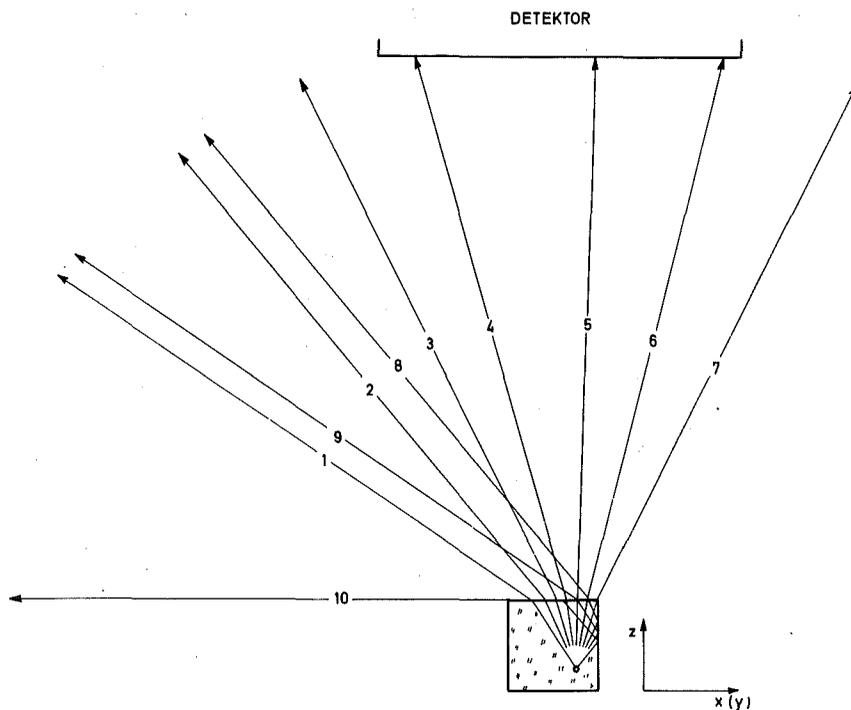


Abb. 7.4 WEGE DES RPL-LICHTES VON DER AUSTRITTSFLÄCHE
DES DOSIMETERGLASES ZUM DETEKTOR

Sie liegen alle innerhalb des Austrittskegels mit $\pm 41^\circ$ Öffnungswinkel. Zur Vereinfachung soll hier nur der ein-dimensionale Fall betrachtet werden, das heißt, alle Strahlen liegen in einer Ebene parallel zur x-z-Ebene.

Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

- Der Strahl trifft die Austrittsfläche und wird gebrochen.
- Der Strahl trifft eine Seitenfläche, wird total reflektiert, trifft die Austrittsfläche, wird gebrochen.

Mit Hilfe eines Rechenprogramms wurde nun im zweidimensionalen Fall für eine Matrix von 15 x 8 Punkten untersucht, welcher Anteil der von P ausgehenden Strahlen den Detektor trifft.

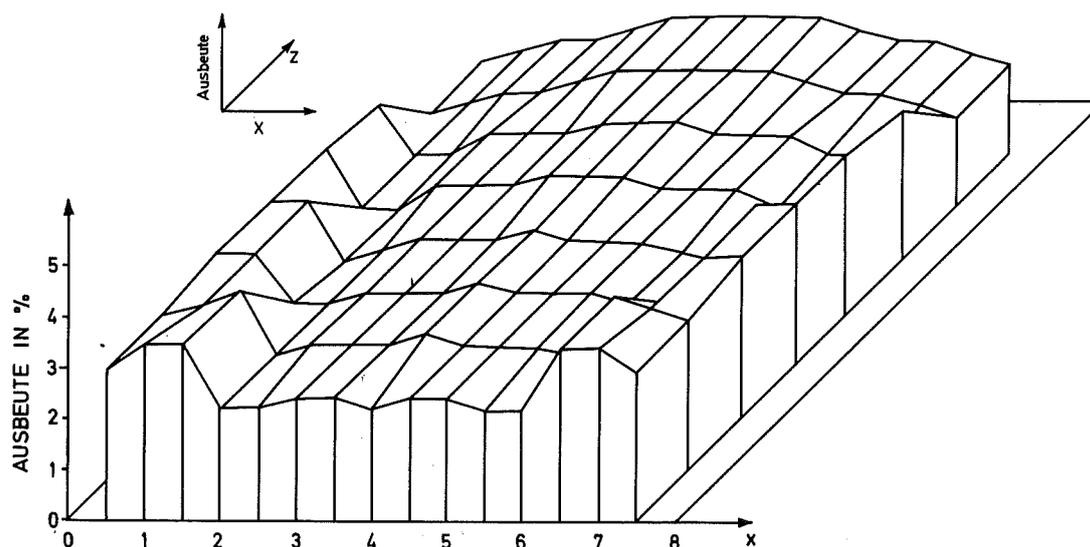


Abb. 7.5 RELATIVE AUSTRITTSWAHRSCHEINLICHKEIT FÜR DAS RPL-LICHT AUS DEM DOSIMETERGLAS

Als Schrittweite zwischen den Punkten in x-Richtung sowie als Mindestabstand von den Seitenflächen wurde 0,5 mm gewählt, als Schrittweite in z-Richtung ein Millimeter. Dabei wurde für jeden Punkt $P(x,z)$ der Winkel des Strahls zur z-Achse innerhalb des durch die Totalreflektion festgelegten Austrittskegels variiert und der Weg für jeden Strahl ermittelt. Schneidet sein Weg die Kathodenfläche, so wird dies als "Treffer" registriert.

Aus der relativen Trefferanzahl erhält man den Anteil des Lichtes, das von P ausgeht und den Detektor erreicht. In Abb. 7.5 ist diese Lichtausbeute, bezogen auf das gesamte von P ausgehende Licht, wiedergegeben. Der Ort des betrachteten Punktes durchläuft dabei die zuvor erwähnten 15 x 8 Positionen in einem Schnitt durch das Glas parallel zur x-z-Ebene. Die Ergebnisse gelten ebenso für einen Schnitt parallel zur y-z-Ebene.

Addiert man die Trefferquote für jede Spalte (Abb. 7.6), so erhält man die relative Lichtintensität in Abhängigkeit von der Glastiefe, wie sie beim Abtasten in x- oder y-Richtung eines homogen bestrahlten Dosimeterglases zu erwarten ist. Die Mittel der Summen der Zeilen entsprechen einem Abtasten in z-Richtung.

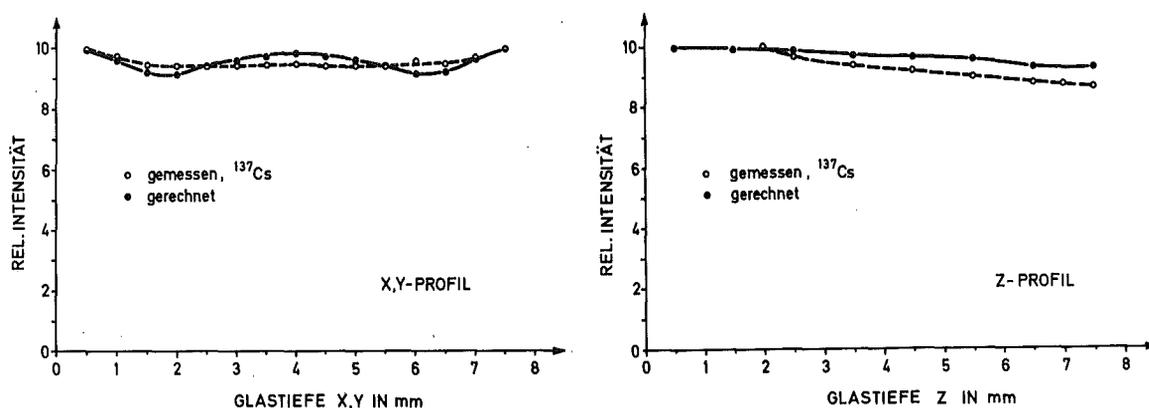


Abb. 7.6 PROFIL DER AUSTRITTSWAHRSCHEINLICHKEIT FÜR DAS RPL-LICHT AUS DEM DOSIMETERGLAS UND GEMESSENE RPL-INTENSITÄTSPROFILE

Ein Vergleich mit den gemessenen RPL-Intensitätsprofilen eines Dosimeterglases, das mit ^{137}Cs rotierend bestrahlt worden war (Abb. 7.6), zeigt folgende Übereinstimmungen:

- Die gemessene Intensität nimmt zum Rand hin zu beim Abtasten in x- oder y-Richtung.
- Beim Abtasten in z-Richtung nimmt die gemessene Intensität mit zunehmendem z ab.

Effekte in den Randzonen des Glases (bis 0,5 mm unter den Oberflächen) bleiben dabei unberücksichtigt. Diese qualitative Übereinstimmungen legen den Schluß nahe, daß die unterschiedliche Trefferwahrscheinlichkeit auf den Detektor für verschiedene Positionen des angeregten RPL-Zentrums im Dosimeterglas die hauptsächliche Ursache ist für den nicht idealen Verlauf der RPL-Intensitätsprofile homogen bestrahlter Dosimetergläser. Da es sich dabei aber um einen optischen Effekt handelt, der unabhängig von den RPL-Intensitätsprofilen des auszumessenden Dosimeterglases ist, können seine Auswirkungen mit Hilfe eines Rechenprogrammes durch Vergleich mit einem "Referenzprofil" verringert werden. (Siehe Kap. 10.5).

8. BAUSTEINE IM RPL-LICHTMESSZWEIG

Der RPL-Lichtmeßzweig hat die Aufgabe, die Intensität des von der angeregten Glaszone ausgesandten RPL-Lichtes relativ zu einem Vergleichsstandard zu bestimmen. Im folgenden Abschnitt werden die Eigenschaften der in diesem Meßzweig verwendeten Bausteine besprochen, sofern diese einen Einfluß auf die Qualität der Messung haben können.

8.1 AUFGABEN DER EINZELNEN BAUSTEINE

Das RPL-Licht, welches das Dosimeterglas verläßt, wird durch ein optisches Filter von der Primärfluoreszenz und von gestreuten Anteilen des Anregungslichtes getrennt. Es löst aus der Kathode des Photomultipliers eine der Anzahl der Lichtquanten proportionale Zahl von Elektronen. Der Strom dieser Elektronen erzeugt im Strom-Spannungswandler eine proportionale Spannung, höherfrequente Anteile der überlagerten Rauschspannung werden in einem Tiefpaß geschwächt. Ein regelbarer Verstärker paßt die Signalspannung dem Arbeitsbereich des folgenden A-D-Wandlers an (Abb. 8.1).

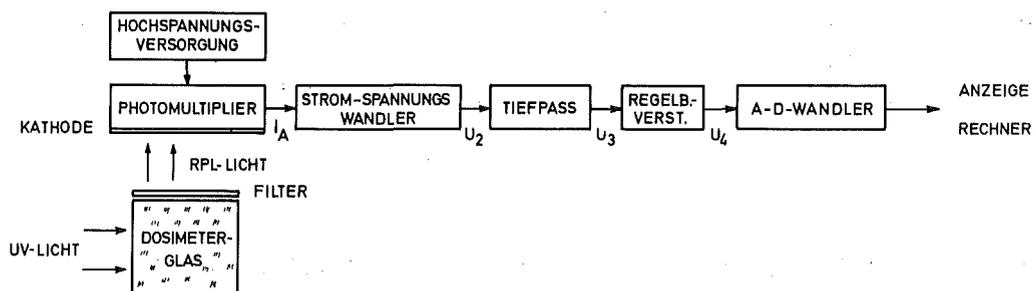


Abb. 8.1 BAUSTEINE IM RPL-LICHTMESSZWEIG

8.2 OPTISCHE FILTER IM RPL-LICHTMESSZWEIG

Aus Abb. 8.2 ist zu erkennen, daß die Wellenlänge des RPL-Lichtes zwischen 515 nm und 750 nm liegt mit einem Maximum bei 625 nm. Ein optisches Filter im Meßzweig soll dieses RPL-Licht auf seinem Weg möglichst wenig schwächen. UV-Licht, das an Unreinheiten an der Oberfläche des Dosimeterglases oder im Glas selbst gestreut wird oder Primärfluoreszenzlicht, das nicht der Dosis proportional ist, soll nicht durchgelassen werden. Dieses Störlicht, das auch bei unbestrahlten Dosimetergläsern auftritt, bezeichnet man als "Vordosis". Zum Diskriminieren des RPL-Lichtes vom Störlicht erwies sich ein Orange-Glasfilter geeignet mit einer Kante bei 530 nm in seiner Transmissionskurve von der Firma SCHOTT & GEN. Seine normierte Reintransmissionskurve ist in Abb. 8.2 dargestellt. Die zusätzlichen Verluste an den Grenzflächen betragen etwa 8,5 %.

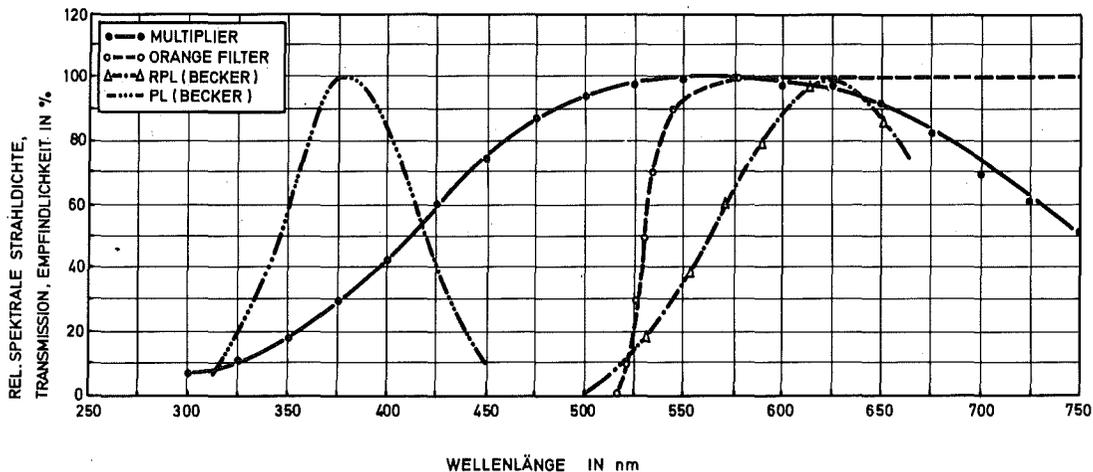


Abb. 8.2 SPEKTREN UND TRANSMISSIONSKURVEN IM RPL-LICHTMESSZWEIG

8.3 PHOTOMULTIPLIER ALS DETEKTOR FÜR DAS RPL-LICHT

In Kap. 7 wurde untersucht, welcher Anteil des Lichtes, das von einem Punkt im Dosimeterglas ausgeht, die Detektorfläche erreicht. Im folgenden Kapitel sollen einige Einflüsse betrachtet werden, die die Umwandlung der Lichtquanten vor dem Detektor in ein elektrisches Signal hinter dem Detektor betreffen.

Als Detektor für das RPL-Licht wird ein Photomultiplier vom Typ XP 1017 der Firma VALVO verwendet. Ein Photomultiplier, PM abgekürzt, ist eine Elektronenröhre mit einer Photokathode, einem elektronenoptischen Eingangssystem, einem Vervielfachersystem und einer Anode. Die Lichtquanten treten durch ein optisches Fenster in die Röhre ein und lösen aus der Photokathode, welche auf die Innenseite des Fensters aufgedampft ist, primäre Elektronen aus. In den folgenden Vervielfacherstufen werden durch jedes auftreffende Elektron der vorhergehenden Stufe mehrere Sekundärelektronen herausgelöst und durch eine Potentialdifferenz in Richtung auf die nächste Stufe abgesaugt. Von der letzten Stufe, der Anode, wird das Ausgangssignal abgenommen. Der verwendete Photovervielfacher hat zehn Stufen mit einer maximalen Stromverstärkung von 3 000 000, seine Kathode ist in ihrer spektralen Empfindlichkeit auf das Spektrum der RPL abgestimmt. (Abb. 8.2). Seine Empfindlichkeit hat ein Maximum bei 550 nm, sie hat dort etwa den dreifachen Wert der Empfindlichkeit bei 380 nm, bei der die unerwünschte Primärfluoreszenz ihre größte spektrale Dichte hat.

8.3.1 OPTISCHE ASYMMETRIE DES PHOTOMULTIPLIERS

Tastet man mit einem kleinen Lichtpunkt die Kathode eines Photomultipliers ab, so ändert sich der Ausgangsstrom in Abhängigkeit vom Ort des Lichtpunktes auf der Kathode. Dieser Effekt kann auch bei qualitativ guten Kathoden 25 % und mehr betragen. <41,42>

Mehrere Ursachen sind dafür verantwortlich:

- Die Empfindlichkeit des Kathodenmaterials ist nicht gleichmäßig auf der ganzen Kathodenfläche.
- Blickt man durch die semitransparente Kathode in das Innere des PM, so erkennt man Bereiche hoher und niedriger optischer Reflexion. Dies hat zur Folge, daß Lichtquanten, welche die Kathode ohne Absorption und Elektronenemission durchqueren, mit einer vom Ort und Winkel des Durchtritts abhängigen Wahrscheinlichkeit von den folgenden Dynodenblechen reflektiert werden, um dann aus der Kathode Elektronen herauszulösen.
- Auch die Wahrscheinlichkeit, mit der ein primäres Elektron aus der Kathode auf seinem Weg durch den PM weitere Elektronen herauslöst, ist abhängig vom Austrittspunkt des primären Elektrons aus der Kathode.

Definiert man die Sammelwahrscheinlichkeit für einen zentralen Fleck der Kathode von 16 mm Durchmesser zu 100 %, so wird nach <42> bei einer Beleuchtung der gesamten Kathode nur noch ein Wert von 75 % gemessen.

Da die beschriebenen Effekte ihre Ursache in Konstruktion und Fertigungsqualität des PM haben, können ledig-

lich ihre Auswirkungen durch eine optimale Ausleuchtung der Kathode verringert werden. Dazu gehört im vorliegenden Fall, daß der beleuchtete Bereich der Kathode unabhängig vom Ort des angeregten Teilvolumens im Dosimeterglas ist. Dies ist bei der hier verwendeten optischen Anordnung in guter Näherung erfüllt.

- Auch magnetische Felder haben einen Einfluß auf das Verhalten von Photomultipliern, denn sie beeinflussen den Weg der Elektronen in der Röhre und damit die Verstärkung. Da im Auswertegerät außer mit dem Magnetfeld der Erde mit zusätzlichen Feldern durch die Scannerantriebe und durch verschiedene Zugmagnete zu rechnen ist, wurde eine wirksame magnetische Abschirmung nach <43> eingebaut. Eine Abschätzung des magnetischen Abschirmfaktors H , definiert als das Verhältnis der Feldstärken im PM ohne Abschirmung und mit Abschirmung ergibt für die verwendete Anordnung für ein statisches Magnetfeld quer zur Symmetrieachse des PM einen Wert von $H = 455$ und für ein Feld parallel dazu von $H = 34$. Eine Beeinflussung der Verstärkung im PM durch vorhandene Magnetfelder war danach nicht mehr festzustellen.

8.3.2 ARBEITSPUNKT DES PHOTOMULTIPLIERS

Der Anodenstrom des PM besteht aus dem Signalstrom I_R , welcher der Zahl der auftreffenden Lichtquanten proportional ist und dem unerwünschten Dunkelstrom I_0 , dessen Anteile unterschiedlicher Herkunft sind. Es ist mög-

lich, durch Wahl der Speisespannung U_{PM} des Photomultipliers einen optimalen Arbeitspunkt zu wählen, bei dem der Quotient aus Dunkelstrom und Signalstrom einen minimalen Wert annimmt.

Treffen vom Dosimeterglas ausgehende RPL-Lichtquanten auf die Kathode des PM, so können sie durch den photoelektrischen Effekt nur Elektronen herauslösen, falls ihre Energie die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials übersteigt. Viele Lichtquanten verlieren ihre Energie erst in tieferen Schichten der Kathode und nur etwa 10% der durch das RPL-Licht in der Kathode angeregten Elektronen gelangen zur Oberfläche. Diese Primärelektronen lösen in den folgenden Vervielfacherstufen Sekundärelektronen, welche den Anteil des Signalstroms am Anodenstrom des PM bilden. Manche Elektronen im Kathodenmaterial besitzen genügend thermische Energie, um auch ohne Stimulation durch RPL-Lichtquanten auszutreten. Sie sind die Ursache für den thermischen Anteil des Dunkelstromanteils im Anodenstrom. Wenn ein Elektron die Kathode verlassen hat, ist nicht mehr feststellbar, ob es seine Energie durch thermische- oder Photoanregung erhalten hatte. Das bedeutet, daß sowohl die Elektronen, deren Emission durch RPL-Lichtquanten erfolgte, als auch die unerwünschten thermisch stimulierten Elektronen in gleicher Weise von der Höhe der Speisespannung abhängen. Manche Elektronen, die zum Dunkelstrom beitragen, stammen aus Leckströmen über den Isolationswiderstand der PM-Fassung und der Dynodenstützpunkte. Ihr Anteil liegt zwar in der gleichen Größenordnung wie der thermische Dunkelstrom aus der Kathode, er dominiert aber gegenüber dem thermischen Anteil bei niedrigen Speisespannungen, bei denen die Verstärkung des Kathodenstroms gering ist. Bei hohen Speisespannungen und damit hohen Feldstärken im Innern des PM können Feldemission und Szintillationen

im Glas des PM ebenfalls einen Beitrag zum Dunkelstrom liefern.

Zum Bestimmen des optimalen Arbeitspunktes für den PM XP 1017 wurde der Dunkelstrom I_0 ohne Beleuchtung der Kathode und der Anodenstrom I_R bei konstantem Lichtstrom als Funktion der Speisespannung U_{PM} gemessen und in Abb. 8.3 aufgetragen. Zum Erzeugen eines konstanten Lichtstromes diente eine Referenzlichtquelle, bestehend aus einem ^{14}C -Präparat, das in einen Plastiksintillator eingebettet ist. Ihr Emissionsspektrum liegt nach Angabe des Herstellers <44> zwischen 425 nm und 450 nm und damit außerhalb des Wellenlängenbereiches der RPL. Trotzdem erscheint es gerechtfertigt, bei konstanter Temperatur vom Verlauf des Verstärkungsfaktors als Funktion der Spannung zwischen 425 nm und 450 nm auf den Verlauf im Bereich zwischen 500 nm und 700 nm zu schließen, da die spektrale Empfindlichkeit eines PM nur vom Material und dem Zustand der Kathode abhängt und nicht von der angelegten Speisespannung.

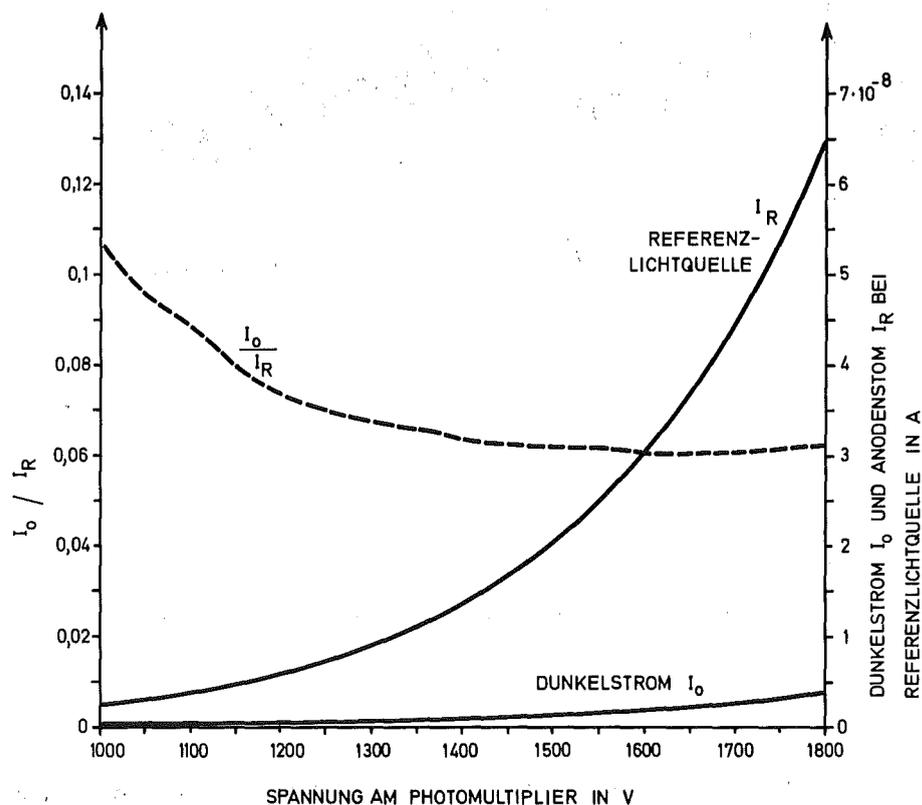


Abb 8.3 BESTIMMUNG DES OPTIMALEN ARBEITSPUNKTES DES PHOTOMULTIPLIERS

Der Quotient aus Dunkelstrom und Signalstrom in Abb. 8.3 fällt mit steigender Speisespannung, da offensichtlich bei kleineren Werten der Spannung der Leckstromanteil des Dunkelstroms überwiegt. Oberhalb von 1400 V fällt der Quotient nur noch wenig, bei 1700 V liegt ein schwach ausgeprägtes Minimum. Der optimale Arbeitspunkt des verwendeten Photomultipliers vom Typ XP 1017 liegt demnach bei 1700 V.

8.3.3 ZEITLICHE ÄNDERUNGEN DES DUNKELSTROMS

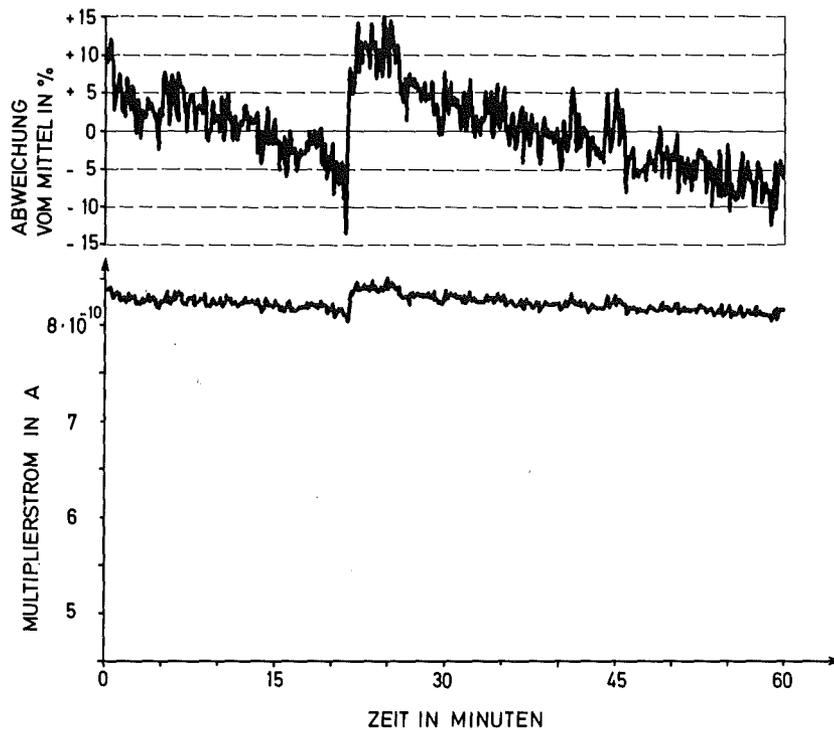


Abb. 8.4 ZEITLICHE ÄNDERUNGEN DES DUNKELSTROMS DES PM

Ein zeitlich konstanter Anteil des Dunkelstromes läßt sich elektrisch kompensieren oder vom Signalstrom subtrahieren. Die zeitlich veränderliche Komponente ist dagegen vom Signalstrom nicht unterscheidbar und verschlechtert das Signal-Störverhältnis.

Bei einer konstanten Temperatur von 25°C wurde der Dunkelstrom über den Zeitraum von einer Stunde gemessen (Abb. 8.4). Höherfrequente Anteile wurden durch den Tiefpaß mit $\tau_t = 0,18\text{ s}$ unterdrückt. Im Mittel wurden $8,4 \cdot 10^{-10}\text{ A}$ gemessen, die Schwankungen waren stets kleiner als $\pm 1,26 \cdot 10^{-10}\text{ A}$ entsprechend $\pm 15\%$ des Mittelwertes. Innerhalb eines Zeitraumes von etwa fünf Minuten, die zur Aufnahme der RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases benötigt werden, ist mit Änderungen des Dunkelstromes von etwa $\pm 5\%$ zu rechnen.

8.3.4 EINFLUSS VON TEMPERATUR- UND ANODENSTROMÄNDERUNGEN AUF DEN VERSTÄRKUNGSFAKTOR DES PHOTOMULTIPLIERS

Nach <42> gibt es keine zuverlässigen Untersuchungen über den Temperatureinfluß auf den Verstärkungsfaktor eines PM. In der Regel ist er kleiner als $0,1\%$ pro Grad, er kann positiv oder negativ sein.

Eine Änderung der Temperatur von $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ hat aufgrund des Temperaturkoeffizienten der Metallschichtwiderstände des Spannungsteilers des PM eine Änderung des Querstroms von ΔI_q zur Folge. Bei konstanter Speisespannung U_{PM} hat dies keinen Einfluß auf den Verstärkungsfaktor G_1 des PM, da das Teilverhältnis erhalten bleibt.

Die Versorgungsspannung U_{PM} selbst ändert sich nach <45> um weniger als 10^{-4} % pro Grad, bei $\Delta T = 10$ also um $\Delta U_{PM} = 0,1\%$.

Nach <41> gilt für die Änderung des Verstärkungsfaktors G_1 als Funktion von U_{PM} :

$$\frac{\delta G_1}{G_1} = r \cdot \frac{\delta U_{PM}}{U_{PM}} \quad (8.1)$$

Dabei ist $r = 10$ die Zahl der Vervielfacherstufen des PM. Demnach hat diese temperaturbedingte Änderung der Anodenspannung eine Änderung des Verstärkungsfaktors von einem Prozent zur Folge.

Zur Erzeugung der Beschleunigerspannungen an den Dynoden des PM dient ein Spannungsteiler aus Metallschichtwiderständen, gespeist aus einer Hochspannungsquelle der Firma WENZEL vom Typ NHS 250. Eine Änderung des Anodenstroms I_A bewirkt eine Änderung des Stroms durch den Spannungsteiler und damit eine Änderung der Spannungen an den einzelnen Dynoden des PM. Nach <41> hat dies eine Änderung ΔG_1 des Verstärkungsfaktors des PM zur Folge:

$$\frac{\Delta G_1}{G_0} = \frac{I_A}{I_q} \frac{r \cdot (1 - \sigma') + 1}{(r + 1)(1 - \sigma')} \quad (8.2)$$

Dabei ist G_0 der Verstärkungsfaktor und I_q der Querstrom durch den Spannungsteiler, jeweils ohne Anodenstrom, r die Zahl der Vervielfacherstufen und σ' der mittlere Sekundäremissionsfaktor einer Dynode. Die größte vorkommende Änderung des Anodenstroms liegt zwischen $I_A = 0$ bei Dunkelheit und ohne Dunkelstrom und dem vom Hersteller empfohlenen größten Strom von 10^{-5} A. Mit den Zahlenwerten für $G_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, $I_q = 7,5 \cdot 10^{-4}$ A, $r = 10$ und $\sigma' = 3,71$ ergibt sich die maximale Änderung des

Verstärkungsfaktors zwischen Dunkelheit und größtzulässigem Anodenstrom zu $\Delta G_1 = 1,17\%$, bezogen auf $G_0 = 100\%$.

8.4 EIGENSCHAFTEN DER VERSTÄRKER IM LICHTMESSZWEIG

8.4.1 BERECHNUNG DES RESULTIERENDEN VERSTÄRKUNGSFAKTORS UND EINFLUSS DER TEMPERATUR IM STROM-SPANNUNGSWANDLER

Der Anodenstrom I_A des PM, bestehend aus dem unerwünschten Dunkelstrom und dem Signalstrom, welcher der Intensität des RPL-Lichtes proportional ist, wird im Strom-Spannungswandler in eine proportionale Spannung U_2 umgesetzt. (Abb. 8.5) Der Proportionalitätsfaktor G_2 ist mit Hilfe des Schalters S in zwei Stufen wählbar.

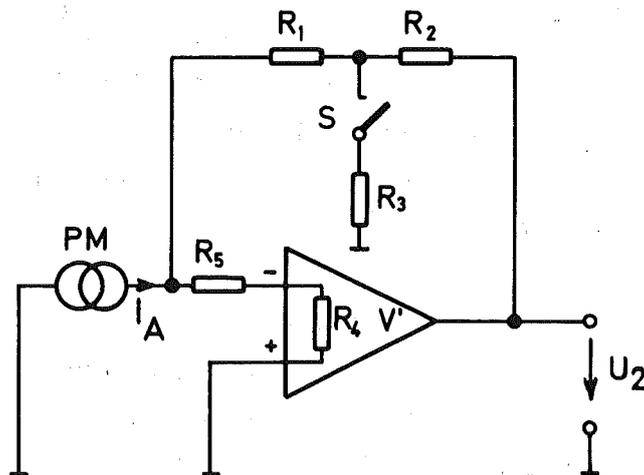


Abb. 8.5 STROM-SPANNUNGSWANDLER

Die Ausgangsspannung U_2 errechnet sich durch Anwendung

der Knoten- und Maschenregel zu:

Schalter S	Bedingungen	R_F	U_2	U_2 , mit R_i S.U.
offen	$R_4 \gg R_5$ $R_4 \gg R_1 + R_2$ $v' \gg 1$	$R_1 + R_2$	$-I_A \cdot R_F$	$\approx -10^6 \cdot I_A$
geschlossen	$v' \frac{R_3 \cdot R_4}{R_2 + R_3} \gg$ $R_1 + R_4 + R_5$	$R_2 + R_3 \frac{R_1}{R_3}$	$-I_A \cdot R_F$	$\approx -10^7 \cdot I_A$

Tab. 8.1 BERECHNUNG DER VERSTÄRKUNG DES STROM-SPANNUNGS-
WANDLERS

Dabei ist v' die Leerlaufverstärkung des verwendeten Operationsverstärkers. Mit der gewählten Dimensionierung

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 10^6 \, \Omega & R_4 &= 10^{10} \, \Omega \\
 R_2 &= 5 \cdot 10^3 \, \Omega & R_5 &= 1,1 \cdot 10^5 \, \Omega \\
 R_3 &= 5 \cdot 10^2 \, \Omega & v' &= 5 \cdot 10^4
 \end{aligned}$$

sind die Bedingungen in Spalte zwei der Tabelle 8.1 erfüllt und als Verstärkungsfaktoren des Strom-Spannungswandlers ergeben sich -10^6 V/A bei offenem und -10^7 V/A bei geschlossenem Schalter S.

Bei jedem realen Strom-Spannungswandler beeinflusst nicht nur der Eingangsstrom I_A , der die zu verarbeitende Information trägt, sondern auch der Eingangsfehlerstrom I_F die Ausgangsspannung U_2 : <46,47>

$$U_2 = -R_F (I_A + I_F) \quad (8.3)$$

Der Eingangsfehlerstrom I_F läßt sich aufteilen in den Anteil des Biasstroms I_B und den Anteil, der von der Offsetspannung U_{off} verursacht wird:

$$I_F = U_{\text{off}} \cdot \frac{R_F + R_S}{R_F \cdot R_S} + I_B \quad (8.4)$$

Beide Anteile lassen sich für eine konstante Temperatur T auf Null abgleichen, so daß dann nur noch die Temperaturdrift der Offsetspannung und des Biasstroms wirksam werden.

Für den im Strom-Spannungswandler verwendeten FET-Operationsverstärker AD 514J der Firma ANALOG DEVICES werden bezüglich dieser Parameter folgende Angaben gemacht:

Offset-Spannungsdrift:	30 - 70 Mikrovolt
	pro Grad
Eingangs-Biasstrom	: 5 - 50 Picoampere
Bias-Stromdrift	: Verdoppelung pro
	zehn Grad

Nach Abgleich der Ausgangsspannung auf Null wurden zur Bestimmung des bleibenden Fehlers durch Temperaturdrift Messungen im Wärmeschrank durchgeführt im Temperaturbereich zwischen 25 °C und 50 °C. Die Summe der Drift aus Offsetspannung und Biasstrom, bezogen auf den Eingang, beträgt nach diesen Messungen:

$$\Delta I_F(T) = 6,5 \cdot 10^{-12} \text{ A pro Grad} \quad (8.5)$$

das heißt, der Fehlerstrom beträgt bei einer Temperaturänderung von einem Grad 0,65 % des kleinsten Anodenstroms von 10^{-9} A im Arbeitsbereich des PM.

8.4.2 TIEFPASS IM LICHTMESSZWEIG

Da die Emission von Elektronen im PM statistischer Natur ist, ist auch der Anodenstrom I_A nicht zeitlich konstant. Er ist vielmehr darstellbar durch einen Gleichstromanteil und einen zeitabhängigen Anteil, dessen Spektrum bis zu hohen Frequenzen reicht. Bei der Abtastung von RPL-Intensitätsprofilen erfolgen Änderungen des Signals nur langsam. Treten dennoch große Signaländerungen auf, zum Beispiel beim Abtasten in der Nähe der Glaskanten, wird durch den Rechner die Übernahme des Meßsignals

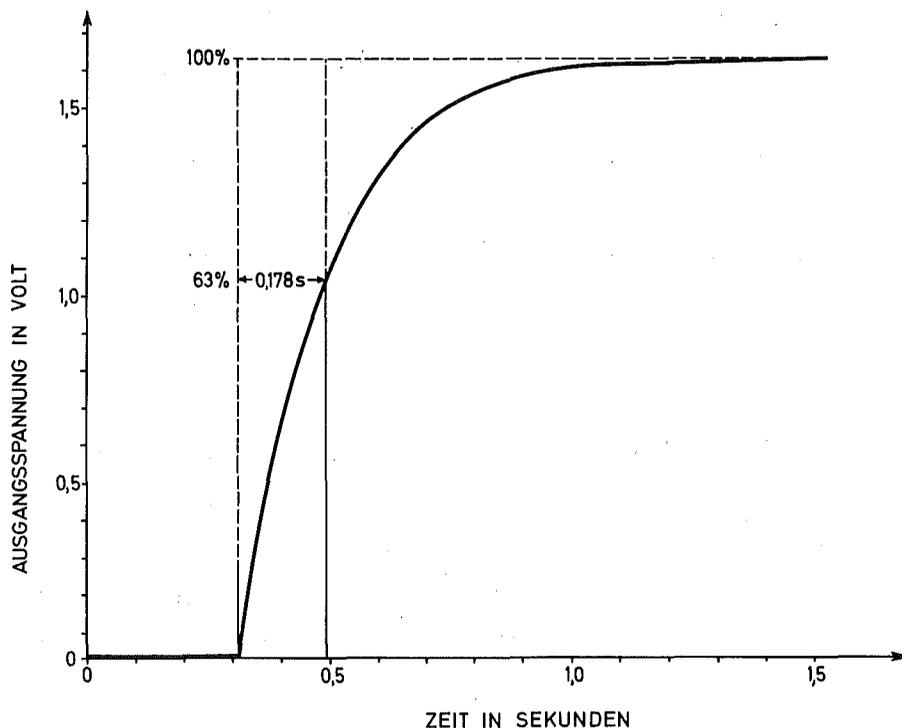


Abb. 8.6 SPRUNGANTWORT DES LICHTMESSZWEIGES

so lange verzögert, bis das Signal seinen Endwert erreicht hat. Aus diesen Gründen ist es möglich, zur Verbesserung des Signal-Störverhältnisses die elektrische Bandbreite des RPL-Lichtmeßzweiges durch einen Tiefpaß

zu begrenzen. Als Zeitkonstante wurde $\tau_t = 0,18$ s gewählt, so daß sich die Sprungantwort des RPL-Lichtmeßzweiges in Abb. 8.6 ergibt. Zum Erzeugen einer sprungartigen Änderung des Eingangssignals wurde die Kathode des PM durch einen elektromagnetisch betätigten Verschuß abgedeckt und plötzlich geöffnet.

8.4.3 BERECHNUNG DES VERSTÄRKUNGSFAKTORS UND TEMPERATUR-EINFLUSS IM REGELBAREN VERSTÄRKER

Überstreicht der Anodenstrom des PM den gesamten nutzbaren Bereich von vier Dekaden zwischen einem Strom in der Größenordnung des Dunkelstroms von 10^{-9} A und dem vom Hersteller empfohlenen größten Strom von 10^{-5} A, so durchfährt die Ausgangsspannung U_2 des Strom-Spannungswandlers bei entsprechender Stellung von Schalter S den Bereich zwischen 10^{-2} V und 10 V (Abb 8.7). Der folgende Tiefpaß hat im eingeschwungenen Zustand keinen Einfluß auf die Amplitude des Gleichanteils der Spannung U_2 und damit auf das Signal. Der A-D-Wandler hat einen nutzbaren Eingangsspannungsbereich von $\pm 10,25$ V und einen kleinsten auflösbaren Spannungsschritt von 10^{-3} V.

Um auch bei kleinen Anodenströmen des PM eine genügende Auflösung des Signals zu erhalten, wurde für den Lichtmeßzweig ein regelbarer Verstärker entwickelt. Er enthält als aktiven Baustein einen Instrumentenverstärker der Firma BURR BROWN vom Typ 3662 JP <48>. Sein Verstärkungsfaktor G_3 kann durch Umschalten verschiedener externer Präzisionswiderstände über Reed-Relais manuell oder rechnergesteuert zwischen 1, 10 und 100 umgeschaltet werden. Zusätzlich kann der Verstärkungsfaktor des Strom-Span-

nungswandlers zwischen

$$\begin{aligned} G_2 &= -10^6 \text{ V/A} \\ \text{und} \quad G_2 &= -10^7 \text{ V/A} \end{aligned}$$

von Hand oder durch den Rechner gewählt werden .

(Siehe Kap 8.4.1). Damit liegt die Eingangsspannung U_4 am Eingang des A-D-Wandlers im gesamten Arbeitsbereich des Lichtmeßzweiges stets zwischen einem und zehn Volt und der Quantisierungsfehler des A-D-Wandlers beträgt höchstens 0,5 % der Meßgröße (Tab. 8.2).

I_A [A]	G_2 [V/A]	G_3	U_4 [V]
-10^{-9}	-10^{-7}	10^2	1 bis 10
-10^{-8}	-10^{-6}	10^2	1 bis 10
-10^{-7}	-10^{-6}	10^1	1 bis 10
-10^{-6}	-10^{-6}	10^0	1 bis 10

Tab. 8.2 ANODENSTROM I_A UND AUSGANSSPANNUNG U_4
IM ARBEITSBEREICH DES LICHTMESSZWEIGES

Dabei ist I_A der Anodenstrom des PM, U_4 die Spannung am Eingang des A-D-Wandlers, und sind G_2 und G_3 die Verstärkungsfaktoren des Strom-Spannungswandlers und des regelbaren Verstärkers.

Fehler durch temperaturbedingte Änderungen der Offsetspannung und des Biasstroms sind in dieser Verstärkerstufe sehr gering, da die minimale Eingangsspannung bereits zehn Millivolt beträgt. Die Offset-Spannungsdrift des verwendeten Instrumentenverstärkers ist nach <48> maximal $\pm 15 \cdot 10^{-6}$ Volt pro Grad bei der größten verwendeten

Verstärkung $G_3 = 100$. Damit beträgt die Temperaturdrift maximal $\pm 0,15\%$ des Meßsignals pro Grad. Nichtlinearitäten sind mit höchstens $\pm 0,1\%$ ebenfalls zu vernachlässigen.

8.4.4 LINEARITÄT UND ZEITLICHE KONSTANZ DER VERSTÄRKUNG IM RPL-LICHTMESSZWEIG

Zur Bestimmung der Linearität des Strom-Spannungswandlers wurde der PM durch eine Präzisionsstromquelle er-

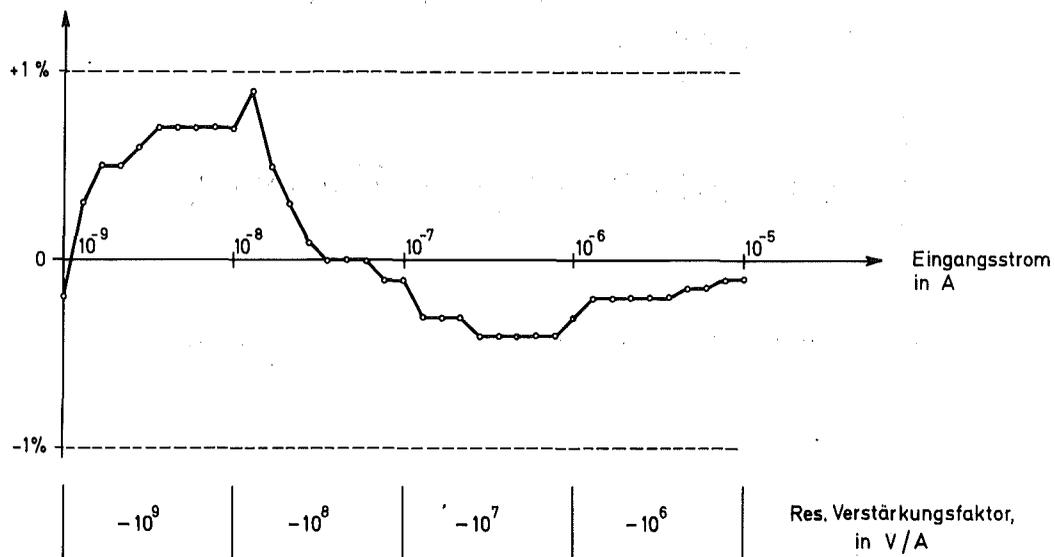


Abb. 8.7 RELATIVE ABWEICHUNG DES VERSTÄRKUNGSFAKTORS IM RPL-LICHTMESSZWEIG

setzt und der Eingangsstrom I_A über die vier Dekaden des Arbeitsbereiches zwischen 10^{-9} A und 10^{-5} A variiert. Der resultierende Verstärkungsfaktor wurde dabei zwischen -10^6 V/A und -10^9 V/A umgeschaltet. Die Abweichung der Ausgangsspannung U_4 vom Sollwert war dabei stets kleiner als ein Prozent, bei einem Eingangsstrom zwischen 10^{-8} A

und 10^{-5} A geringer als $\pm 0,4\%$ (Abb. 8.7).

Bei einem konstanten Strom I_A von 10^{-8} A betragen die Abweichungen vom Mittelwert weniger als $\pm 0,3\%$; sie waren zufällig verteilt und eine überlagerte Drift war nicht festzustellen (Abb. 8.8)

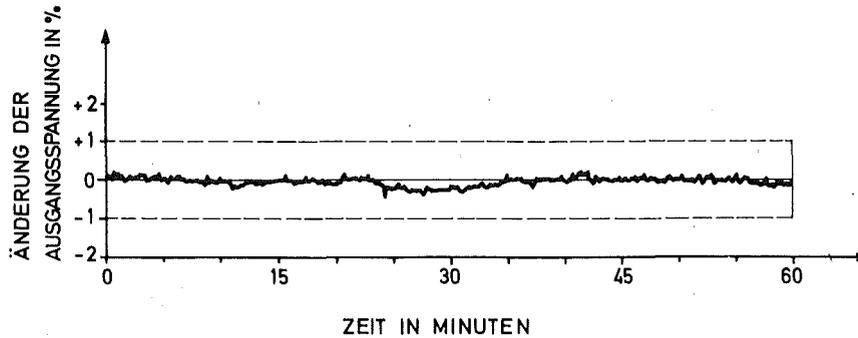


Abb. 8.8 KONSTANZ DES VERSTÄRKUNGSFAKTORS IM RPL-LICHTMESSZWEIG

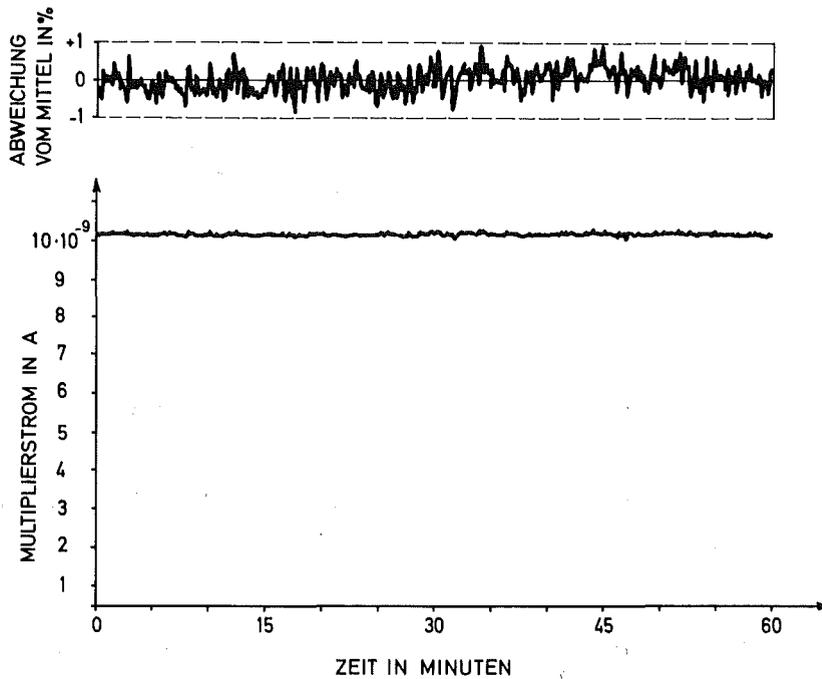


Abb. 8.9 KONSTANZ DES VERSTÄRKUNGSFAKTORS IM LICHTMESSZWEIG EINSCHLIESSLICH PM

Um auch Änderungen des Verstärkungsfaktors im Meßzweig,

die ihren Ursprung im Photomultiplier haben, erfassen zu können, wurde auf dessen Kathode ein konstanter Lichtstrom aus einer Referenzlichtquelle gegeben (Abb. 8.9). Mit dieser Anordnung änderte sich die Ausgangsspannung U_4 während einer Stunde um maximal $\pm 1 \%$ und Driftverhalten war nicht meßbar.

9. GESAMTFUNKTION DES AUSWERTEGERÄTES

Abb. 9.1 zeigt ein Blockschaltbild des gesamten Auswertegeräts.

Der Anregungszeitweig, bestehend aus UV-Lampe mit geregelter Stromversorgung, Optik, drehbarem Spalt und zwei Drehspiegeln (Scannerspiegel), hat die Aufgabe, jeweils ein Teilvolumen des Dosimeterglases zur RPL anzuregen.

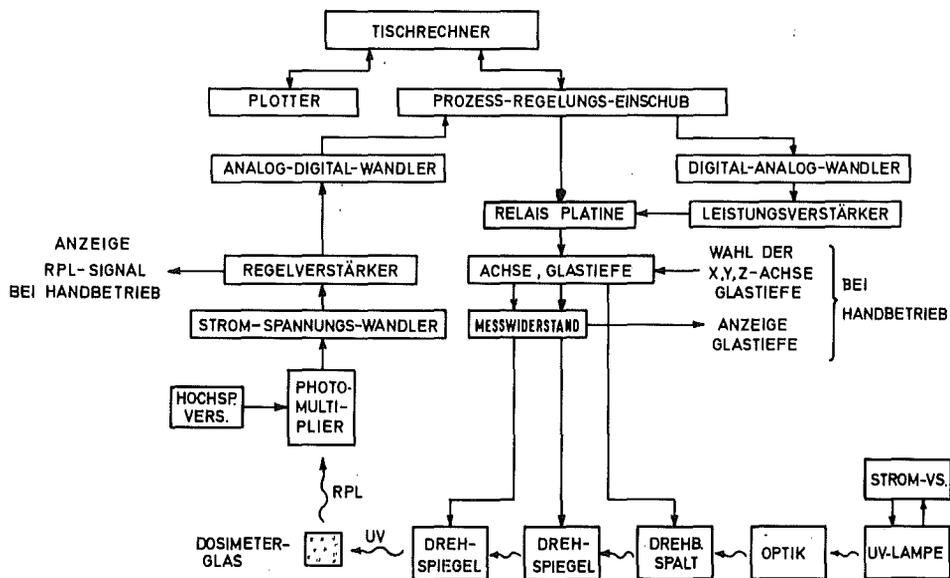


Abb. 9.1 BLOCKSCHALTBILD DES GESAMTEN AUSWERTEGERÄTS

Dazu wird aus dem Licht der UV-Lampe durch den Spalt und die Optik ein schmales Lichtbündel ausgeblendet und durch die beiden Drehspiegel in das vom Tischrechner vorgegebene Teilvolumen des Dosimeterglases gelenkt. Die Signale zur Steuerung der Drehspiegel werden vom Rechner digital codiert über den Prozeßregelungseinschub

in den Digital-Analog-Wandler geschickt. Dessen Ausgangsspannung wird in einem Leistungsverstärker in den zur Auslenkung der Drehspiegel benötigten Strom umgesetzt. Die Auslenkung der Drehspiegel und damit die Position des UV-Lichtbündels ist diesem Strom proportional (Kap. 6.5). Er erzeugt an dem Meßwiderstand eine Spannung, die zur Anzeige der Position des UV-Lichtbündels im Dosimeterglas für den manuellen Betrieb des Auswertegeräts dient. Die Wahl der Koordinatenachse, in deren Richtung das Dosimeterglas abgetastet werden soll, kann ebenso wie die Position des angeregten Teilvolumens im Dosimeterglas durch den Rechner oder von Hand erfolgen. Die entsprechenden Umschaltungen im Auswertegerät werden durch verschiedene Relais vorgenommen.

Der RPL-Lichtmeßzweig dient dazu, einen zur Intensität des RPL-Lichtes des angeregten Glasteilvolumens proportionalen Meßwert, das sogenannte RPL-Signal zu gewinnen. Dieser Gerätezweig besteht aus einem optischen Filter, dem Photomultiplier als Detektor für das RPL-Licht, einer Hochspannungsversorgung und einem Strom-Spannungswandler. Die Aufgaben und Wirkungsweise dieser Bausteine wurde bereits in Kap. 8 eingehend erläutert. Im A-D-Wandler wird das RPL-Signal digital codiert und über den Prozeß-Regelungseinschub dem Rechner zugeführt.

Übergeordnet steuert der Rechner im Rahmen verschiedener Programme den Ablauf der Messung der drei RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases; er bestimmt aus ihnen die Strahleneinfallrichtung, die effektive Quantenenergie und die Dosis der Bestrahlung und druckt diese Parameter aus. Außerdem gibt er auf dem Plotter eine mehrfarbige graphische Darstellung der Intensitätsprofile.

10. RECHNERPROGRAMME ZUM BETRIEB DES AUSWERTEGERÄTES

10.1 AUFGABEN DER PROGRAMME UND DATENFLUSS

Für die rechnergesteuerte, automatische Funktion des Auswertegerätes wurde ein Paket von Rechnerprogrammen entwickelt (Abb. 10.1).

Die Hauptprogramme POSITIONSABGLEICH (siehe Kap. 10.2), ABGLEICH DER POSITIONSANZEIGE (Kap. 10.3) und MESSEN DER REFERENZPROFILE (Kap. 10.4) werden nur in größeren zeitlichen Abständen verwendet, um das Auswertegerät in seinen optimalen Betriebszustand zu versetzen.

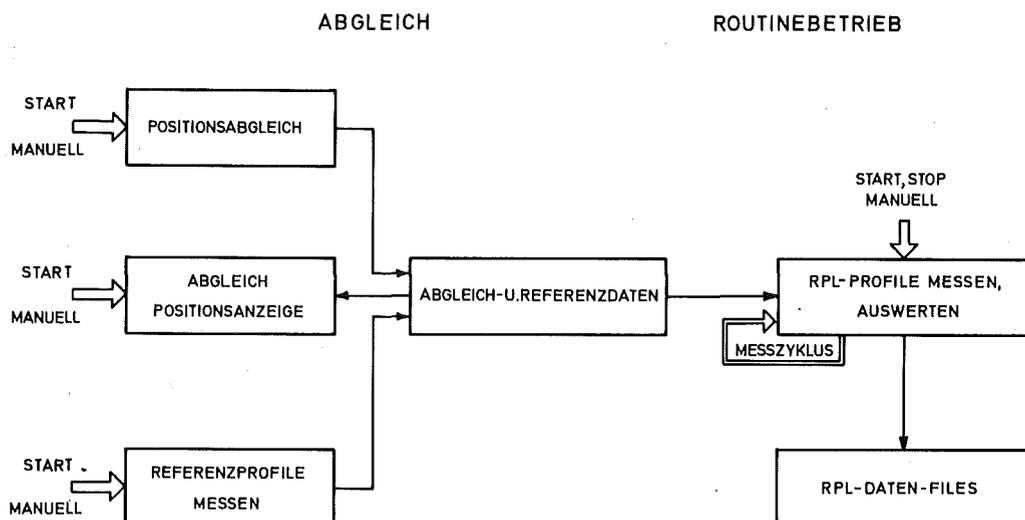


Abb. 10.1 RECHNERPROGRAMME UND DATENFLUSS

Das Programm POSITIONSABGLEICH bewirkt eine eindeutige Zuordnung der Auslenkung des UV-Lichtbündels durch die Drehspiegel und der Position des Dosimeterglases im Aus-

wertegerät. Der Nullpunkt und die Verstärkung des Digitalvoltmeters zur Anzeige der angeregten Glastiefe bei Handbetrieb werden mit Hilfe des Programmes ABGLEICH DER POSITIONSANZEIGE eingestellt. Das Programm MESSEN DER REFERENZPROFILE tastet die RPL-Intensitätsprofile eines Referenz-Dosimeterglases ab, das mit energiereicher Photonenstrahlung bekannter Dosis bestrahlt worden ist. Aus der Abweichung dieser gemessenen Profile von dem bekannten idealen Verlauf infolge von optischen Unregelmäßigkeiten werden Daten zur Korrektur dieser Abweichungen bei Intensitätsprofilen von Dosimetergläsern mit unbekannter Bestrahlung gewonnen, aus der mittleren Intensität des RPL-Lichtes des Referenzglases wird ein Gerätefaktor zur Berechnung der RPL-Intensität dieser Gläser bestimmt.

Diese Rechenprogramme werden bei Bedarf einzeln von Hand gestartet. Ihr Resultat in Form von Abgleich- und Referenzdaten für den Routinebetrieb des Auswertegerätes wird in einem ABGLEICH- UND REFERENZDATENFILE auf Magnetband gespeichert.

Zum routinemäßigen Auswerten von Glasdosimetern dient das Hauptprogramm RPL MESSEN, AUSWERTEN (siehe Kap. 10.5). Es greift vor jeder Meßserie auf die Abgleich- und Referenzdaten zurück, speichert die gemessenen RPL-Intensitätsprofile jedes Dosimeterglases in einem eigenen RPL-DATENFILE und ermittelt aus diesen Profilen die Einfallrichtung, eine effektive Energie und die Dosis, mit der das Dosimeterglas bestrahlt worden ist. Darüberhinaus werden im Rahmen dieses Programmes Angaben gemacht über die Standardabweichung der Fehler bei der Bestimmung dieser Größen.

10.2 AUFBAU DER RECHENPROGRAMME

Die vier Hauptprogramme in Ebene 1 der Abb. 10.2 greifen auf verschiedene Unterprogramme in Ebene 2 und 3 zurück, die ihrerseits noch einfachere Programmbausteine verwenden in Ebene 4.

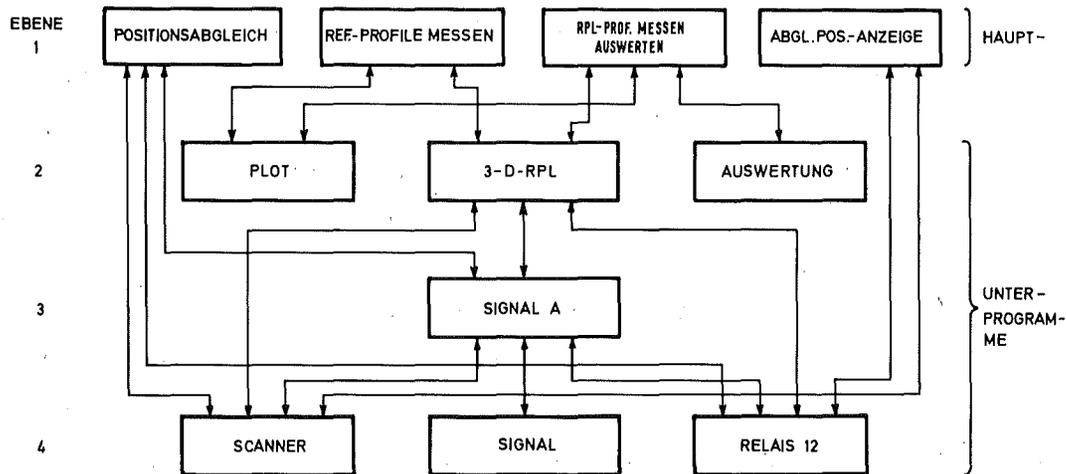


Abb. 10.2 SCHACHTELUNG DER PROGRAMMBAUSTEINE

Als Programmiersprache wird in Ebene 1, 2 und 3 HPL verwendet (Hewlett Packard Language), in Ebene 4 die spezifische Sprache des HEWLETT PACKARD MULTIPROGRAMMERS (Prozeßregelungseinschub). Dieser Aufbau der Programme aus einzelnen Bausteinen erhöht die Übersichtlichkeit und erleichtert die Beseitigung von Fehlern in den Programmen, wie sie zum Beispiel durch Schreib/Lesefehler der Magnetbandeinheit beim Einlesen der Programme auftreten können.

10.3 ABGLEICH DER POSITION DES UV-LICHTBÜNDELS

10.3.1 ARBEITSWEISE DES ABGLEICHVERFAHRENS

Es ist empfehlenswert, in größeren zeitlichen Abständen die Position des UV-Lichtbündels relativ zum Dosimeterglas in der optischen Kammer zu überprüfen, beziehungsweise zu justieren. Dazu wird anstelle des normalen Dosimeters, das heißt anstelle eines Glashalters mit einem Dosimeterglas ein Glashalter mit einem Justierwürfel in die Meßposition gebracht (siehe Abb. 6.9 in Kap. 6.5) Dieser Justierwürfel besteht aus einem Quader aus RPL-Glas mit den Abmessungen $6 \times 6 \times 8 \text{ mm}^3$, der mit einer hohen Dosis von Photonenstrahlung bestrahlt wurde. Die vier seitlichen Flächen des Glases und die Unterseite sind durch einen Messingkörper abgedeckt, die Deckfläche ist offen. In zweien der Seitenflächen sind insgesamt sechs Bohrungen von 0,2 mm Durchmesser so angeordnet, daß sie bei der Positionierung eines Dosimeterglases einer Glastiefe von zwei und sechs Millimetern der jeweiligen Koordinatenachse entsprechen. Zwischen der Spannung am Ausgang des D-A-Wandlers, dem Scannerstrom, dem Drehwinkel der Scannerspiegel und der Position des UV-Lichtbündels relativ zum Dosimeterglas bestehen annähernd lineare Beziehungen (Abb. 6.1 in Kap. 6.5). Deshalb können die Parameter Offset und Steigung des Zusammenhanges zwischen angeregter Glastiefe und Spannung am D-A-Wandler aus zwei Meßpunkten bestimmt werden. Überstreicht das UV-Lichtbündel schrittweise den Justierwürfel und trifft durch eine Bohrung auf das bestrahlte RPL-Glas im Innern, so mißt der PM eine RPL-

Intensität. Als Resultat dieser Abtastung erhält man ein Profil auf dem Plotter, wie es in Abb. 10.3 für die drei Koordinatenachsen dargestellt ist.

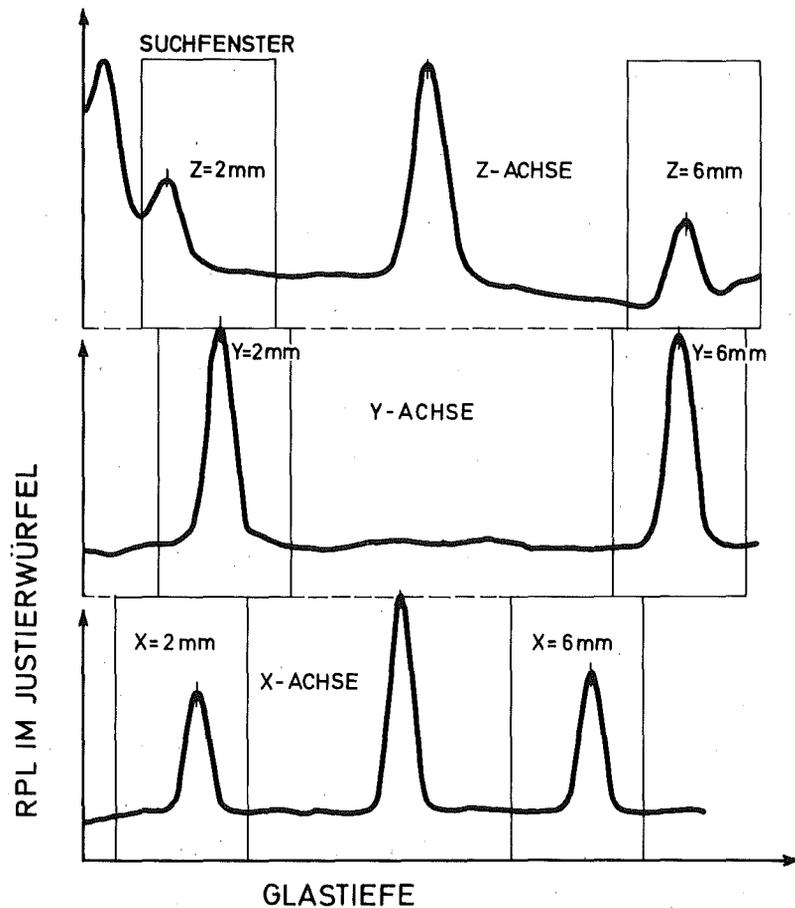


Abb. 10.3 PLOTTERAUSGABE BEIM ABGLEICH DER POSITION DES UV-LICHTBÜNDELS

In die Profile nach Abb. 10.3, bestehend aus jeweils etwa 400 Meßpunkten, werden sogenannte Suchfenster gelegt, Bereiche mit einer Breite von 50 Punkten. Sie werden nach Maxima durchsucht, welche ihre Ursache haben in den Bohrungen im Justierwürfel und die einer Glas-tiefe von zwei und sechs Millimetern in einem Dosimeter-glas entsprechen. Im nächsten Schritt werden aus der

Lage dieser Maxima Offset und Steigung der linearen Funktion zwischen Spannung am D-A-Wandler und angeregter Glastiefe berechnet. Dieser gesamte Ablauf wird sinn- gemäß für die y-Achse und die z-Achse wiederholt. Zu- letzt werden die Parameter Offset und Steigung für die drei Koordinatenachsen in dem Referenz- und Abgleichda- tenfile auf Magnetband gespeichert.

10.3.2 DURCHFÜHRUNG DES POSITIONSABGLEICHES

Der Abgleich der Justierung wird nach dem manuellen Ein- setzen des Justierwürfels in die optische Kammer durch das Hauptprogramm POSITIONSABGLEICH selbsttätig durch- geführt. Nach dem Programmstart werden zuerst alle Maß- nahmen getroffen, die beim Abtasten in x-Richtung not- wendig sind:

- Der optische Spalt schwenkt in die vertikale Position, gleichzeitig wird der Drehspiegel zur Auslenkung des UV-Lichtbündels in x- und y-Richtung mit dem Ausgang des Leistungsverstärkers verbunden (siehe Abb 9.1). Dadurch befindet sich das UV-Lichtbündel in der Glas- ebene in vertikaler Position und außerhalb des Glas- körpers bei $x < 0$ mm.
- Der Drehspiegel zur Auslenkung in z-Richtung wird durch einen konstanten Strom gespeist, so daß das Bündel in vertikaler Position etwa in Glasmitte zwischen $z = 1,5$ mm und $z = 7,5$ mm steht.
- Die Skalierung der Anzeige des Digitalvoltmeters zur Anzeige der angeregten Glastiefe für den Handbetrieb des Auswertegerätes wird durch einen Spannungsteiler und eine entsprechende Offsetspannung auf die Verhält-

nisse beim Abtasten in x-Richtung angepaßt. Diese drei Umschaltungen werden durch das Unterprogramm RELAIS 12 vorgenommen (Abb. 10.1). In dem folgenden Zyklus wird der x-y-Drehspiegel mit Hilfe des Unterprogrammes SCANNER um einen Winkel φ gedreht. Nach einer kurzen Pause zum Einschwingen des Tiefpasses im Meßzweig wird mit Hilfe des Unterprogrammes SIGNAL A die RPL-Intensität über PM, Strom-Spannungswandler, regelbaren Verstärker und A-D-Wandler gemessen und in einem Datenfeld gespeichert. Auf diese Weise wird die Antwort des Justierwürfels auf das abtastende UV-Lichtbündel in 400 Meßpunkten festgehalten und auf dem Vier-Farben-Plotter graphisch ausgegeben.

10.4 ABGLEICH DER POSITIONSANZEIGE

Ein Digitalvoltmeter mit der Bezeichnung "Glastiefe" dient beim Handbetrieb des Auswertegerätes zur Ausgabe der Position des UV-Lichtbündels. Mit Hilfe des Rechenprogrammes ABGLEICH DER POSITIONSANZEIGE ist ein einfacher und schneller Abgleich dieser Anzeige möglich.

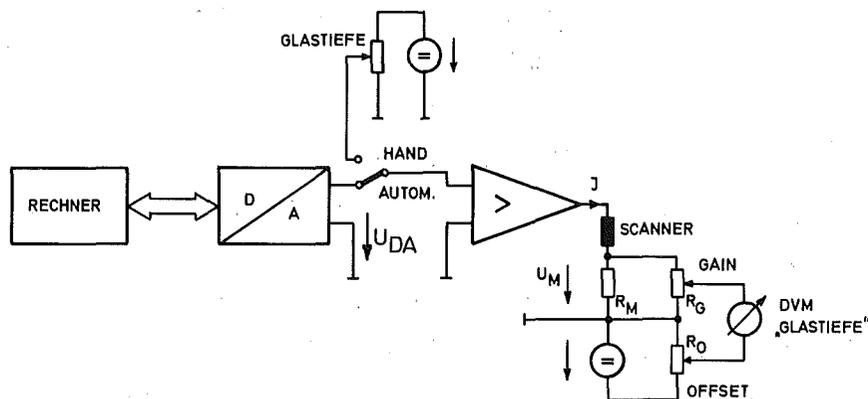
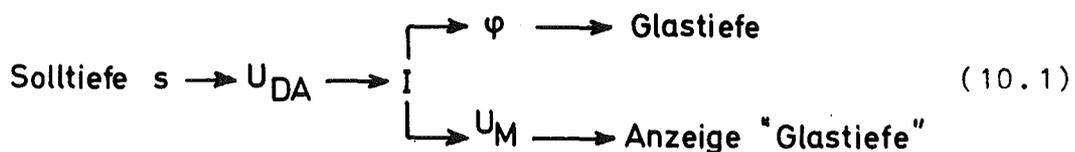


Abb. 10.4 ANORDNUNG ZUM ABGLEICH DER POSITIONSANZEIGE

Nach Gl. 5.17 besteht in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der Position des UV-Lichtbündels (und damit der angeregten "Glastiefe") im Dosimeterglas und dem Drehwinkel der Scannerspiegel. Dieser Drehwinkel ist wiederum linear abhängig vom Strom I durch den Scannerantrieb und den Meßwiderstand R_M (Abb. 10.4). Der Scannerstrom ist proportional der Spannung am Ausgang des D-A-Wandlers U_{DA} und damit der Solltiefe s :



Die Pfeile symbolisieren hier lineare Beziehungen zwischen den jeweiligen Größen.

Die Parameter Steigung, $P[K,1]$, und Offset, $P[K,2]$, der Beziehung

$$U_{DA} = P[K,1] \cdot s' + P[K,2] \quad (10.2)$$

wobei $K = 1, 2, 3$ ist für die x-, y- und z-Achse, sind bei der Justierung der Position des UV-Lichtbündels (Kap. 10.2) ermittelt worden und im Referenzdatenfile gespeichert. Damit läßt sich das UV-Lichtbündel durch den Rechner in beliebige Glastiefen lenken. Jede Glastiefe ist gekennzeichnet durch die Spannung U_M am Meßwiderstand R_M . Durch das Potentiometer R_G kann ein Teil von U_M abgegriffen und dem Digitalvoltmeter "Glastiefe" zugeführt werden. Der Bezugspunkt des Voltmeters kann durch das Potentiometer R_0 auf negatives Potential gegenüber dem Bezugspotential des Meßsystems verschoben werden. Das heißt, durch R_G wird die Steigung p und durch R_0 der Offset q der Beziehung zwischen der angezeigten Glastiefe a und der Solltiefe s verändert.

Im nicht abgeglichenen Zustand liegt die Kennlinie $a = f(s')$ in Form der Geraden 1 in Abb. 10.5 vor. Durch den Abgleich soll sie in eine Kennlinie entsprechend der Geraden 3 überführt werden, das heißt, die

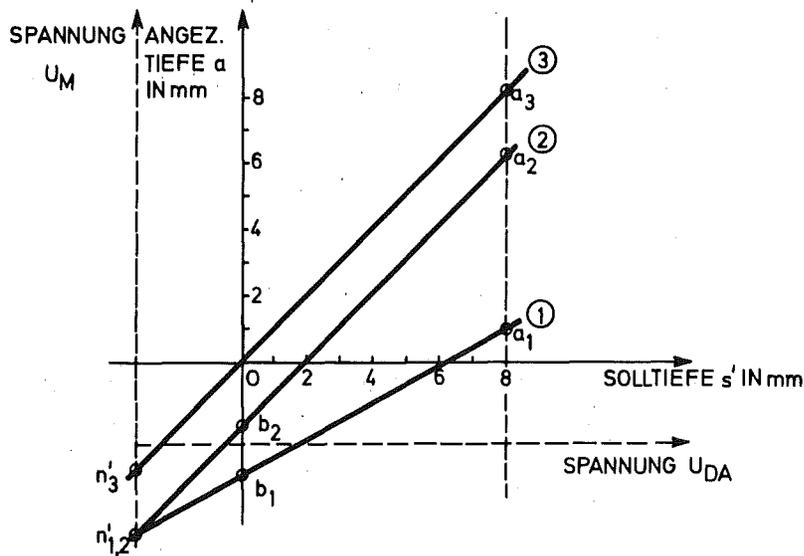


Abb. 10.5 KENNLINIE: ANZEIGE "GLASTIEFE" a ALS FUNKTION DER SOLLTIEFE s

Solltiefe "0 mm" muß eine Anzeige "0 mm" und die Solltiefe "8 mm" eine Anzeige "8 mm" zur Folge haben.

Im ersten Schritt des Abgleichprogrammes werden nach Gl. 10.1 die Spannungen U_{DA} des D-A-Wandlers für die Solltiefen "0 mm" und "8 mm" berechnet und das UV-Lichtbündel in diese Positionen gelenkt. Die Anzeigen a_1 und b_1 des Digitalvoltmeters werden abgelesen und über die Tastatur in den Rechner eingegeben.

Im zweiten Schritt wird die Anzeige a_2 berechnet und ausgegeben, die bei einer zur Sollgeraden 3 parallelen Kennlinie 2 der Solltiefe "8 mm" entspricht. Das UV-Lichtbündel steht dabei in der Position "8 mm". Von Hand wird nun das Potentiometer R_G mit der Bezeichnung "gain"

abgeglichen, bis anstelle von a_1 die Anzeige a_2 am Digitalvoltmeter "Glastiefe" erscheint. Dadurch wird die Kennlinie 1 in die Gerade 2 gedreht.

Im letzten Schritt wird das UV-Lichtbündel in die Solltiefe "0 mm" gelenkt und das Potentiometer R_0 mit der Bezeichnung "offset" bis zur Anzeige "0 mm" abgeglichen. Dadurch wird die Kennlinie 2 in die gewünschte Kennlinie 3 parallel verschoben.

Diese drei Teilschritte des Abgleichvorganges werden nacheinander für die x-, y- und z-Achse des Koordinatensystems vorgenommen.

10.5 BESTIMMUNG VON REFERENZPROFILEN

Wie in Kap. 7 gezeigt wurde, weichen die drei RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases, das mit Photonenstrahlung hoher Energie bestrahlt worden war, aufgrund optischer Unsymmetrien in geringem Maße vom idealen, horizontalen Verlauf ab. Dies wird deutlich an den Intensitätsprofilen eines Referenzglases in Abb.

10.6:

Dieses Glas wurde mit einer hohen Dosis energiereicher Photonen aus einer ^{137}Cs -Quelle bestrahlt. Während der Bestrahlung rotierte das Dosimeterglas um eine Achse parallel zur z-Achse, um eine homogene Verteilung der RPL-Zentren zu gewährleisten. Die gemessene RPL-Intensität ist nicht konstant über die Glastiefe; abgesehen von Effekten an den Glaskanten hat das z-Profil einen fallenden Verlauf. Eine Erklärung dafür findet sich ebenfalls in Kap. 7.

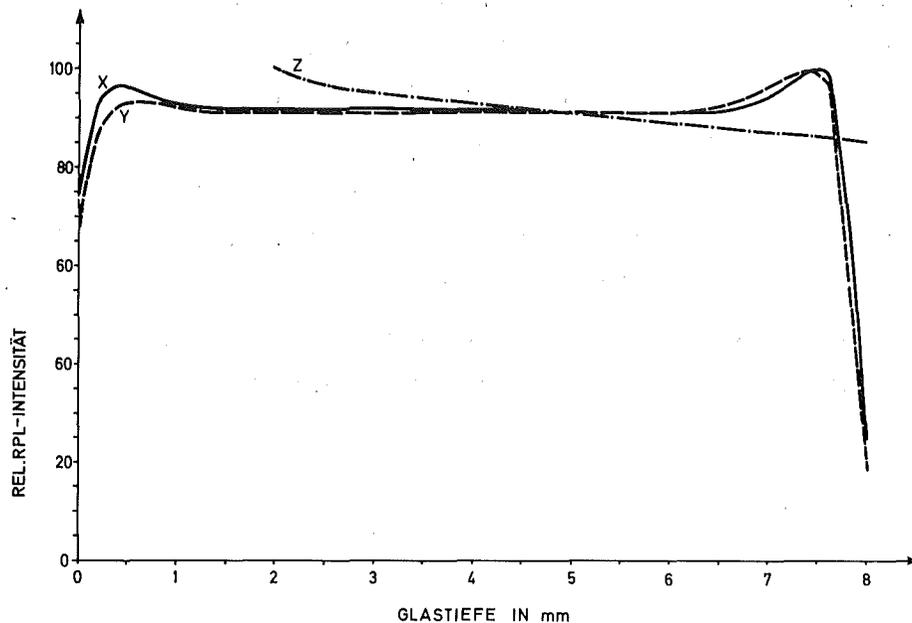


Abb. 10.6 RPL-INTENSITÄTSPROFILE EINES DOSIMETERGLASES
NACH BESTRAHLUNG MIT PHOTONEN EINER ENERGIE
VON 662 KeV

Zur Korrektur dieser Einflüsse werden die Profile des Referenzglases nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung durch je eine Gerade angenähert. Die Randzonen bis 0,4 mm Glastiefe werden dabei nicht berücksichtigt. Die Parameter Steigung und Offset dieser Geraden werden normiert, im Referenzdatenfile auf Magnetband gespeichert und damit dem RPL Mess- und Auswertprogramm zur Korrektur anderer RPL-Intensitätsprofile zur Verfügung gestellt.

Weiterhin wird der sogenannte Gerätefaktor F_G bestimmt. Er ist der Quotient aus der Summe der RPL-Intensität der Referenzprofile in x- und y-Richtung in einem Glasbereich zwischen 0,4 mm und 7,6 mm und der Standardionendosis des Referenzglases. Dieser Faktor wird durch die Anzahl der Meßpunkte dividiert, die in der Summe enthalten sind und stellt die mittlere Spannung am A-D-

Wandler dar bei der Messung des Referenzglases, bezogen auf dessen Dosis. Die Intensität des Anregungslichtes und die Verstärkung im RPL-Lichtmeßzweig sind dabei konstant.

10.6 MESSUNG UND AUSWERTUNG DER RPL-INTENSITÄTSPROFILE

Mit Hilfe des Rechnerprogrammes RPL MESSEN, AUSWERTEN werden RPL-Dosimeter routinemäßig gemessen und ausgewertet.

Dazu gehören die Steuerung zur automatischen Aufnahme der drei RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases, ihre graphische Ausgabe durch den Plotter, die Korrektur durch Referenzprofile, die Bestimmung von Einfallrichtung, Strahlenqualität, RPL-Summe und Dosis für einen Glasbereich von 0,4 mm bis 7,6 mm, sowie die Speicherung der Daten auf Magnetband. Weiterhin werden Angaben gemacht über den bei der Bestimmung dieser Parameter zu erwartenden Fehler. Dieses Programm zum Betrieb des Auswertegeräts wird von Hand gestartet und arbeitet dann vollkommen selbsttätig, lediglich der Wechsel der Dosimeter erfolgt manuell. Eine automatische Zuführung ist aber geplant.

Die Messung und Auswertung der Dosimeter erfolgt in den folgenden Schritten:

10.6.1 AUFNAHME DER RPL-INTENSITÄTSPROFILE

Zunächst werden die drei Intensitätsprofile mit je 41 Meßpunkten auf 8 mm Glastiefe gemessen. Dazu wird das UV-Lichtbündel mit Hilfe des Unterprogrammes SCANNER in Schritten von 0,2 mm über das Glas bewegt. Bei stillstehendem Bündel wird dann die RPL-Intensität des angeregten Glasteilvolumens ($0,2 \times 6 \times 8 \text{ mm}^3$) mit Hilfe der Unterprogramme SIGNAL und SIGNAL A aufgenommen. Durch eine rechnergesteuerte, automatische Regelung des Verstärkungsfaktors im Lichtmeßzweig über vier Dekaden wird gewährleistet, daß das gemessene Signal stets im günstigsten Arbeitsbereich des A-D-Wandlers liegt. Die RPL-Intensität in jedem Meßpunkt wird bei der größtmöglichen Verstärkung hundertmal, sonst zehnmals gemessen und anschließend gemittelt. Dadurch kann der Einfluß von niederfrequentem Rauschen des PM um den Faktor 10, bzw. 3,3 im Vergleich zu einer einmaligen Messung verringert werden.

10.6.2 KORREKTUR DURCH REFERENZPROFILE UND AUSGABE DER RPL-INTENSITÄTSPROFILE

Aus Steigung und Offset dreier Referenzprofile, eingelesen aus dem Referenzdatenfile auf Magnetband, wird für jeden Punkt der eben gemessenen Intensitätsprofile ein Korrekturfaktor berechnet (Abb. 10.6). Die anschließende Division der Meßwerte durch ihren individuellen Korrekturfaktor berichtigt die durch optische Unsymmetrien verursachte Steigung der gemessenen RPL-Intensi-

tätsprofile. Für jedes Dosimeterglas wurden vor der Bestrahlung die individuellen Vordosisprofile aufgenommen und gespeichert (siehe Kap. 8.2). Sie werden vom Magnetband eingelesen und kanalweise von den gemessenen RPL-Intensitätsprofilen subtrahiert.

Durch das Unterprogramm PLOT werden die drei gemessenen Profile auf dem Plotter normiert ausgegeben, so daß die maximale Ordinate 10 cm und die maximale Glastiefe von 8 mm einer Abszisse von 16 cm entspricht (Kap. 11).

10.6.3 BERECHNEN UND AUSGEBEN DER STRAHLENEINFALLS- RICHTUNG

Um aus den RPL-Intensitätsprofilen mit dem gleichem Algorithmus bei beliebiger Lage die Haupteinfallrichtung bestimmen zu können, werden die Profile zuerst auf einen Abfall der RPL-Intensität mit zunehmender Glastiefe überprüft. Ist ihre Steigung positiv, so wird das Profil gedreht. Dadurch erhält man die prinzipielle Aussage, ob der Einfall der ionisierenden Strahlung von vorn oder hinten, unten oder oben, rechts oder links erfolgte, das heißt das Rechenprogramm trifft eine Auswahl von dreien aus sechs möglichen Richtungen. Zur genaueren Beschreibung der Einfallrichtung wurde in Kap. 3.2 die Angabe der drei Winkel des Hauptstrahles mit den drei Koordinatenachsen des Glaswürfels verwendet. Dazu mußten die Koordinaten des Hauptaustrittspunktes ermittelt werden, was sich im praktischen Gebrauch des Auswertegeräts wegen Unregelmäßigkeiten der gemessenen Profile, die durch Oberflächenstörungen der Dosimetergläser ver-

ursacht werden, als unzweckmäßig erwiesen hat.

Zur Bestimmung der Einfallsrichtung wurde deshalb ein gegenüber Störungen unempfindlicheres Verfahren entwickelt. Für jedes Profil wird eine mittlere Steigung berechnet, welche sich als Quotient der Summen der relativen RPL-Intensität zwischen 0,4 mm und 3 mm und 5 mm bis 7 mm ergibt. Die jeweilige mittlere Steigung für jede Abtastrichtung wird auf das arithmetische Mittel der drei Steigungen bezogen. So erhält man eine Aussage, aus welcher der drei noch verbleibenden Richtungen der Einfall der ionisierenden Strahlung hauptsächlich erfolgte. Die Ausgabe der Haupteinfallsrichtung geschieht dann zum Beispiel in der folgenden Form:

Strahleneinfall	links:	12 %
von:	oben :	22 %
	vorn :	66 %

10.6.4 BERECHNEN UND AUSGEBEN DER STRAHLENQUALITÄT

In Kap. 4.2 wurde gezeigt, daß die Summenprofile der drei RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases nur in geringem Maße abhängig sind von der Einfallsrichtung, in eindeutiger Weise aber von der Abfallkonstanten S und damit von der effektiven Energie der Photonenstrahlung.

Abb. 10.7 zeigt die Summenprofile einiger Dosimetergläser, die mit hartgefilterter Röntgenstrahlung verschiedener Energien (Tab. 10.1) in Richtung einer Raumdiagonalen des Dosimeterglaswürfels bestrahlt worden waren.

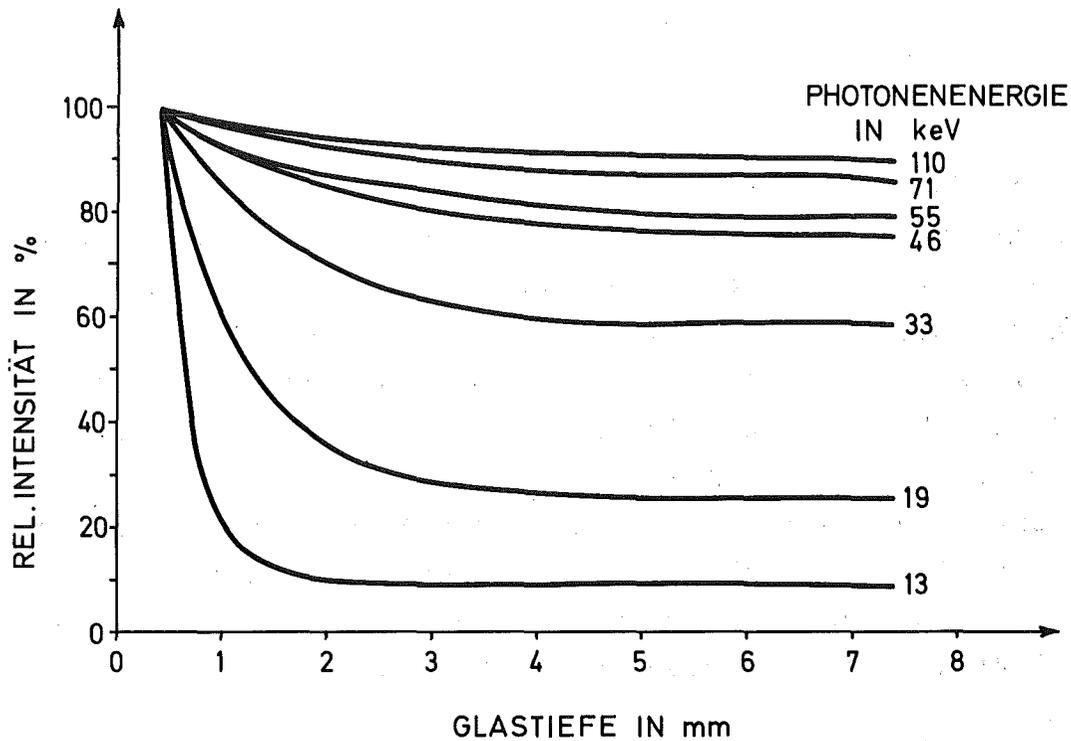


Abb. 10.7 GEMESSENE SUMMENPROFILE BEI BESTRAHLUNG MIT VERSCHIEDENEN ENERGIEN

Anzeige der Hochspannung in keV	Zusatzfilterung in mm	Eff. Energie in keV
17,5	1 Al	13
27,5	2,5 Al	19
40	2 Al + 0,35 Cu	33
70	2 Al + 0,4 Cu	46
80	2 Al + 0,7 Cu	55
100	2 Al + 2 Cu	71
150	2 Al + 7 Cu	110
¹³⁷ Cäsium		662

Tab. 10.1 ZUSATZFILTERUNGEN BEIM KALIBRIEREN DES AUSWERTEGERÄTES MIT RÖNTGENBREMSSTRAHLUNG UND PHOTONEN HOHER ENERGIE (EIGENFILTERUNG: 2 mm Al)

Auch das Verhältnis verschiedener Flächen unter dem RPL-Summenprofil ist geeignet zur Bestimmung der Strahlenqualität. So wurde aus den Summenprofilen in Abb. 10.7 der Quotient MS der mittleren RPL-Intensität in den Bereichen 0,4 mm bis 3 mm und 5 mm bis 7 mm ermittelt (Abb. 10.8), bezogen auf die Anzahl der Meßpunkte in diesen Bereichen. Die eingezeichnete Streubreite umfaßt einen Strahleneinfall in Richtung der x-Achse und in Richtung einer Raumdiagonalen des würfelförmigen Dosimeterglases. Dieser Zusammenhang wird zur Ermittlung der Strahlenqualität in dem Auswertprogramm benutzt.

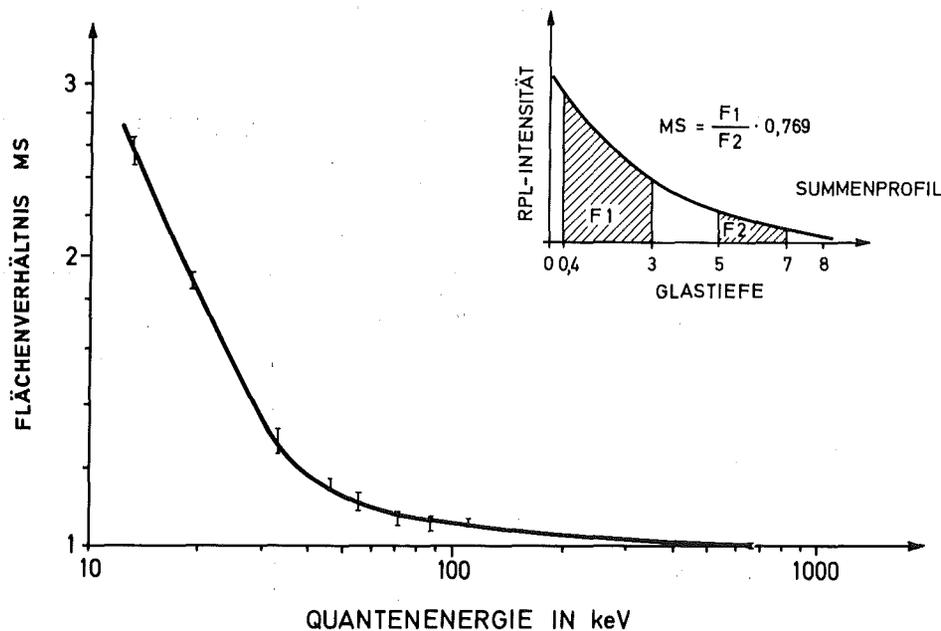


Abb. 10.8 FLÄCHENVERHÄLTNIS DES SUMMENPROFILS BEI VERSCHIEDENEN ENERGIEN UND EINFALLSRICHTUNGEN

Im Energiebereich zwischen 13 keV und 250 keV kann er durch die Funktion

$$MS = K_1 + \frac{K_2}{E^2}$$

$$K_1 = 1,03895$$

$$K_2 = 265,575$$

angenähert werden. Dabei ist MS der Quotient der gewichteten Flächen F_1 und F_2 , E die Photonenenergie in keV, K_1 und K_2 sind nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung bestimmte Konstanten.

Im Energiebereich über 250 keV wird zur Approximation ein Geradenstück benutzt. In manchen Anwendungsfällen ist die Richtung der ionisierenden Strahlung bereits bekannt und lediglich die Strahlenqualität und die Dosis sind zu ermitteln. Dann ist es günstig, das würfelförmige Dosimeterglas bei der Bestrahlung derart anzuordnen, daß eine Kante parallel zur Strahleneinfallrichtung liegt. In diesem Fall benutzt man eine vereinfachte Form des Auswerteprogrammes, welche zur Bestimmung der Strahlenqualität nur das Flächenverhältnis MS_x des RPL-Intensitätsprofils in Richtung des Strahleneinfalls verwendet (Abb. 10.9).

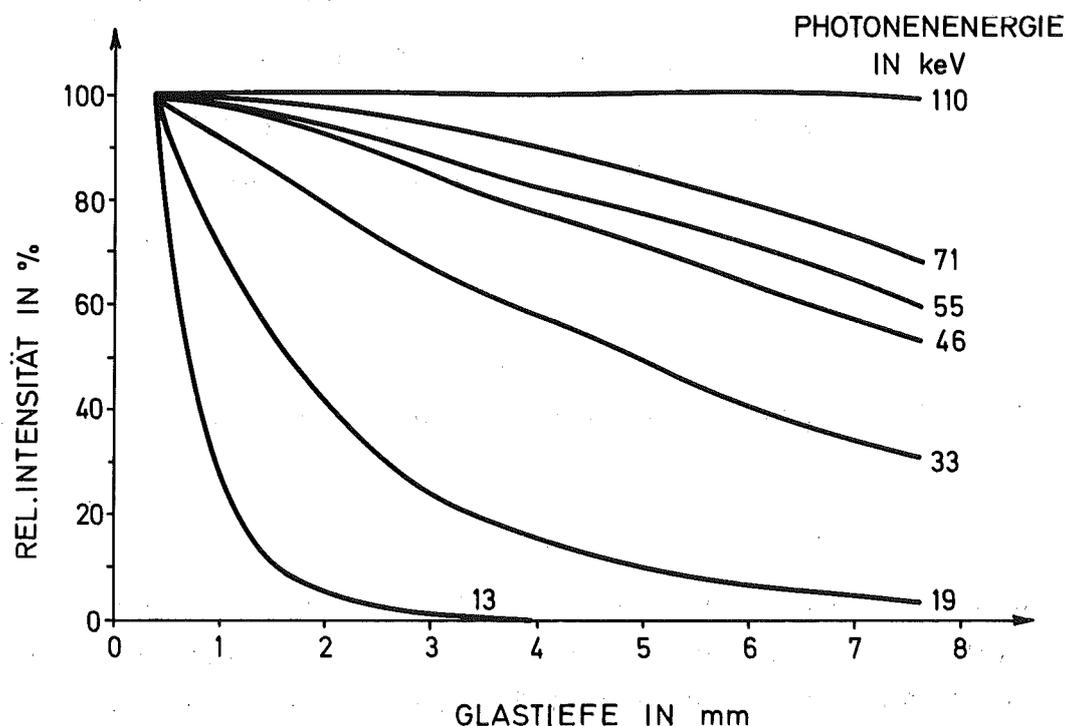


Abb. 10.9 RPL-INTENSITÄTSPROFILE IN RICHTUNG DES STRAHLENEINFALLS BEI VERSCHIEDENEN ENERGIEN

Dann ist die Streubreite für den Quotient der Flächen F_1 und F_2 geringer und damit die Bestimmung der Strahlenqualität noch genauer (Abb. 10.10).

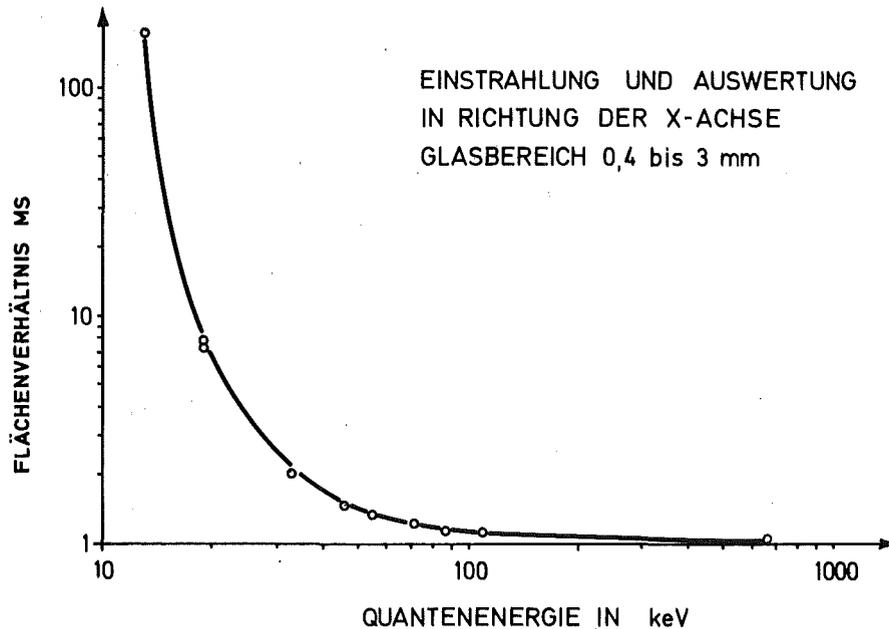


Abb. 10.10 FLÄCHENVERHÄLTNIS DES RPL-INTENSITÄTSPROFILS
IN RICHTUNG DES STRAHLENEINFALLS

10.6.5 BERECHNEN DER DOSIS AUS DER SUMME DER RPL-INTENSITÄTEN

Das Flächenintegral über die RPL-Intensitätsprofile in Richtung der x-Achse und der y-Achse in einem Glasbereich zwischen 0,4 mm und 7,6 mm, bezogen auf die Anzahl der Meßpunkte in diesem Bereich, wird als RPL-Summe bezeichnet. Es entspricht dem Meßwert eines herkömmlichen RPL-Dosimeterauswertegeräts. Durch Multiplikation mit dem Gerätefaktor F_G wird die RPL-Summe bezogen auf die

mittlere RPL-Summe eines Dosimeterglases, das mit Photonen von 662 keV bestrahlt worden ist (Kap. 10.5).

Zur Berechnung der Standardionendosis D aus der RPL-Summe muß, wie in Kap. 2.5 erläutert, noch der Faktor der relativen Dosisempfindlichkeit $R_D(E)$ als Funktion der ermittelten Energie berücksichtigt werden.

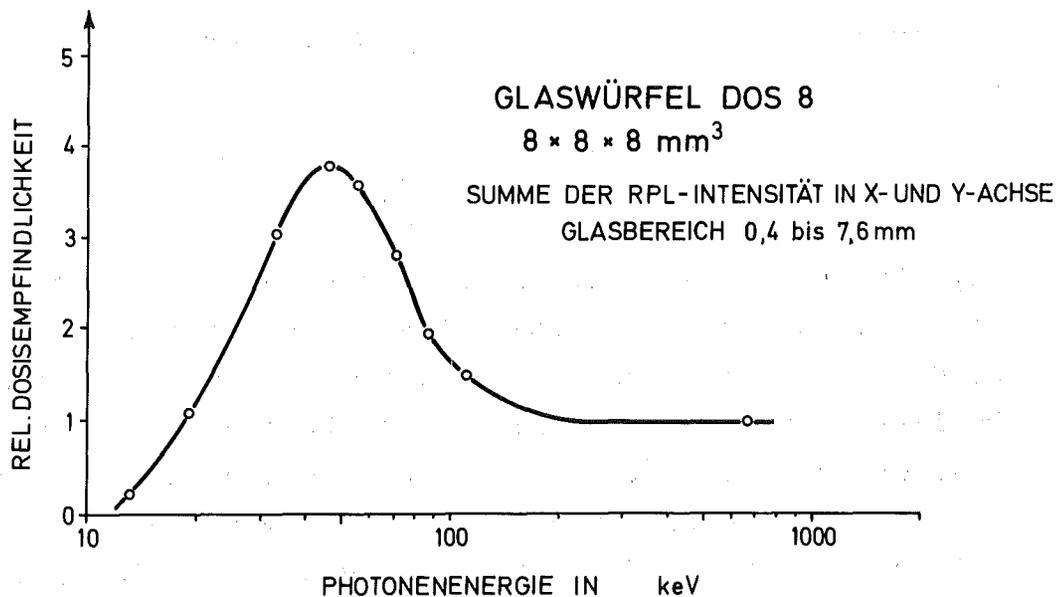


Abb. 10.11 RELATIVE DOSISEMPFINDLICHKEIT IN EINEM GLASBEREICH ZWISCHEN 0,4 mm UND 7,6 mm

Abb. 10.11 zeigt diesen Korrekturfaktor als Funktion der Photonenergie, wie er durch die Auswertung von Dosimetergläsern bestimmt wurde, die mit konstanter Dosis mit den in Tab. 10.1 aufgeführten Strahlenqualitäten bestrahlt worden waren.

Diese Funktion ist nicht mit genügender Genauigkeit durch eine einfache geschlossene mathematische Funktion darstellbar. Zur Handhabung im Rechner wird sie deshalb im Energiebereich zwischen 13 keV und 33 keV durch ein Polynom zweiten Grades der Form

$$R_D(E) = K_3 + K_4 \cdot E + K_5 \cdot E^2 \quad (10.4)$$

im Energiebereich zwischen 33 keV und 71 keV durch das Polynom

$$R_D(E) = K_6 + K_7 \cdot E + K_8 \cdot E^2 + K_9 \cdot E^3 \quad (10.5)$$

und im Bereich zwischen 71 und 250 keV durch die Funktion

$$R_D(E) = \frac{1}{K_{10} + \frac{K_{11}}{E}} \quad (10.6)$$

angenähert. Die Koeffizienten wurden nach der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung bestimmt.

Wurde vom Rechner aus den RPL-Intensitätsprofilen eines Dosimeterglases die Energie E_R der Bestrahlung eines Dosimeters ermittelt, so berechnet er den zugehörigen Energiekorrekturfaktor zur Dosisbestimmung nach der aufgeführten Funktion des entsprechenden Energieintervalls.

10.6.6 BESTIMMEN DER MESSFEHLER

Die Messung der Summen der RPL-Intensität in verschiedenen Glasbereichen, welche die Grundlage ist für die Bestimmung von Strahleneinfallrichtung, Strahlenqualität und Dosis, ist mit statistischen Meßfehlern behaftet. Für mehrere Gläser, die mit verschiedenen Dosen energiereicher Photonen bestrahlt worden waren, (662 keV) wurden die Standardabweichungen der Meßwerte als Maß für den statistischen Fehler ermittelt. (Abb. 10.2)

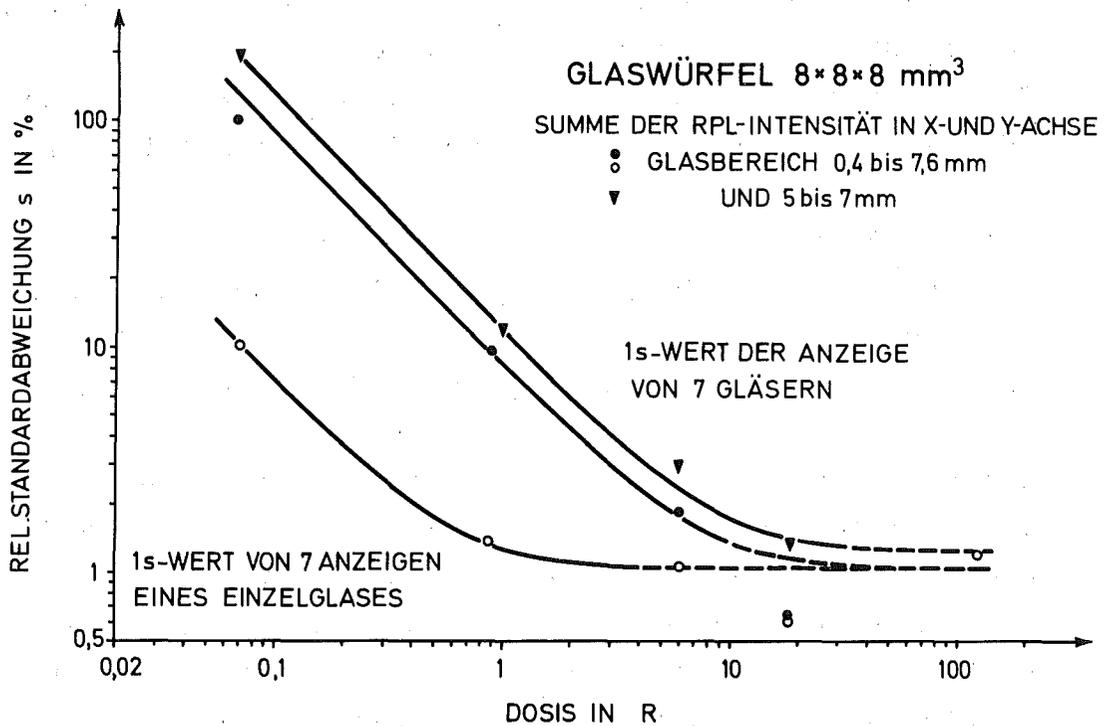


Abb. 10.12 STANDARDABWEICHUNGEN DER MESSWERTE VERSCHIEDENER DOSIMETERGLÄSER GLEICHER DOSIS UND BEI MEHRFACHER MESSUNG DES GLEICHEN GLASES ALS FUNKTION DER DOSIS

Die individuellen Vordosisprofile jedes Glases wurden vor der Bestrahlung bestimmt und später von den RPL-Intensitätsprofilen subtrahiert. Die gemessene Vordosis entspricht etwa 1,8 R und ist damit groß gegenüber der Vordosis von 0,2 R bei einem konventionellen Auswertegerät. Dies dürfte zum Teil darin begründet sein, daß die Kanten des Dosimeterglases bei der verwendeten optischen Anordnung gegenüber dem Anregungslicht und dem Photomultiplier nicht abgedeckt sind, so daß Streulicht in den PM gelangen kann. Ein wesentlicher Einfluß ist aber in der unbefriedigenden optischen Qualität der verwendeten Dosimetergläser zu sehen. Schlieren, Einschlüs-

se im Glaskörper, Kratzer und kraterförmige Vertiefungen in den Oberflächen streuen das Anregungslicht in den PM. Sie führen zu sehr unterschiedlich großen Vordosen und beeinträchtigen die Form der RPL-Intensitätsprofile.

Abb. 10.2 ist zu entnehmen, daß mit steigender Dosis die Standardabweichung abnimmt. Bei der Messung eines Einzelglases erhält man für Dosen größer als 1 R eine konstante Standardabweichung von 1 %. Sie wird vom Auswertegerät bestimmt und ist vermutlich die Folge von Kurzzeitschwankungen der Intensität des Anregungslichtes. Diese liegen in der Größenordnung von ± 1 % (Kap. 6.2) und gehen als Faktor direkt in den Meßwert ein. Bei der mehrfachen Messung desselben Glases wird stets dasselbe Vordosisprofil subtrahiert. Es hat deshalb keinen Einfluß auf die Streuung der einzelnen Meßwerte. Bei der Auswertung verschiedener Gläser haben Änderungen der individuellen Vordosisprofile, welche zwischen der Aufnahme der Vordosisprofile und der Dosisprofile zu erwarten sind, erheblichen Einfluß auf den statistischen Meßfehler, insbesondere bei kleinen Dosen.

Neben den statistischen Fehlern treten bei der Ermittlung der Einfallrichtung, der Strahlenqualität und der Dosis systematische Fehler auf. Sie sind begründet in der Streubreite der zur Bestimmung der Strahlenqualität erforderlichen Funktion $E = f(MS)$ bei verschiedenen Einfallrichtungen (Abb. 10.8, 10.10).

Diese Fehlereinflüsse haben einen systematischen Fehler zur Folge bei der Ermittlung des zu den vorliegenden Bestrahlungsparametern zugehörigen Faktors der relativen Dosisempfindlichkeit, welcher bei der Bestimmung der Dosis zugrunde gelegt werden muß. (Abb. 10.11)

Deshalb ist es sinnvoll, im letzten Teil des Auswerteprogrammes die zu erwartenden Standardabweichungen für die Summen der RPL-Intensitäten in den verschiedenen

Glasbereichen zu berechnen und nach den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung die resultierenden Gesamtfehler bei der Ermittlung der Strahlenqualität und der Dosis auszugeben.

11. AUSWERTUNG VON DOSIMETERGLÄSERN BEI VERSCHIEDENEN STRAHLENQUALITÄTEN UND EINFALLSRICHTUNGEN

In dem folgenden Kapitel werden anhand einer Gegenüberstellung der Parameter bei der Bestrahlung verschiedener Dosimetergläser mit den bei der Auswertung dieser Gläser bestimmten Parametern die Möglichkeiten des beschriebenen Auswertegerätes dargestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen mit dem beschriebenen Auswertegerät gemessene RPL-Intensitätsprofile von Dosimetergläsern, die mit hart gefilterter Röntgenbremsstrahlung entsprechend Tab. 10. 1 bestrahlt worden waren. Die Dosis betrug jeweils etwa 20 R, die Strahlenqualität und die Strahleneinfallsrichtung sind aufgeführt. Die Angabe der Einfallsrichtung erfolgt in dem im Auswertegerät verwendeten Koordinatensystem und aus der Sicht eines potentiellen Trägers des Dosimeters.

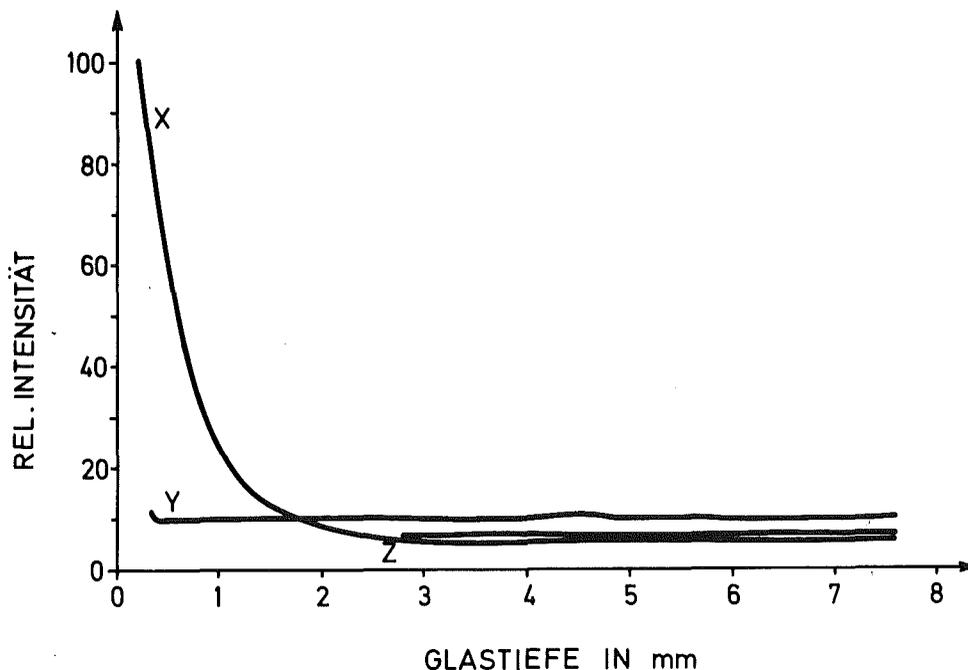


Abb. 11.1 STRAHLENQUALITÄT: 13 keV
EINFALLSRICHTUNG: x-ACHSE (VON LINKS)

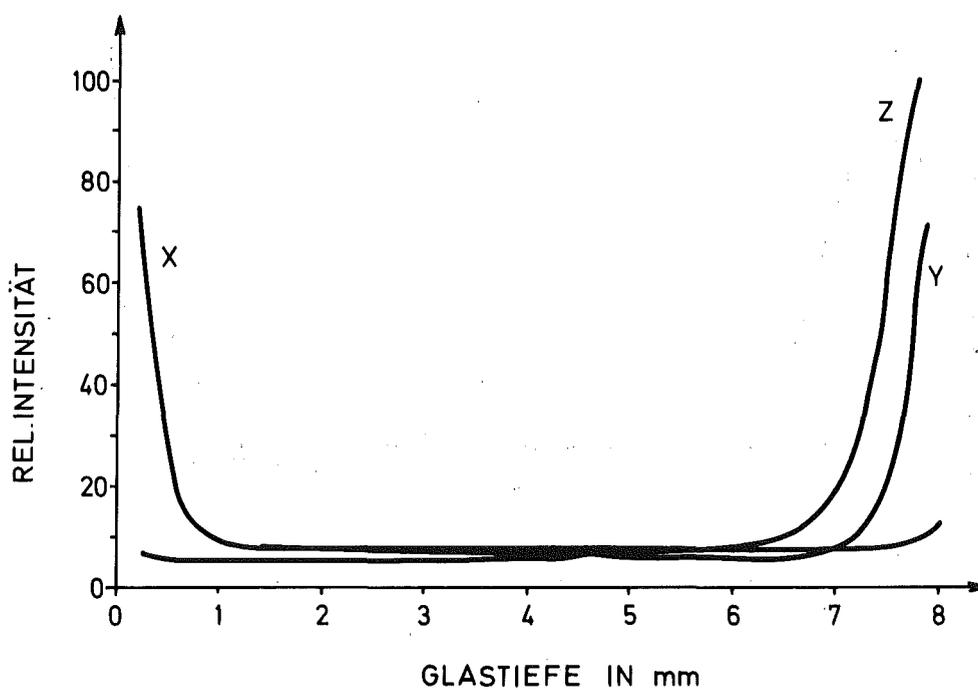


Abb. 11.2 STRAHLENQUALITÄT: 13 keV
EINFALLSRICHTUNG: RAUMDIAGONALE (VON
LINKS, VORN, OBEN)

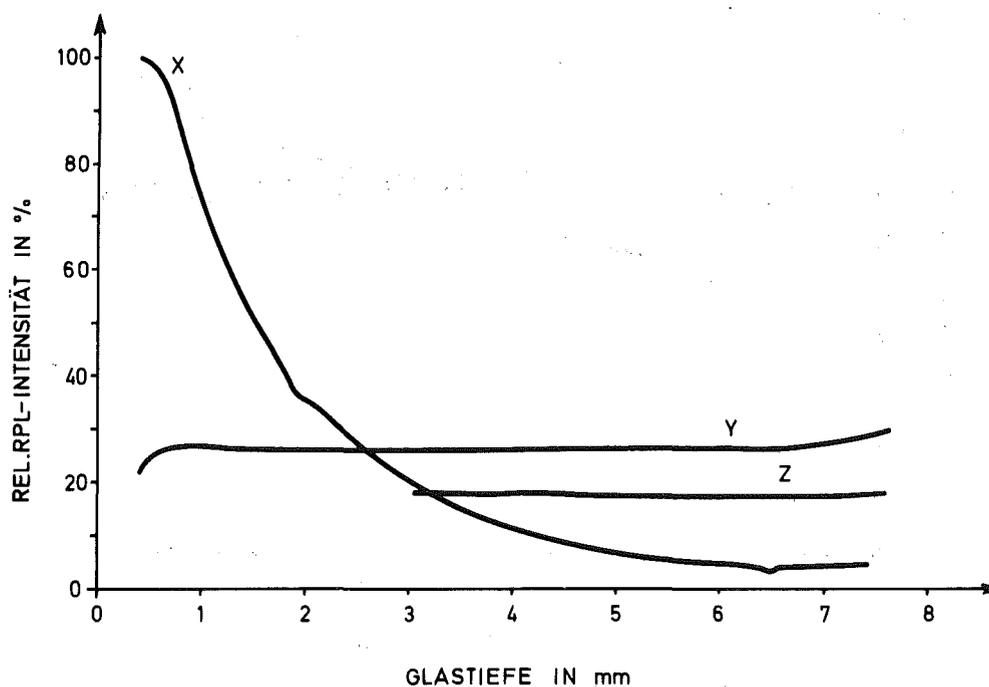


Abb. 11.3 STRAHLENQUALITÄT: 19 keV
EINFALLSRICHTUNG: x-ACHSE (VON LINKS)

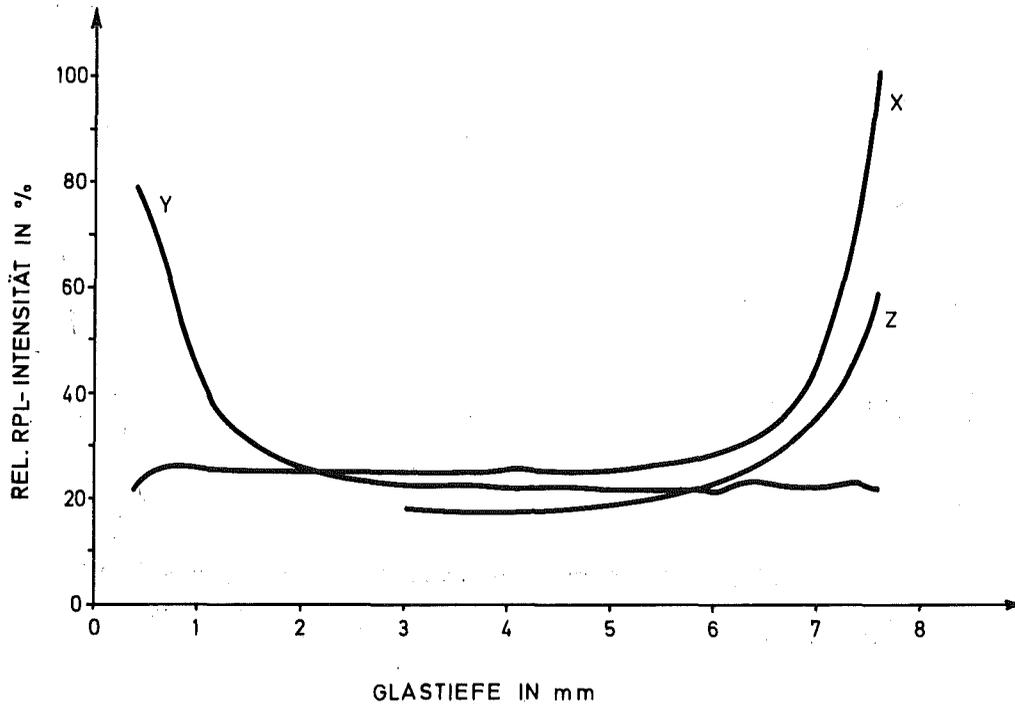


Abb. 11.4 STRAHLENQUALITÄT: 19 keV
EINFALLSRICHTUNG: RAUMDIAGONALE (VON RECHTS, VORN, UNTEN)

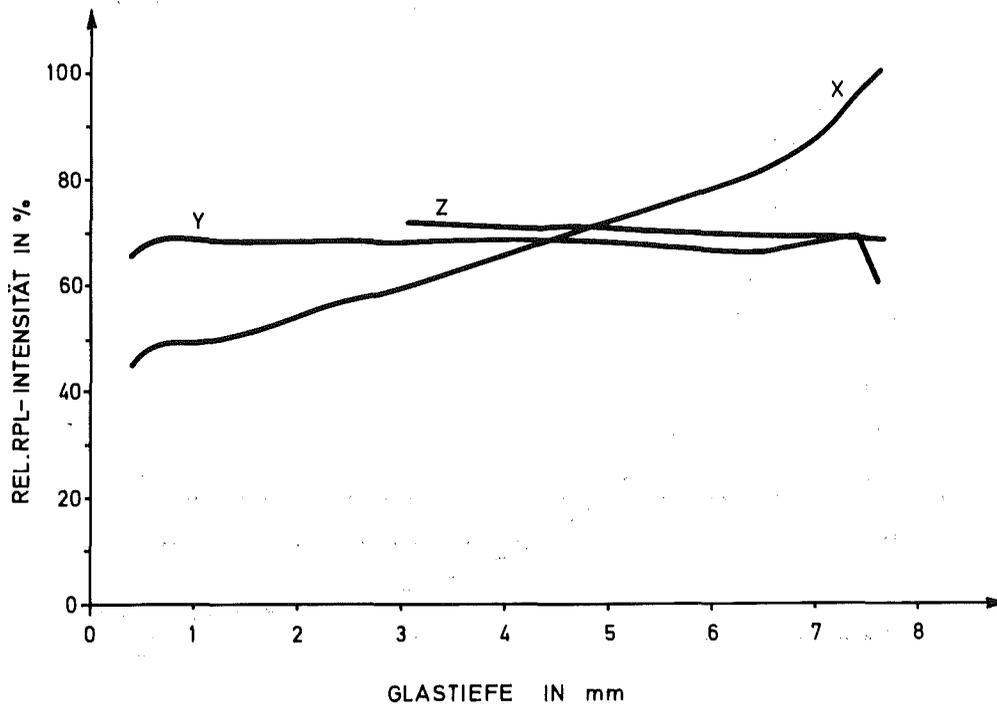


Abb. 11.5 STRAHLENQUALITÄT: 46 keV
EINFALLSRICHTUNG: NEG. x-ACHSE
(VON RECHTS)

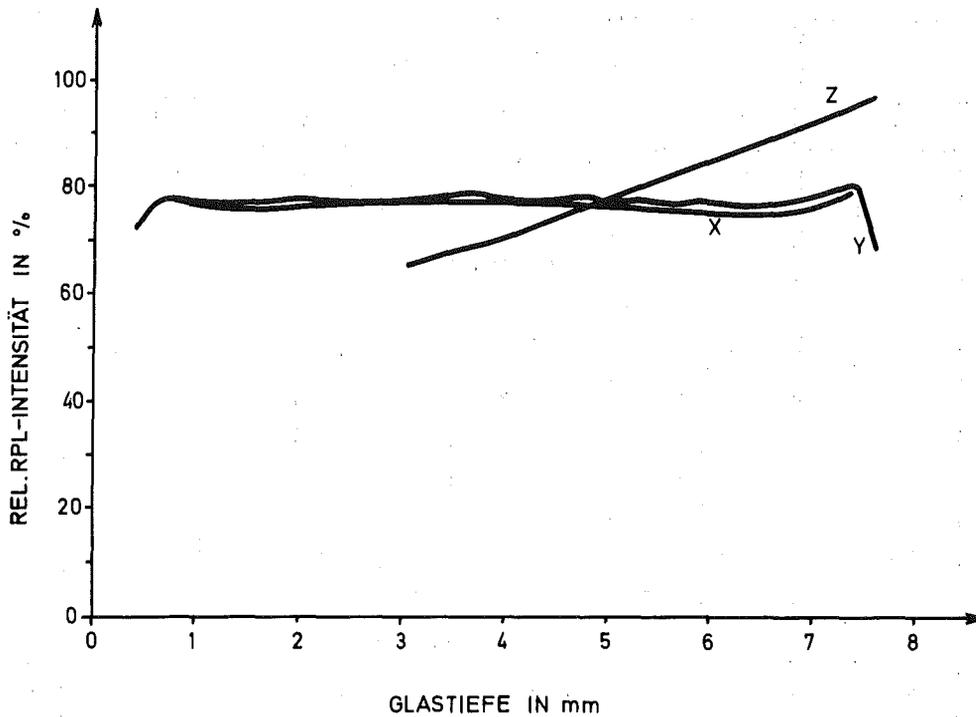


Abb. 11.6 STRAHLENQUALITÄT: 46 keV
EINFALLSRICHTUNG: NEG. z-ACHSE
(VON VORN)

Das in Kap. 10.6 beschriebene Auswerteprogramm wurde auf Kalibrierbestrahlungen im Energiebereich von 13 keV bis 660 keV angewandt. Die damit bestimmten Meßwerte sind in Tab. 11.1 den bei den Bestrahlungen vorliegenden Parametern gegenübergestellt.

Im Bereich zwischen 13 keV und 46 keV weicht die ermittelte effektive Energie um höchstens 8 % von der tatsächlichen Energie bei der Bestrahlung der Dosimeter ab, zwischen 55 keV und 110 keV erreicht dieser Fehler eine Größe von maximal 17 %. Bei noch höheren Energien ist keine Differenzierung der Energie mehr möglich, zum einen, weil aufgrund der unzureichenden optischen Qualität der verwendeten Dosimetergläser die geringe Abnahme der RPL-Intensität mit zunehmender Glastiefe überdeckt wird, zum anderen, weil sich die RPL-Intensitätsprofile bei Bestrahlung mit hohen Energien auch bei ide-

E _{eff} in keV best. gem.		Einfallrichtung ¹⁾						Dosis in R		D/D ₀
		best.			gem.			best.	gem.	
		l	o	v	l	o	v	D ₀	D	
13	12,9	100			100			19	19,4	1,02
13	13,05	100			100			19	20,8	1,09
13	13,7	33	33	33	23	24	53	19	11,5	0,61
19	17,6	100			89			19	24,6	1,29
19	17,8	100			89			19	22,6	1,19
19	17,6	100			89			19	23,6	1,24
19	17,8	33	33	33	28	29	43	19	22,9	1,20
19	18,0	33	33	33	21	20	59	19	22,9	1,20
19	18,1	33	33	33	28	31	35	19	19,5	1,03
33	35,3	100			51			21	15,8	0,75
33	30,8	33	33	33	33	32	35	21	20,2	0,96
46	46	100			46			20	19,7	0,99
46	43,9	33	33	33	33	32	35	20	20,6	1,03
55	48,6	100			39			20	15,6	0,78
55	50,4	33	33	33	33	33	34	20	16,9	0,85
71	58,7	100			keine Aus-			20	14	0,70
71	71,9	33	33	33	sage mög-			20	17,4	0,87
87	65	100			lich "			20	12,2	0,61
87	76,9	33	33	33	" "			20	14,8	0,74
110	92	100			" "			20	15,8	0,79
110	102	33	33	33	" "			20	17,8	0,89
662	253	homogen ²⁾			" "			18	18,2	1,01
662	232	"			" "			18	18,1	1,01
662	163	"			" "			18	17,8	0,99
662	232	"			" "			18	18,0	1,00
662	251	"			" "			18	18,0	1,0

1) l: von links, o: von oben, v: von vorn

2) je 1/3 von links, oben, vorn

Tab. 11.1 ERMITTELTE EFFEKTIVE ENERGIE, STRAHLENEINFALLS-
RICHTUNG UND DOSIS BEI DER AUSWERTUNG VERSCHIE-
DENER DOSIMETERGLÄSER

alen Bedingungen nur noch wenig unterscheiden. Deshalb meldet das Auswertegerät bei Energien über 110 keV: "ENERGIE > 110 keV". Da sich zwischen 110 keV und 662 keV die relative Dosisempfindlichkeit des Dosimeterglases zwischen 1,5 und 1 ändert, kann dies einen beträchtlichen Fehler bei der Bestimmung der Dosis zur Folge haben.

Bei den Bestrahlungen der Dosimetergläser in Tab. 11.1 erfolgte der Strahleneinfall entweder in Richtung der x-Achse, d.h. von links (l) aus der Sicht eines Trägers des Dosimeters oder in der Richtung einer Raumdiagonalen des Dosimeterwürfels, von links (l), oben (o) und vorn (v).

Eine Aussage über die Strahleneinfallrichtung kann das Auswerteprogramm aus den gemessenen RPL-Intensitätsprofilen im Energiebereich zwischen 13 keV und 55 keV machen. Bei höheren Energien ist aufgrund der vorhandenen Glasqualität eine Erkennung der Einfallrichtung offensichtlich nicht mehr möglich.

Bei der Bestimmung der Dosis wirken sich statistische Fehler aus, die bei der Ermittlung der Summe der RPL-Intensität in verschiedenen Glasbereichen auftreten (Kap. 10.6), aber auch Fehler bei der Ermittlung der Strahlenqualität und der relativen Dosisempfindlichkeit.

Im untersuchten Energiebereich zwischen 13 keV und 662 keV weicht die ermittelte Standardionendosis um höchstens +30 % und -40 % vom wahren Wert ab. Ohne Korrektur der Energieabhängigkeit des Dosimeterglases wäre in diesem Energiebereich mit einer Überbewertung um den Faktor 4 und einer Unterbewertung um den Faktor 5 zu rechnen.

12. ZUSAMMENFASSUNG

Die Intensität der Radiophotolumineszenz (RPL) von Phosphatgläsern, die zur Dosimetrie ionisierender Strahlung benutzt werden, ist abhängig von der Energie der Strahlung. Bei herkömmlichen RPL-Dosimetersystemen erhält man durch Abdecken des Dosimeterglases während der Bestrahlung mit perforierten Filtern eine energieunabhängige Dosisanzeige für Photonenenergien oberhalb 40 keV. Die Dosis von Photonenstrahlung geringerer Energie wird unterbewertet.

Bei der differentiellen Auswertemethode wird die Abnahme der Dosis ionisierender Strahlung in einem nicht abgedeckten Dosimeterglas in Richtung des Strahleneinfalls benutzt, um die Qualität der Strahlung zu bestimmen. Bei Kenntnis der Strahlenqualität kann die Standardionendosis damit auch für Photonenenergien unter 40 keV mit Hilfe eines Korrekturfaktors und der Dosimeteranzeige berechnet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Aufgabe gelöst, mit Hilfe der differentiellen Auswertemethode die Standardionendosis für einen Strahleneinfall aus beliebiger, unbekannter Richtung zu bestimmen und zusätzliche Aussagen über die Bestrahlungsumstände, wie Strahleneinfallsrichtung und Strahlenqualität, zu gewinnen. Hierzu wurde ein automatisches, rechnergesteuertes RPL-Dosimeterauswertegerät entwickelt, welches nach dem Prinzip der differentiellen Auswertung arbeitet und im Energiebereich zwischen 13 keV und 1,2 MeV zur Bestimmung der Standardionendosis sowie zur Ausgabe der Bestrahlungsverhältnisse eingesetzt werden kann.

Das automatische Auswertegerät zur differentiellen Abtastung von Phosphatglasdosimetern wurde mit Photonen verschiedener Energien im Bereich zwischen 13 keV und 662 keV und mit verschiedenen Strahleneinfallsrichtungen kalibriert.

Dieses neuentwickelte Auswertegerät kann besonders in der Personen- und Unfalldosimetrie Anwendung finden, wo es bei unvorhergesehenen hohen Bestrahlungsdosen von besonderem Interesse ist, nähere Aussagen über die Bestrahlungsumstände sowie über die Strahlenqualität zu erhalten. Hier ermöglicht das beschriebene Auswertegerät einen Einsatz von Glasdosimetern auch im Energiebereich zwischen 13 keV und 40 keV.

Besondere Vorteile bietet die differentielle Auswertung bei der Ausmessung von unbekanntem Strahlungsfeldern, sowohl im Energiebereich unter 40 keV, als auch für hochenergetische Photonen im Energiebereich bis zu 10 MeV.

Die wesentlichen neuen Erkenntnisse und die wichtigen Eigenschaften dieses Auswertegerätes sind:

- Die Abtastung von drei RPL-Intensitätsprofilen erfolgt mit Hilfe einer optischen Anordnung in drei zueinander senkrechten Koordinatenachsen, ohne das Dosimeterglas zu bewegen. Dadurch wird der automatische Betrieb des Gerätes wesentlich vereinfacht.
- Eine neuentwickelte Glashalterung, bei der das Dosimeterglas weitgehend frei steht, ist Voraussetzung für das verwendete Verfahren. Sie ermöglicht eine reproduzierbare Positionierung und Abtastung des Dosimeterglases im Auswertegerät.
- Die Summe der drei RPL-Intensitätsprofile ist weitgehend unabhängig von der Strahleneinfallrichtung. Die Bestimmung der Strahlenqualität bei beliebiger Strahleneinfallrichtung erfolgt aus dem Abfall dieses Sum-

menprofils mit zunehmender Glastiefe bzw. aus dem Verhältnis der mittleren RPL-Intensität in vorgegebenen Bereichen des Summenprofils.

- Der Gesamtfehler für die Bestimmung der Dosis im Photonenenergiebereich zwischen 13 keV und 660 keV liegt bei +30 % und -40 % unter Zugrundelegen der beschriebenen Auswertemethode und der verwendeten Charge von Dosimetergläsern.
- Eine Bestimmung der Strahlenqualität ist mit den verwendeten Dosimetergläsern im interessierenden Photonenenergiebereich von 13 keV bis 110 keV möglich.
- Eine Bestimmung der Strahleneinfallrichtung ist mit den hier verwendeten Dosimetergläsern im Energiebereich zwischen 13 keV und 55 keV möglich.
- Die Reproduzierbarkeit der Dosismessungen ist bei kleinen Dosen vom Betrag der Dosis abhängig. Bei Photonenstrahlung von 662 keV erhält man im Dosisbereich oberhalb 1 R eine Standardabweichung der Dosisanzeige von 1 % bei wiederholter Ausmessung eines Glases. Dies ist hauptsächlich auf Kurzzeitschwankungen der Intensität des Anregungslichtes zurückzuführen.
- Die Reproduzierbarkeit bei der Dosismessung innerhalb einer Glascharge ist etwa zehnmal schlechter als bei der Messung eines Einzelglases. Dies ist hauptsächlich auf die Unsicherheit bei der Bestimmung der individuellen Vordosisprofile bei den hier verwendeten Dosimetergläsern, aber auch auf die Höhe und Streuung des Vordosismeßwertes von 1,8 R zurückzuführen.
- Eine bessere optische Qualität der Dosimetergläser läßt insgesamt bessere Meßergebnisse im Hinblick auf eine geringere und gleichmäßigere Vordosis, eine bessere Reproduzierbarkeit der Dosisanzeige und eine Bestimmung der Strahleneinfallrichtung auch oberhalb 55 keV erwarten. Zu einer Verringerung der Vordosis können vermutlich auch Verbesserungen in der optischen

Anordnung im Auswertegerät beitragen.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1. 1: Spektren der Anregungs- und Emissionsbanden von PL und RPL bei Phosphatgläsern
- Abb. 1. 2: Energieabhängigkeit der Dosisanzeige verschiedener Dosimetergläser
- Abb. 1. 3: Einfaches Bändermodell der RPL in Phosphatgläsern
- Abb. 1. 4: Prinzipieller Aufbau eines RPL-Auswertegerätes
- Abb. 2. 1: Einfluß von Ordnungszahl und Photonenenergie auf die Wahrscheinlichkeit von Photo-, Compton-effekt und Paarbildung
- Abb. 2. 2: Massenschwächungskoeffizient μ/ρ und Massenenergieabsorptionskoeffizient η'/ρ von DOS 8
- Abb. 2. 3: Geometrie bei ausgeblendetem Strahl
- Abb. 2. 4: Glastiefe für einen Abfall der RPL-Intensität auf $1/e$
- Abb. 2. 5: Berechnete RPL-Intensitätsprofile bei verschiedenen Energien der zur Bestrahlung verwendeten Photonen
- Abb. 2. 6: Relative Dosisempfindlichkeit des Glases DOS 8
- Abb. 3. 1: Einfall einer parallelen Schar von Photonenstrahlen in das Dosimeterglas
- Abb. 3. 2: Hauptstrahl mit Ebenen E_1, E_2, E_3

- Abb. 3. 3: Teilvolumina im Glaswürfel
- Abb. 4. 1: Verschieben des Meßvolumens beim Scannen
- Abb. 4. 2: RPL-Intensität in verschiedenen Glastiefen als Ergebnis eines Rechenmodells
- Abb. 4. 3: Berechnete RPL-Intensitätsprofile beim Abtasten entlang der x-, y- und z-Achse bei einer Bestrahlung mit 25 keV-Photonen und einer Einfallrichtung mit $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 85^\circ$, $\gamma = 71^\circ$
- Abb. 4. 4: Abtasten entlang der x-Achse
- Abb. 4. 5: Summenprofile bei verschiedenen Einfallrichtungen
- Abb. 4. 6: Zusammenhang zwischen der relativen RPL-Intensität in verschiedenen Glastiefen und der Abfallkonstanten S
- Abb. 4. 7: Abtasten mit Linearbewegung des Glases
- Abb. 4. 8: Abtasten über Lichtleiter
- Abb. 4. 9: Abtasten mit Drehspiegeln
- Abb. 4.10: Optische Kammer zur Messung von RPL-Intensitätsprofilen
- Abb. 4.11: Strahlengang im optischen System
- Abb. 5. 1: Abtasten durch Verschieben eines Spaltes

- Abb. 5. 2: Anordnung zum Messen des Intensitätsverlaufs im UV-Lichtbündel
- Abb. 5. 3: Annäherung des Lichtintensitätsverlaufs durch Polygonzug
- Abb. 5. 4: Ermitteln des Intensitätsverlaufs im Querschnitt des UV-Lichtbündels aus der Spannung der Photodiode
- Abb. 5. 5: Abtasten mit idealem UV-Lichtbündel
- Abb. 5. 6: Abtasten mit realem UV-Lichtbündel
- Abb. 5. 7, 5. 8: Schräger Einfall des UV-Lichtbündels in das Dosimeterglas
- Abb. 5. 9: Effektive Abtastbreite des UV-Lichtbündels
- Abb. 5.10: Angeregtes Glasvolumen
- Abb. 6. 1: Bausteine im Anregungsweig
- Abb. 6. 2, 6. 3: Konstruktive Ausführungen der Glashalterung
- Abb. 6. 4: Spektrum der UV-Lichtquelle und Reintransmission des optischen Filters im Anregungsweig
- Abb. 6. 5: Regelung der Lichtstärke der UV-Lichtquelle
- Abb. 6. 6: Anlaufvorgang der Quecksilberdampfampe
- Abb. 6. 7: Änderung der Lichtstärke der UV-Lichtquelle im betriebswarmen Zustand

- Abb. 6. 8: Messung der Konstanz der Auslenkung des UV-Lichtbündels
- Abb. 6. 9: Justierwürfel zum Abgleich der Position des UV-Lichtbündels
- Abb. 7. 1: Austretender und total reflektierter Strahl
- Abb. 7. 2: Lichtaustrittskegel im Dosimeterglas
- Abb. 7. 3: Austrittskegel schneidet Nachbarfläche
- Abb. 7. 4: Wege des RPL-Lichtes von der Austrittsfläche des Dosimeterglases zum Detektor
- Abb. 7. 5: Relative Austrittswahrscheinlichkeit für das RPL-Licht aus dem Dosimeterglas
- Abb. 7. 6: Profil der Austrittswahrscheinlichkeit für das RPL-Licht aus dem Dosimeterglas und gemessene RPL-Intensitätsprofile
- Abb. 8. 1: Bausteine im RPL-Lichtmeßzweig
- Abb. 8. 2: Spektren und Transmissionskurven im RPL-Lichtmeßzweig
- Abb. 8. 3: Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes des Photomultipliers
- Abb. 8. 4: Zeitliche Änderungen des Dunkelstroms des PM
- Abb. 8. 5: Strom-Spannungswandler

- Abb. 8. 6: Sprungantwort des Lichtmeßzweiges
- Abb. 8. 7: Relative Abweichung des Verstärkungsfaktors im RPL-Lichtmeßzweig
- Abb. 8. 8: Konstanz des Verstärkungsfaktors im RPL-Lichtmeßzweig
- Abb. 8. 9: Konstanz des Verstärkungsfaktors im Lichtmeßzweig einschließlich PM
- Abb. 9. 1: Blockschaltbild des gesamten Auswertegerätes
- Abb. 10. 1: Rechnerprogramme und Datenfluß
- Abb. 10. 2: Schachtelung der Programmbausteine
- Abb. 10. 3: Plotterausgabe beim Abgleich der Position des UV-Lichtbündels
- Abb. 10. 4: Anordnung zum Abgleich der Positionsanzeige
- Abb. 10. 5: Kennlinie: Anzeige "Glastiefe" a als Funktion der Solltiefe s
- Abb. 10. 6: RPL-Intensitätsprofile eines Dosimeterglases nach Bestrahlung mit Photonen einer Energie von 662 keV
- Abb. 10. 7: Gemessene Summenprofile bei Bestrahlung mit verschiedenen Energien
- Abb. 10. 8: Flächenverhältnis des Summenprofils bei verschiedenen Energien und Einfallrichtungen

- Abb. 10. 9: RPL-Intensitätsprofile in Richtung des Strahleneinfalls bei verschiedenen Energien
- Abb. 10.10: Flächenverhältnis des RPL-Intensitätsprofils in Richtung des Strahleneinfalls
- Abb. 10.11: Relative Dosisempfindlichkeit in einem Glasbereich zwischen 0,4 mm und 7,6 mm
- Abb. 10.12: Standardabweichung der Meßwerte verschiedener Dosimetergläser gleicher Dosis und bei mehrfacher Messung des gleichen Glases als Funktion der Dosis
- Abb. 11. 1 bis 11. 6: Gemessene RPL-Intensitätsprofile bei verschiedenen Strahlenqualitäten und Einfallsrichtungen

Verzeichnis der Tabellen

- Tab. 1. 1: Zusammensetzung verschiedener Dosimetergläser
- Tab. 2. 1: Zusammensetzung des Dosimeterglases DOS 8
- Tab. 2. 2: Koeffizienten der Bestandteile des Dosimeterglases DOS 8
- Tab. 4. 1: Flußdiagramm zur Bestimmung der Lage eines

Punktes im Dosimeterglaswürfel

Tab. 8. 1: Berechnung der Verstärkung des Strom-Spannungswandlers

Tab. 8. 2: Anodenstrom I_A und Ausgangsspannung U_4 im Arbeitsbereich des Lichtmeßzweiges

Tab. 10. 1: Filterungen beim Kalibrieren mit Röntgenbremsstrahlung

Tab. 11.1: Ermittelte effektive Energie, Strahleneinfallrichtung und Dosis bei der Auswertung verschiedener Dosimetergläser

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

α	Winkel zwischen Hauptstrahl und Achsen
β	Winkel zwischen Hauptstrahl und Achsen
γ	Winkel zwischen Hauptstrahl und Achsen
α'	Winkel zwischen UV-Lichtbündel u. Dos.-Glas
γ'	Winkel zwischen UV-Lichtbündel u. Dos.-Glas
δ	Winkel der Auslenkung des UV-Lichtbündels
η	Energieumwandlungskoeffizient
η'	Energieabsorptionskoeffizient
ν_0	Frequenz
ρ	Dichte
σ	Comptonabsorptionskoeffizient
σ'	Mittl. Sekundäremissionsfaktor einer Dynode
τ	Photoabsorptionskoeffizient
τ_T	Zeitkonstante
φ	Winkel der Auslenkung des UV-Lichtbündels
κ	Paarbildungskoeffizient
Φ	Fluenz
Ω	Winkel zwischen Meßfläche und einf. Strahl Raumwinkel
a_i	angez. Pos. des UV-Lichtb. bei Sollt.= 8 mm
b_i	angez. Pos. des UV-Lichtb. bei Sollt.= 0 mm
c	Lichtgeschwindigkeit
c'	Dicke eines Dos.-glases in Einfallsrichtung
d	Spaltbreite
d_i	Breite eines angeregten Teilvolumens
f	Brennweite einer optischen Anordnung
h	Höhe eines Teilvolumens im Dosimeterglas
h_p	Planksches Wirkungsquantum
h'	Verschiebung beim Abtasten
i	Zählindex
l	Weglänge im Dosimeterglas

m_0	Ruhemasse
n	optischer Brechungsindex
$p,$	Steigung und Offset der Bez. zw. Ist- u.
q	Sollposition des UV-Lichtbündels
r	Zahl der Vervielfacherstufen des PM
s	Schrittweite beim Scannen
s'	Solltiefe des UV-Lichtbündels
u	Ortskoordinate
v	Ortskoordinate
v'	Leerlaufverstärkung des I-U-Wandlers
w	Ortskoordinate
w_i	Anteile in Gewichtsprozenten
x, y, z	Ortskoordinaten
x_S	Koordinate des Hauptaustrittspunktes
y_S	Koordinate des Hauptaustrittspunktes
z_S	Koordinate des Hauptaustrittspunktes
\vec{e}_i	Einheitsvektor der Koordinatenachsen
\vec{h}	Einheitsvektor des Hauptstrahles
A	Abmessung des Dosimeterglases
B	Funktion der Koordinaten des Hauptaustrittsp.
B'	Funktion der Koordinaten des Hauptaustrittsp.
D	Standardionendosis
DOS 8	Dosimeterglas der Fa. Schott & Gen.
E	Energie
$E_{1,2,3}$	Ebenen im Dosimeter-Glaswürfel
$F(x)$	Bild einer Verteilung, erhalten durch Scannen
F_i, F'_i	Flächenintegrale über Kurve der UV-Intensität
FD 1	Dosimeterglas der Fa. Toshiba
F_E	spezif. austret. Anteil des RPL-Lichtes
F_G	Gerätefaktor, Dimension: Spannung pro Dosis
F_T	spezif. im Glas bleib. Anteil des RPL-Lichtes

F_K	Grundfläche eines Quaders/Prismas im Glas
$F_R(x)$	Zahl der RPL-Zentren an der Stelle x
G_0, G_1	Verst.-Faktor des PM ohne/mit Anodenstrom
G_2	Verst.-Faktor des I-U-Wandlers
G_3	Verst.-Faktor des regelb. Verstärkers
H	magnet. Abschirmfaktor
High Z	Dosimeterglas von Schulman
I_A	Anodenstrom des PM
I_B	Biasstrom eines Verstärkers
I_D	Dunkelstrom des PM
I_F	Eingangsfehlerstrom eines Verstärkers
$I(x),$	Lichtdurchlässigkeit eines Spaltes, Intensi-
$I(s)$	tätsverteilung im Querschn. des UV-Lichtb.
I_R	Anodenstrom des PM bei Bel. durch Ref.-Lichtq.
I_q	Querstrom durch Spannungsteiler
K_1	Konstante
K_2	Konstante
K_D	Konstante
K_F	Konstante
K_{Spalt}	Integral über Intensitätsvert. des UV-Bünd.
Low Z	Dosimeterglas von Schulman
L	Anteil des vom PM erf. RPL-Lichtes aus P
M, N	Anzahl von Punkten in einem Meßvolumen
OG 530	Orange-Filter der Fa. Schott & Gen.
P	Punkt im Dosimeterglas
P_0	Eckpunkt des Dosimeterglases
P_E	Eintrittspunkt eines Photons in das Dos.
$P[K, 1],$	Parameter Offset und Steigung der Bez. zwi-
$P[K, 2]$	sehen U_{DA} und Solltiefe
PL	Photolumineszenz
PM	Photomultiplier
P_S	Austrittspunkt des Hauptstrahles
Q	Summe von RPL-Intensitäten
R_0	Intensität des Phot.-bündels vor dem Eintritt
$R_D(E)$	Rel. Dosisempfindlichkeit eines Dosimeters

R_i	Widerstände
R_P	Zahl von Photonen pro Zeit und pro Fläche
RPL	Radiophotolumineszenz
R_S	RPL-Summenprofil
$R(x)$	Intensitätsverteilung
$R(y)$	Intensitätsverteilung
$R(z)$	Intensitätsverteilung
S	Abfallkonstante
$S(i)$	Feld aus Summen von RPL-Intensitäten
T	Temperatur
U_2	Ausgangsspannung des I-U-Wandlers
U_4	Ausgangsspannung des regelb. Verstärkers
U_A	Ausgangsspannung
U_D	Spannung am Ausgang einer Photodiode
U_{DA}	Ausgangsspannung des D-A-Wandlers
UG 1	UV-Filter der Fa. Schott & Gen.
U_M	Spannung am Meßwiderstand R_M
U_{off}	Offsetspannung eines Verstärkers
U_{PM}	Spannung am Spannungsteiler des PM
UV	Ultravioletter Spektralbereich
V	Volumen
V_i	Teilvolumen im Dosimeterglas
Z	Ordnungszahl eines Elementes

Literaturverzeichnis

- <1> GOLDSTEIN, E.: Physik. Z. 13, 188 (1912)
- <2> PRZIBRAM, K.: Wiener Ber. (IIa), 130, 265 (1921), 131, 511 (1922), 132, 285 (1923), 134, 233 (1925)
- <3> SCHULMAN, J.H.: Journal of Appl. Physics 22/12, 1479 (1951)
- <4> SCHULMAN, J.H.: Nucleonics 11, 52 (1953)
- <5> YOKOTA, Y., TSURUOKA, M.: Toshiba Review, 10, 11, 12 (1966)
- <6> TOSHIBA: Mitteilung der Fa. Toshiba, Tokyo
- <7> SCHOTT: Mitteilung der Fa. Schott & Gen., Mainz
- <8> BECKER, K.: Solid State Dosimetry, CRC Press Cleveland (1973)
- <9> REGULLA, D.F.: GSF-Bericht S466 (1977)
- <10> KIEFER, H., PIESCH, E.: Atompraxis 10, 268 (1964)
- <11> KIEFER, H., PIESCH, E.: KFK-Bericht 1323 (1970)
- <12> PIESCH, E.: KFK, Ext.Bericht 20/70-1 (1970)
- <13> NACHTIGALL, D.: Physikalische Grundlagen für

Dosimetrie und Strahlenschutz, Thiemig VL.
(1970)

- <14> BASSI, P., BUSUOLI, G.: Calculated Energy Dependence of some RTL and RPL Detectors, Int. Symp. of Appl. Rad. and Isotopes 27, 291 (1976)
- <15> STORM, E. et al.: Report 2237 des Los Alamos Scientific Lab. (1958)
- <16> LEIPUNSKII, O.I. et al.: The Propagation of Gamma Quanta in Matter, Pergamon Press Oxford (1965)
- <17> JAEGER, R.G.: Eng. Comp. on Radiation Shielding I, Springer VL. Heidelberg (1968)
- <18> BRONSTEIN, I.F.: SEMENDJAJEW, K.A. Taschenbuch der Mathematik, VL. Harri Deutsch, Zürich (1968)
- <19> PHYSIK INSTRUMENTE: Katalog Nr. 105 der Physik Instrumente (PI) GmbH., München (1976)
- <20> SPINDLER UND HOYER: Katalog Nr. 86 der Fa. Spindler und Hoyer KG., Göttingen (1977)
- <21> SCHOTT, Glasfaseroptik: Firmenschrift der Fa. Schott & Gen., Mainz
- <22> GLASFASEROPTIK: Tagungsbericht 86, Haus der Technik, Essen (1966)
- <23> FEIERTAG, R.: Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Faseroptik, Feinwerktechnik 74, 241 (1970)

- <24> JACOBSEN, A.: Die Lichtübertragung durch Faser-optik, Feinwerktechnik u. Messen, 83, 177 (1975)
- <25> DISLICH, H., JACOBSEN A.: Lichtleitsysteme für das UV-Spektralgebiet, Angew. Chemie 85, 468 (1973)
- <26> DISLICH H., JACOBSEN, A.: Glas-Kunststoff-Verbunde als Lichtleitsysteme, Glastechn. Berichte 39, 164 (1965)
- <27> EALING: Firmenkatalog der EALING Corp., South Natick USA (1976)
- <28> BAASEL, C.: Firmenschrift der Carl Baasel Laser Technik, München (1978)
- <29> DOETSCH, G.: Anleitung zum praktischen Geb. der Laplace-Transf. und der Z-Transf. VL 01-denburger, München (1967)
- <30> MEYER-EPPLER, W.: Annalen der Physik, 5, 261 (1941)
- <31> BRODERSEN, S.: Journal of the Optical Society of America, 43, 877 (1953)
- <32> OPTOELEKTRONIK HALBLEITER: Datenbuch der Fa. Siemens (1973)
- <33> OSRAM: Quecksilberdampf-Höchstdrucklampen, Firmenschrift (1974)

- <34> SCHOTT: Pers. Kommunikation mit der Fa. Schott & Gen. in Mainz
- <35> OSRAM: Hinweise zur Ausgestaltung von Geräten für Quecksilberdampf-Höchstdrucklampen, Firmenschrift (1978)
- <36> SHURCLIFF, W.A., JONES, R.A.: Journal of the Optical Society of America 39, 1912 (1949)
- <37> SMITH, T., JASANI, B.M.: J. of Physics E, Scientific Instr. 5, 103 (1972)
- <38> KEIL, G.: Nuclear Instr. and Methods 87, 111 (1970)
- <39> KEIL, G.: Journal of Applied Physics 40, 3544 (1969)
- <40> VALVO: Fotovervielfacher, Handbuch der Fa. Valvo, Hamburg (1975)
- <41> SCHONKEREN, J.M., HULL, M.D.: Photomultipliers Valvo GmbH Hamburg (1970)
- <42> PAUL, J.M.: Nuclear Instruments and Methods 89, 285 (1970)
- <43> VACUUMSCHMELZE: Firmenschrift der Fa. Vakuum-schmelze Hanau (1975)
- <44> PITMAN: Firmenschrift der Fa. Pitman Ltd., Weybridge, UK (1975)

- <45> WENZEL: Firmenschrift der Fa. Wenzel Elektronik, München (1976)
- <46> ANALOG DEVICES: Katalog der Fa. Analog Devices (1975)
- <47> TIETZE, U., SCHENCK, Ch.: Halbleiterschaltungstechnik, VL Springer, Heidelberg (1971)
- <48> BURR BROWN: Katalog der Fa. Burr Brown (1976)