

Gepulste Röntgenstrahlung - Welche Messgeräte wären einsetzbar?! - Stand und Entwicklung

Frank BUSCH *

* Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen (MPA NRW), Dortmund
E-Mail: Busch@mpanrw.de

Kurzfassung

Als 2007 die Diskussion um die Eignung aktueller elektronischer Dosimeter für gepulste Strahlung begann wurde schnell deutlich, dass für nahezu alle Röntgeneinrichtungen von gepulster Strahlung gesprochen werden muss. Denn Integrationszeiten und Energiesparmodi moderner Dosimeter machten es erforderlich, Strahlung schon dann als gepulst zu definieren, wenn Pulsdauern bis zu 10 Sekunden auftreten können. Typische Pulslängen liegen in der Röntgendiagnostik im Bereich von Millisekunden, bei medizinischen Elektronenbeschleunigern sind es Mikrosekunden und bei Röntgenblitzgeräten können sie nur noch wenige Nanosekunden betragen.

Da es bei einigen elektronischen Dosimetern zu Nullanzeigen im Direktstrahl von gepulsten Röntgeneinrichtungen kommen kann wurden diese 2008 generell im Bereich der Röntgenverordnung untersagt. Nach genaueren Untersuchungen konnte 2011 eine eingeschränkte Erlaubnis für bestimmte Dosimetertypen im Bereich der Röntgendiagnostik gegeben werden.

Inzwischen sind verschiedene Messungen und theoretische Untersuchungen sowie erste Normen zur Beschreibung gepulster Felder und von Prüfmethode für Dosimeter vorhanden. Bei der PTB ist eine Röntgenanlage zur Erzeugung definierter Pulsfelder verfügbar und es gibt entsprechende Prüfbedingungen.

Für die Messung von Personendosen gibt es bislang noch keine neuen Dosimeter mit Zulassung für gepulste Felder, es sind aber erste Ansätze für Optimierungen erkennbar. In der Zwischenzeit muss weiter mit Übergangsregelungen und teilweise der Nutzung von passiven Dosimetern z.B. für die wöchentliche Schwangerenüberwachung vorlieb genommen werden.

Für die Ortsdosimetrie ist die Lage noch schwieriger, da es bislang noch keine Ionisationskammer-Geräte mit $H^*(10)$ -Zulassung gibt, so dass die Übergangsregelung für alte Hx-Geräte im Bereich der Röntgenverordnung bis 2016 verlängert werden musste. Passive Dosimeter sind auch hier nur unterstützend oder als Notlösung im Einsatz.

In Zukunft wird es zunehmend wichtig einerseits die Pulseigenschaften der zu messenden Felder zu kennen und andererseits entsprechende Prüfdaten für aktive Dosimeter vorliegen zu haben, um deren Eignung für die jeweilige Aufgabenstellung sicher beurteilen zu können.

Gepulste Röntgenstrahlung Welche Messgeräte wären einsetzbar?

Inhalt

- Gepulste Röntgenstrahlung - wo liegen die Probleme?
- Personenüberwachung in gepulsten Feldern
- Messung von Ortsdosis- und Ortsdosisleistung

Probleme?



- 1896 gab es noch keine Idee von Gefährdung durch ionisierende Strahlung
- Die Entstehung der X-Strahlen und ihre Wirkung waren noch weitgehend unbekannt
- Die Möglichkeiten der Bildgebung und deren Anwendung wurden jedoch sehr schnell erkannt und genutzt
- Erste Strahlenschäden und Strahlenopfer führten zum Strahlenschutz



Ehrenmahl der Radiologie - 1936-1960
Krankenhaus St. Georg, Hamburg

Technische Entwicklung

Röntgenstrahlung

- Die Entwicklung der Erzeugung und Anwendung von Röntgenstrahlung ist häufig schneller, als die der entsprechenden Schutzmaßnahmen.
- Das war ganz zu Beginn sicherlich der Fall, da die Wirkungsweise noch weitgehend unbekannt und unerforscht war.
- Das Beispiel der gepulsten Strahlung zeigt, dass auch heute der Strahlenschutz hinter den Nutzungsmöglichkeiten zurückfällt.
- So lief die Entwicklung zu immer mehr gepulsten Strahlenquellen (Röntgenanlagen und Beschleuniger) weitgehend ohne Korrelation zur Entwicklung bei den EPDs.

Technische Entwicklung

Dosimetrie gepulster Strahlung

2007

Diskrepanz zwischen gepulsten Feldern und Messmöglichkeiten wird in D diskutiert. November: PTB Seminar zum Thema. Problemfelder: Röntgendiagnostik und –intervention, Materialprüfung (Röntgenblitzgeräte), Beschleuniger.

2008

Fachgespräch beim BfS. Ausmaß der Messproblematik nur schwer abzuschätzen. Felder weitgehend nicht genau bekannt und damit die Grenzen der Messgeräte ebenfalls nicht. Es gibt keine Prüfmöglichkeiten/ Referenzstrahlenfelder. Besondere Problemfelder: Schwangere (Weiterverwendung von Stabdosimetern wird diskutiert) und Sachverständigenprüfungen (wo endet die Zuverlässigkeit der Messgeräte?)

Oktober: BMU-Rundschreiben, EPDs im Bereich der RÖV und sonstigen gepulsten Feldern „verboten“.

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

5

Technische Entwicklung

Dosimetrie gepulster Strahlung

2008 ff

Umsetzung ist schwierig. Z.T. kein Zutritt für Jugendliche und Schwangere zum Kontrollbereich mehr möglich. Passive Systeme teilweise als Ersatz oder Ergänzung. Keine Prüfmöglichkeiten, keine neuen Messgeräte.

IEC 62743 TS (Technische Spezifikation) Erste Aufstellung von Kriterien für die Eignung zählender Dosimeter in gepulsten Feldern.

2010

Weiteres Fachgespräch im BMU. Es gibt eine theoretische Untersuchungen, nach der die aktuellen EPDs in Streustrahlenfeldern von Röntgendiagnostikanlagen geeignet sind. Systematische Messdaten zur Bestätigung stehen noch aus. Einzelne Untersuchungen deuten in die selbe Richtung.

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

6

Technische Entwicklung

Dosimetrie gepulster Strahlung

2011

Erneutes BMU-Rundschreiben mit bedingter Teilzulassung bestimmter EPDs bei der Röntgendiagnostik.

2012

Neue Gepulste Röntgen-Referenzstrahlungsfelder bei PTB verfügbar.

2013

Prüfvorschriften für gepulste Strahlung in PTB-Anforderungen aufgenommen.

2014

Warten auf erste Bauartzulassungen ...

Gepulste Strahlung

Begriffe und Definitionen

Wann ist ein Strahlungsfeld gepulst in Hinblick auf elektronische Dosimeter?

„**Kontinuierliche Strahlung** für die Orts- und Personendosimetrie ist solche ionisierende Strahlung, deren Dosisleistung an einem Ort, abgesehen von den Ein- und Ausschaltvorgängen, für längere Zeiten als **10 s** konstant ist.“

Gepulste Strahlung für die Orts- und Personendosimetrie ist jede ionisierende Strahlung, die nicht kontinuierliche Strahlung ist.“

PTB, 26.02.2009

Begründung:

Technik aktueller EPDs mit Integrationszeiten in der Größenordnung bei kleinen DL.

Anforderungen an Alarmauslösung gehen ebenfalls von Reaktion nach spätestens 10 s aus.

Gepulste Strahlung

Begriffe und Definitionen

Wesentliche Parameter (ISO TS 18090-1)

t_{pulse} : Pulsbreite (-dauer) / s

f_{pulse} : Pulsfrequenz / Hz

\dot{H}_{pulse} : Pulsdosisleistung / Sv/s

H_{pulse} : Pulsdosis / Sv

Pulsbeschreibung eines realen Pulses durch einen äquivalenten Trapez-Puls. Dann gilt der einfache Zusammenhang:

$$\dot{H}_{pulse} = \frac{H_{pulse}}{t_{pulse}}$$

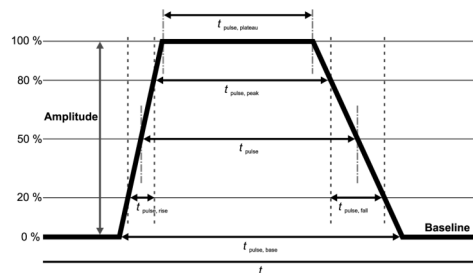
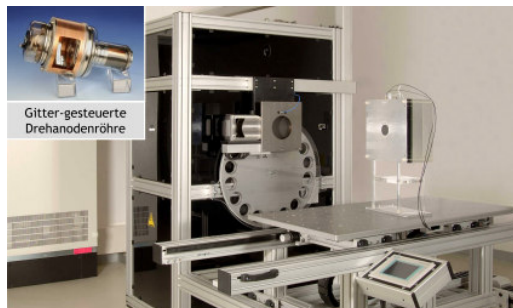


Figure 1 — Equivalent trapezoidal radiation pulse with the relevant parameters

Gepulste Strahlung

Referenzanlage für gepulste Röntgenfelder der PTB

- U: 40 kV – 125 kV
- I: 0,5 mA – 800 mA
- t_{pulse} : 0,2 ms – cw
- Max. DL: 3,9 kSv/h
- Max. Pulsdosis: 300 mSv
- Wiederholrate: 100 Hz
- Anstiegszeit: ~ 50 μ s
- Abfallzeit: ~ 50 μ s
- Gittergesteuerte Drehanodenröhre



Details: Klammer, J. Roth, J., Hupe, O.: Novel reference radiation fields for pulsed photon radiation installed at PTB, Radiation Protection Dosimetry Vol. 151, 478 - 482 (2012)

Gepulste Strahlung

Anwendungsfelder gepulster Strahlung Typische Größenordnungen

Strahlenquelle (Anwendung)	Pulsdauer [s]	Max. Puls-DL in 1 m Abst. [Sv/h]	Max. Puls-Dosis in 1 m Abst. [μ Sv]
Drehanoden Röntgenröhren (Diagnostik)	10^{-3}	10^2	10^2
Beschleuniger (Therapie)	10^{-6}	10^5	10^3
Röntgenblitzgeräte (Werkstoffprüfung)	10^{-9}	10^7	10^2

Gepulste Strahlung

Probleme der Dosismessung

Zählende Dosimeter

- Totzeit t_d der Detektoren
 - $t_d \ll t_{pulse}$ dann muss das Messgerät die **Dosisleistung** im Puls wie kontinuierliche Dosisleistung messen können.
 - $t_d \gg t_{pulse}$ dann muss das Messgerät in der Lage sein, die **Pulsdosis** als Einzelimpuls korrekt zu messen und die Pulsfrequenz darf $1/t_d$ nicht überschreiten.
- Grundsätzliches Problem: Die Feldparameter der Pulsung müssen bekannt sein, um die Eignung des Gerätes einschätzen zu können.

Integrierende Dosimeter

- Sind grundsätzlich eher geeignet. Grenzen der DL-Messung müssen beachtet werden.
- Kleinere Messvolumina erlauben höhere DL – führen aber zu geringerer Empfindlichkeit.
- Passive Dosimeter sind geeignet, aber die Ergebnisverfügbarkeit ist oft zu spät.

Messung von Personendosen

Direktanzeigende Personendosimeter

- Stabdosisimeter wären messtechnisch geeignet, aber es gibt keine Hp(10)-Zulassung
- Damit sind diese Dosimeter allenfalls als freiwillige Zusatzmessgeräte außerhalb der Erfordernisse der RÖV anwendbar.
- Elektronische Dosimeter auf Basis von Zählrohren oder Si-PIN-Dioden sind verfügbar, mit Hp(10)-Zulassung, wenige Geräte auch für weiche Röntgenstrahlung - noch keine Zulassung für gepulste Felder. Ausnahme: Übergangsregelung für Thermo-Mk2





Typ	Ganzkörperdosimeter, Photonen- und Betastrahlung $H_p(10)$ und $H_p(0,07)$
Anwendungs- Bereiche	Energie: 16 keV – 7 MeV (Photonen) 250 keV – 1,5 MeV (Betastrahlung) Dosisleistung: 50 nSv/h bis 1 Sv/h
Messprinzip	Im Halbleiter durch Strahlung induzierter Stromimpuls wird zur Dosis aufsummiert. Detektoren: 3 Si PIN-Dioden
Besonder-heiten	<ul style="list-style-type: none"> • Direktanzeigendes Dosimeter • Dosis- und Dosisleistungsalarm möglich • $H_p(0,07)$ als Ganzkörperdosis (in Deutschland nicht relevant)



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, RS II 3,
Postfach 12 00 20, 53149 Bonn

An die
für den Vollzug der Röntgenverordnung
zuständigen obersten Landesbehörden

nachrichtlich

an die
für den Vollzug der Strahlenschutzverordnung
zuständigen obersten Landesbehörden

an die
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

vorab per E-Mail

Vollzug der Röntgenverordnung

**Einsatz von elektronischen Personendosimetern in gepulsten Photonen-
Strahlungsfeldern**

1. Mein Rundschreiben vom 06.10.2008 (Az. RS II 3 – 15530/2)
2. 66. Sitzung des Länderausschusses Röntgenverordnung, TOP C 10
Aktenzeichen: RS II 3 - 15530/2

Bonn, 29.07.2011

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

16

2011: Teilzulassung von
EPDs in Röntgendiagnostik

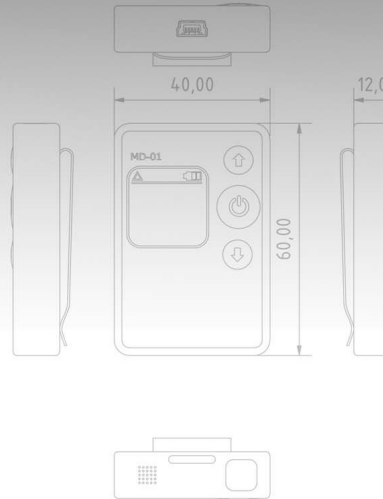
2011: Teilzulassung EPDs

- Nur in Röntgendiagnostik
- Unter der Schutzkleidung
- Alarmschwelle korrekt eingestellt
- Bildgebung muss ungewollte Direktbestrahlung erkennen lassen
- Bei auslösen der Alarmschwelle muss sofort amtliches Dosimeter ausgewertet werden

Wissenschaftliche Grundlage: P. Ambrosi, M. Borowski und M. Iwatschenko, Considerations concerning the use of counting active personal dosimeters in pulsed fields of ionizing radiation, Radiation Protection Dosimetry Vol. 139, No. 4, pp. 483-493 (2010)

Mögliche Neuentwicklung: MiniDosimeter

Typ	Ganzkörperdosimeter, Photonenstrahlung Messgröße: $H_p(10)$
Energie	ab 10 keV - gute Energieunabhängigkeit
Messprinzip	Detektor auf Basis von Standard Flächensensor (CCD, CMOS) – vgl. Smartphone-App „Radioaktivitäts Zähler“
Dosisleistung	0,1 $\mu\text{Sv/h}$ – 2.000 Sv/h (gepulste Strahlung!)
Akkulaufzeit	1 – 7 Tage
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> • Direktanzeigendes Dosimeter geeignet für gepulste Strahlung! • Dosis- und Dosisleistungsalarm möglich • Datenspeicherung • robustes, kompaktes Gehäuse • Weiterentwicklung zum amtlichen elektronischen Dosimetersystem in Kooperation der deutschen Messstellen geplant.

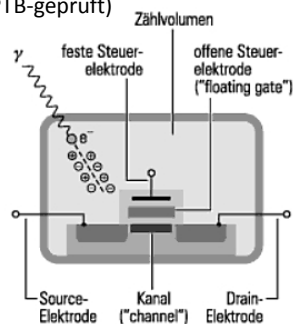


DIS-1: Sonde und Reader (DBR-1)



DIS-1 Dosimeter (RADOS)

- Passiv-elektronisches Dosimeter
- Lesegerät erforderlich
- Hp(10) 1 μ Sv bis 40 Sv
- Hp(10) ± 30 % from 15 keV to 9 MeV
- PTB-Zulassung
- Zusätzlich Hp(0,07)-Anzeige
- Geeignet für gepulste Strahlung (noch nicht PTB-geprüft)



DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

21

Messung von Personendosen

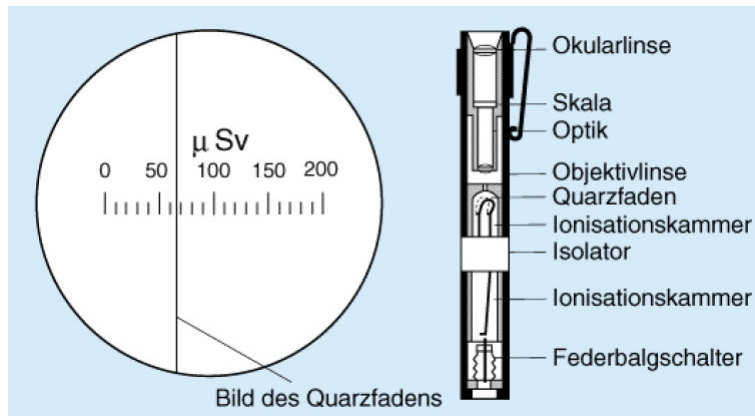
- PTB-Testmessung DIS-1 mit Röntgenblitzgerät XR200
- DIS-1 in Abständen von 1,0 m; 0,3 m; 0,2 m
- Gleichbleibendes Ansprechvermögen bei DL bis zu **einigen MSv/h**
- Das Messprinzip scheint sehr gut geeignet für sehr kurze Pulse
- Das Ansprechvermögen für dieses Spektrum war knapp 70%
- Grenzen werden durch die begrenzte Kapazität der Kammern gesetzt, so ist die Low-Dose-Kammer bei etwa 4 mSv gesättigt, was zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führt.
- Ein Reset ist möglich, muss aber elektrisch und thermisch erfolgen.

Details: H. Zutz and O. Hupe: Recent results of irradiations of DIS-1 dosimeters with an XR200 X-ray flash unit *Radiat Prot Dosimetry* (2013) 154 (4): 401-404

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

22

Stabdosimeter



- Ionisationskammer im Füllhalterformat
- Aufladung des Kondensators = Nullstellung
- Entladung durch Strahlung
- Direkt ablesbar
- Mechanisch sehr empfindlich
- Messgröße H_x (Seit 01.08.2011 nicht mehr zugelassen!)

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

23

Passive Dosimeter



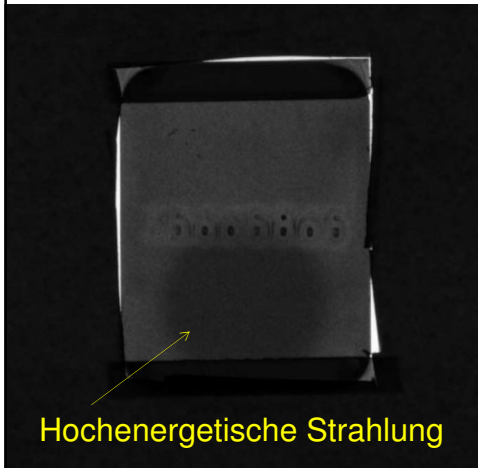
Der Film glänzt mit Zusatzinformationen besonders im Röntgenbereich

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

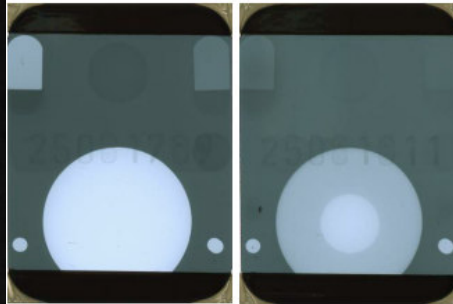
24

Amtliches
Filmdosimeter einer
Schwangeren mit 0,9
mSv exponiert

Referenzfilme mit
Röntgenstrahlung
exponiert



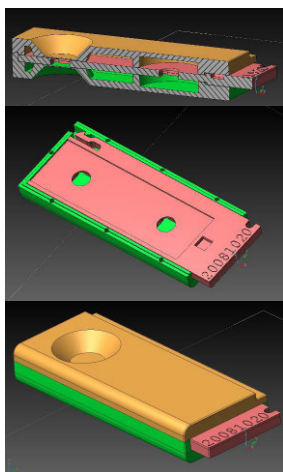
Hochenergetische Strahlung



A60
10 mSv

A120
30 mSv

Filmnachfolger OSL



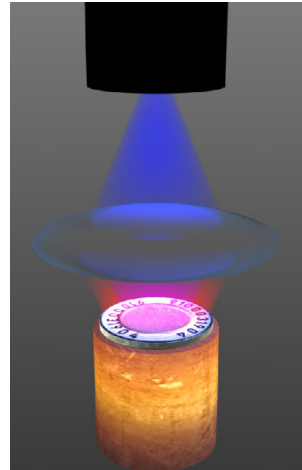
- Entwicklung durch
Helmholtz-Zentrum
München und TU-Dresden
- 2 Elemente für $H_p(10)$ und
 $H_p(0,07)$
- Sonde in Blisterverpackung
- Farbige Halterungen mit
verschiedenen
Befestigungsmöglichkeiten
- Handliche
Lese- / Löscheräte
- Mit Industrieroboter
skalierbare Auswertung bis
zu 3.000 Dosimeter/Tag
- PTB-Zulassung 2011



Filmnachfolger TL-DOS



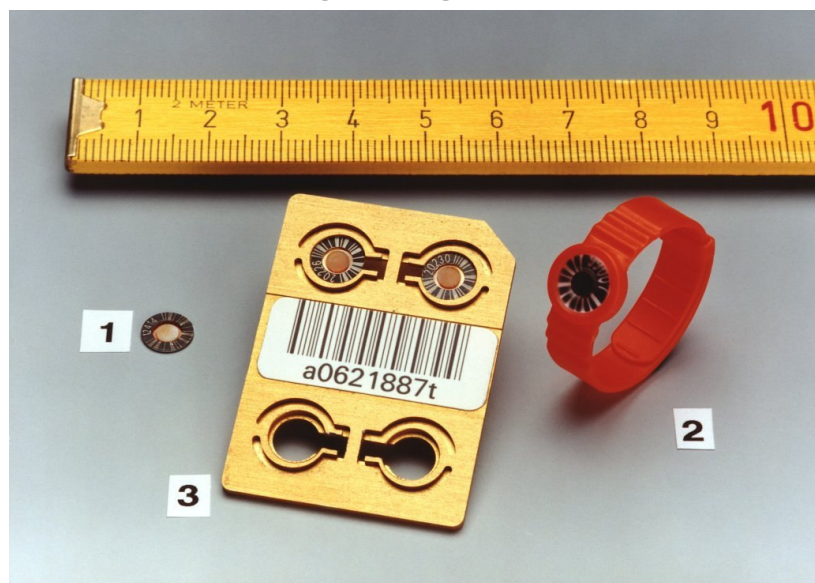
- Dünnschichtdetektor in Coding = vollständiger $H_p(10)$ -Detektor
- Sonde: 2 Detektorelemente $H_p(10)$ in symmetrischer Anordnung im Blister
- Aufheizen über Kontaktheizung
- Geplante Reader-Kapazität: > 2.500 Dosimeter / Tag
- Entwicklung MPA NRW mit
Fa. Czibula & Grundmann, Berlin
Fa. Samco-Technik, Schwerte



DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

27

TLD-Fingerring-Dosimeter



DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

28

Teilkörper-Dosimeter mit Fingerring-TLD



Augenlinsendosis

- Kopfbandhalterung zur Stirnbefestigung der Sonde.
 - Mehrfach benutzbare Bänder in verschiedenen Längen erhältlich.
-
- Schutzbrillenbefestigungen denkbar.
 - Zur Grenzwertüberwachung müsste **hinter** der Brille gemessen werden!
 - Grenzwert wird gemäß EU-Grundnorm auf **20 mSv** gesenkt.

DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

29

Messung von Ortsdosen

Grenzwertüberwachung

Umgebungsdosimetrie mit passiven Systemen

- $H^*(10)$ -Dosimeter für Neutronen auf TLD-Basis: 30 cm PE-Kugel mit „Albedo-Karte“ 2 TLD-Paare mit jeweils Li-6 und Li-7 angereicherten TLD Chips
- $H^*(10)$ -Dosimeter auf Basis von TLD oder Phosphatglas für Photonenstrahlung



DGzFP – 03.04.2014 – F. Busch: Gepulste Strahlung – Welche Messgeräte?

30

Messung von Ortsdosen

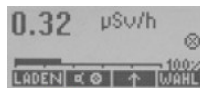
Mobile Messung von Dosisleistungen und Dosen

- Kontrollbereichsermittlung
- Arbeitsplatzfreigabe
- Anlagenfreigabe
 - Zählende Dosimeter (Zählrohr, Szintillator) sind prinzipiell eher ungeeignet, wenn hohe Dosisleistungen im Puls auftreten. Nur für niedrige Dosisleistungen im Bereich der Umgebungsstrahlung z.B. bei der Anlagenfreigabe.
 - Ionisationskammern sind i. d. Regel die beste Wahl für gepulste Felder
 - Problem: Bislang keine zugelassenen I-Kammer-Geräte im Röntgenbereich für H*(10)
 - „Lösung“: Verlängerung der Übergangslösung für Hx-Ortsdosimeter (Messung in Hx und pauschale Umrechnung nach H*(10))

Messung von Ortsdosen

Beispiele für Ionisationskammer-Röntgen-Ortsdosimeter

- **Berthold TOL/F**
- Photon energy range 10 keV – 7 MeV
- Dose rate 100 nSv/h – 10 mSv/h (PTB-zugelassen für Hx)
- Dose rate 10 mSv/h – 100 Sv/h (nicht zugelassen)



Das bewährte Präzisionsmessgerät für Gamma- und Röntgenstrahlung:
Ionisationskammer-Messgerät TOL/F
mit extrem grossen Energie- und Messbereichen

Ihre Vorteile:

- Messung niederenergetischer Fotonenstrahlung bis 10 keV
- Zwei Messbereiche ermöglichen die Dosisleistungsmessung über 7 Dekaden
- Automatische Kalibrierung mit eingebauter ⁹⁰Sr-Quelle
- Optische und akustische Warnung über einstellbare Alarmschwellen
- Messung gepulster Strahlung möglich



Messung von Ortsdosen

Beispiele für Ionisationskammer-Röntgen-Ortsdosimeter

- **BABYLINE**
- Energiebereich 5 keV – 3 MeV
- Dosis: 1 μSv – 100 mSv
- Dosisleistung: 2 $\mu\text{Sv/h}$ – **1 Sv/h**
- **Beispielmessungen PTB (2008):**
- Röntgenblitzgerät XR200
99 Pulse, $t_{\text{pulse}} = 50 \text{ ns}$, Abst. 1,4 m
Pulsdosis: 1,5 μSv , Dosis: 153 μSv ,
Anzeige: 138 μSv , Puls-DL: **10^5 Sv/h**
Ansprechvermögen: **0,90**
- Röntgen-Diagnostikanlage
1 Puls, $t_{\text{pulse}} = 40 \text{ ms}$, Abst. 1,3 m
Pulsdosis = Dosis: 156 μSv
Anzeige: 80 μSv , Puls-DL: **14 Sv/h**
Ansprechvermögen: **0,51**



Messung von Ortsdosen

Beispiele für Ionisationskammer-Röntgen-Ortsdosimeter

- **RADOS EDIS-1**
- Ortsdosimeter-Variante des DIS-1
- Gleiches Messprinzip
- $\text{H}^*(10)$ -Dosimeter
Dosis: 1 μSv – 40 Sv
- Energie: 15 keV – 9 MeV
- Leider (noch?) keine Bauartzulassung
- Könnte helfen, die Eignung von aktiven Messgeräten im Zweifelsfall zu prüfen
- Nachteil: Es muss immer ein Auslesegerät in der Nähe sein (Kosten, Gewicht)
- Könnte eine gute alternative zu passiven Umgebungsdosimetern sein, wenn der Dosisverlauf ermittelt werden soll (Zwischenmessungen)



Fazit

- Eine einfache Universal-Lösung für die Dosimetrie in gepulsten Feldern ist nicht in Sicht
- Es sind einige Fortschritte im Verständnis von Feldern und Messtechnik gemacht worden
- Es gibt erste Prüfmöglichkeiten im Röntgenbereich
- Wir werden die Messgeräte besser kennen müssen (zählend/integrierend, Totzeit, maximale Dosisleistung, maximale Dosis pro Einzelpuls)
- Wir werden die Felder besser kennen müssen (Pulslänge, Pulsfrequenz, maximale Pulsdosis bzw. Pulsdosisleistung), um angemessene Messtechnik zu wählen und Ergebnisse validieren zu können.
- Entwicklungen neuer Dosimeter werden erwartet ...

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

