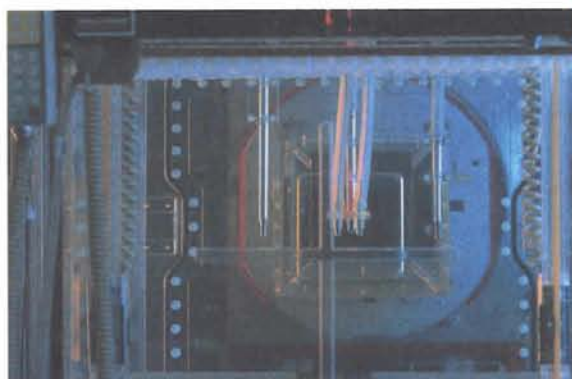


met INFO

*Zeitschrift für Metrologie / Journal de métrologie
Rivista di metrologia / Journal of Metrology*

2/2004



Primärdosimetrie hoch energetischer Photonenstrahlung

Geschwindigkeitsüberwachung
mit direkter Datenübertragung

Staatsbesuch aus China im METAS

METAS a participé à
la Nuit de la Science 2004

Primärdosimetrie hoch energetischer Photonenstrahlung

Eine der wichtigen Behandlungsmöglichkeiten bei Krebserkrankungen ist die Strahlentherapie. Die in den Spitälern vorhandenen Referenzdosimetersysteme werden gemäss der schweizerischen Strahlenschutzverordnung periodisch geeicht. Dazu werden die Referenzdosimeter mit den Sekundärnormalen des METAS bei den Strahlenqualitäten verglichen, bei denen sie in den Spitälern eingesetzt werden. Seit 2001 ist die metrologische Rückverfolgbarkeit der Sekundärnormale auf ein METAS-Primärnormal, ein Wasserkalorimeter, gewährleistet.

MANFRED SASSOWSKY, HARALD QUINTEL, RETO SCHAFFER, GERHARD STUCKI

Als Messgrösse wird heute vor allem die Wasserenergiedosis benützt, die der im Wasser pro Massenelement deponierten Energie entspricht. Die Wasserenergiedosis wird in der Einheit Gray (Gy) gemessen. Das Wasserkalorimeter ist eine am METAS an die Hand genommene Weiterentwicklung des Kalorimeters des kanadischen Staatslabors National Research Council (NRC) [1, 2, 3]. Im vorliegenden Beitrag wird die Funktionsweise und einige ausgewählte Messresultate des Kalorimeters vorgestellt.

Wasserkalorimetrie

Grundprinzip

Ionisierende Strahlung deponiert über eine Reihe verschiedener Prozesse Energie in dem durchquerten Medium. Die fundamentale physikalische Dosisgrösse ist die pro Massenelement deponierte Energie. Als Bezugsmaterial wird Wasser verwendet. Die Wasserenergiedosis D_w ist die pro Massenelement dm in Wasser deponierte Energie dE :

$$D_w = \frac{dE}{dm}$$

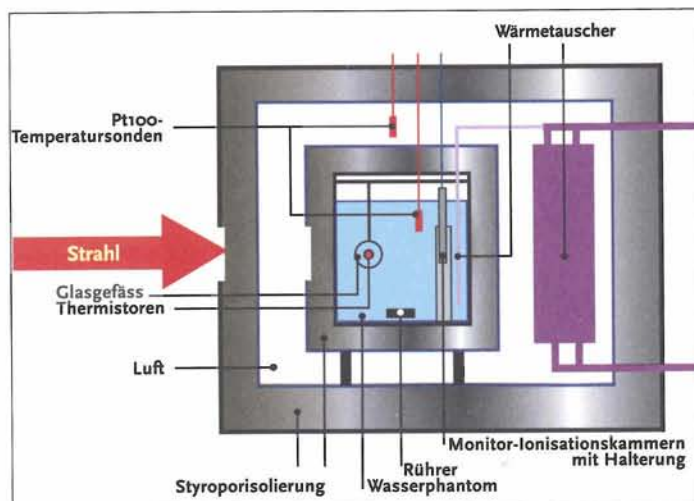
Die SI-Einheit der Dosis ist das Gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

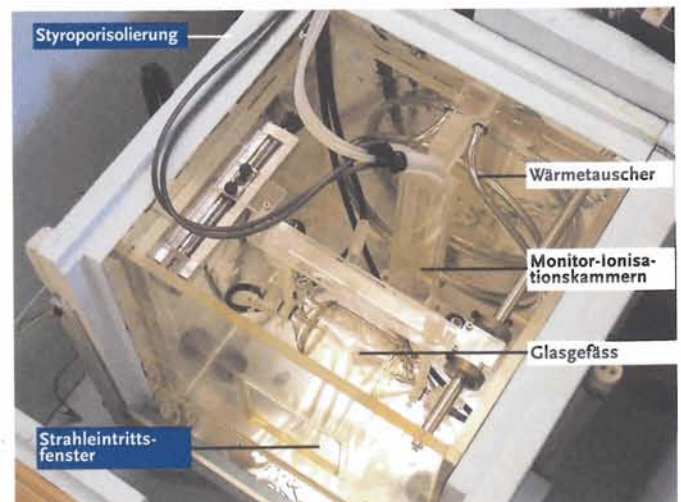
Das direkteste Primärverfahren zur Realisierung der Einheit Gray ist die Wasserkalorimetrie. Das Prinzip besteht darin, die lokal vom Wasser absorbierte Energie durch Messung der dadurch hervorgerufenen Temperaturerhöhung zu bestimmen. Die Wasserenergiedosis lässt sich mit Hilfe eines Wasserkalorimeters gemäss folgender Gleichung bestimmen:

$$D_w = \Delta T \cdot c_w \cdot \frac{1}{1 - k_{HD}} \cdot k_p \cdot k_c \cdot k_{dd}$$

Hierbei ist ΔT die gemessene Erhöhung der Wassertemperatur und c_w die spezifische Wärmekapazität des Wassers.



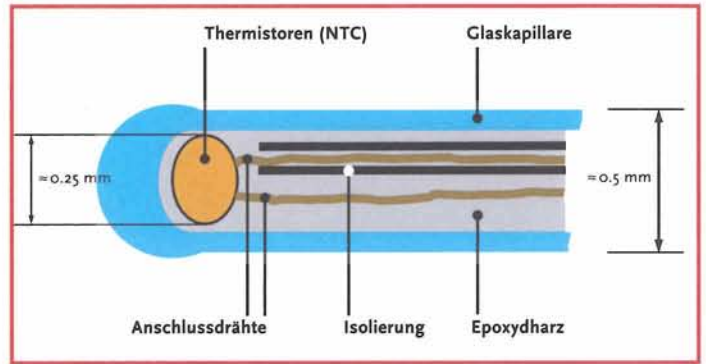
1: Schematische, nicht massstäbliche Darstellung des METAS-Wasserkalorimeters. Die Monitor-Ionisationskammern werden nur bei Messungen in Strahlungsfeldern verwendet, die mit dem Beschleuniger erzeugt werden.



2: Blick von oben in das geöffnete Wasserkalorimeter.



3: Glasgefäß mit Thermistorsonden.



4: Schematische Darstellung der Thermistorsonden.

Der Korrekturterm $(1-k_{HD})^{-1}$ berücksichtigt den so genannten kalorischen Defekt, der im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert wird, ebenso wie die Korrekturfaktoren k_p , k_c und k_{dd} .

Das Wasserkalorimeter wird bei einer Temperatur von 4 °C betrieben. Bei dieser Temperatur hat Wasser sein Dichtemaximum. In einem beschränkten Temperaturintervall ist somit die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur hinreichend gering, so dass Konvektionseffekte vernachlässigt werden können.

Wegen der hohen Wärmekapazität des Wassers beträgt die zu messende Temperaturänderung nur ungefähr 0.24 mK/Gy. Bei typischen Messserien liegt ΔT in der Größenordnung von 1 mK, was bei der angestrebten Genauigkeit hohe messtechnische Ansprüche stellt.

Kalorischer Defekt

Bei der Wechselwirkung der ionisierenden Strahlung mit dem Wasser treten strahlungsinduzierte chemische Reaktionen auf. Diesen Vorgang nennt man Radiolyse. Die energetische Gesamtbilanz der chemischen Reaktionen ist im Allgemeinen von Null verschieden, so dass die durch das Medium absorbierte Energie nicht gleich der in Form von Wärme erscheinenden Energie ist. Man trägt diesem Umstand durch den bereits erwähnten Faktor k_{HD} Rechnung, der die relative Abweichung zwischen der absorbierten Energie E_{abs} und der als Wärme freiwerdenden Energie E_w ist:

$$k_{HD} = \frac{E_{abs} - E_w}{E_{abs}}$$

Der Wert von k_{HD} wird durch eine Reihe von Einflussgrößen mitbestimmt. Sehr wichtig ist die Reinheit des Wassers, da insbesondere organische Verunreinigungen den Wert von k_{HD} in nahezu unkontrollierbarer Weise beeinflussen können. Im Wasser gelöste Gase haben ebenfalls einen Einfluss. So kann durch Sättigung des Wassers mit bestimmten Gasen ein besser definierter Wert für den kalorischen Defekt erreicht werden. Benutzt werden hierfür im allgemeinen H_2 , H_2 - O_2 -Gemische, Ar und N_2 .

Entsprechend der Sensitivität des kalorischen Defekts auf die Wasserqualität muss das benutzte Wasser sorgfältig präpariert werden. Die Glasgeräte, mit denen das Wasser in Kontakt kommt, müssen bestens gereinigt sein. Eine dezidierte Aufbereitungsanlage dient der Purifizierung des Wassers. Im Anschluss daran kann es wahlweise mit verschiedenen Gasen gesättigt werden.

Feldstörung und Wärmeleitungseffekte

Im Strahlungsfeld befindet sich nicht nur Wasser, sondern auch Komponenten des Kalorimeters aus anderen Materialien. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte und Wechselwerkeigenschaften bewirken sie eine Modifikation des Strahlungsfeldes, die man auch als Feldstörung bezeichnet. Berücksichtigt wird dies durch den bereits erwähnten Korrekturfaktor k_p . Weiterhin sorgt die im Vergleich zum Wasser geringere Wärmekapazität von Komponenten des Kalorimeters zu einer stärkeren Erwärmung und dadurch zu Wärmeleitung aufgrund von Temperaturgradienten, die durch den Faktor k_c

berücksichtigt werden. Die Inhomogenität des lateralen Dosisprofils schliesslich wird mit Hilfe von k_{dd} berücksichtigt.

Das METAS-Wasserkalorimeter

Überblick

Die Hauptkomponenten des METAS-Wasserkalorimeters sind schematisch in Illustration 1 dargestellt. Bild 2 zeigt einen Blick von oben in das geöffnete Wasserkalorimeter. In einem zentralen Glasgefäß befindet sich das hochreine Wasser, dessen Temperaturerhöhung mittels zweier Thermistoren gemessen wird. Das Glasgefäß (Bild 3) ist im Zentralbereich zylinderförmig. Auf den konischen Endkappen befinden sich zwei Gewinde, mit deren Hilfe die beiden Thermistorsonden (Illustration 4) auf der Zylinderachse montiert sind. Das Glasgefäß wird durch zwei weitere Öffnungen gefüllt und das Wasser im Glasgefäß mit dem entsprechenden Gas gesättigt.

Eingebettet ist das Glasgefäß in einen aus PMMA (Plexiglas) bestehenden, mit Wasser gefüllten Tank («Phantom») der Kantenlänge 30 cm. Auf seinem Boden befindet sich ein Magnetrührer, der zwischen den Messserien zum Umwälzen und damit zur Temperaturhomogenisierung des Wassers im Phantom eingesetzt wird. Bei Messungen in Strahlungsfeldern, die mit dem Beschleuniger erzeugt werden, sind im Wassertank in Strahlrichtung hinter dem Glasgefäß Ionisationskammern angebracht, die als Monitore zur Registrierung der zeitlichen Schwankungen der Dosisleistung dienen. Bei Messungen im Strahlungsfeld der ^{60}Co -Quelle ist dies

nicht nötig, da die Zeitabhängigkeit der Dosisleistung nur durch die Exponentialfunktion des Zerfallsgesetzes mit bekannter Halbwertszeit gegeben ist.

Das Phantom ist mit Hilfe einer Styropor-Schicht thermisch isoliert. Auf der Innenseite des Styropors sorgt eine mit Aluminium bedampfte und geerdete Mylar-Folie für eine elektrische Abschirmung. Das Wasserphantom befindet sich in einer Holzbox der Kantenlänge 85 cm, die ebenfalls thermisch mit einer Styroporschicht isoliert ist. Auch hier sorgt eine aluminisierte geerdete Mylarfolie für eine weitere elektrische Abschirmung.

Die zwischen dem Wasserphantom und der Holzbox befindliche Luft dient der indirekten Kühlung und Temperaturstabilisierung des Wasserphantoms; sie kann mit Ventilatoren zirkuliert werden. Die Lufttemperatur wird mit Hilfe eines Wärmetauschers und eines elektrischen Heizelementes stabilisiert. Die Kühlflüssigkeit kann auch durch einen Wärmetauscher im Wasserphantom geleitet werden, um die Abkühlung auf 4 °C zu beschleunigen.

Temperaturmessung

Die Bestimmung der Temperaturerhöhung ΔT erfolgt mit Hilfe zweier temperaturabhängiger Widerstände (Thermistoren), die Teil einer Widerstandsbrücke sind. Aus der gemessenen Änderung der Brückenspannung kann die Änderung des Widerstandes und damit die Temperaturerhöhung bestimmt werden. Der Absolutwert der Temperatur wird mit einer Pt100-Sonde gemessen.

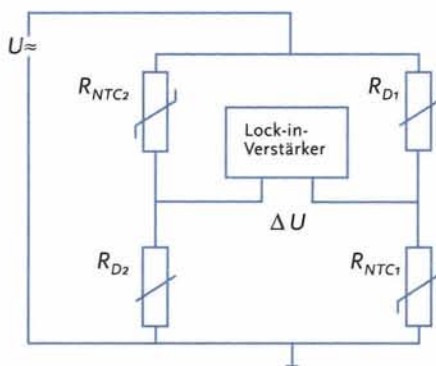
Die Thermistoren sind symmetrisch zur Längsachse des Strahlungsfeldes angeordnet. Der Mittelpunkt zwischen beiden Thermistoren definiert den Referenzpunkt der Dosismessung. Die Thermistoren befinden sich jeweils in einer an einem Ende zugeschmolzenen Glaskapillare, wie in Illustration 4 (nach [3]) schematisch gezeigt ist. Die im METAS-Wasserkalorimeter benutzten Thermistorsonden wurden am NRC gefertigt. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands R eines Thermistors ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$R(T) = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

R_0 ist der Widerstand bei der Temperatur T_0 , und β kann für den engen Temperaturbereich während einer Messung mit dem Kalorimeter als Konstante approximiert werden. Bei der Betriebstemperatur des Kalorimeters beträgt der Widerstand der Thermistoren etwa 10 k Ω . Die Thermistorempfindlichkeit S ist die relative Änderung des Widerstandes mit der Temperatur:

$$S = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = -\frac{\beta}{T^2}$$

Mit Hilfe der Thermistorempfindlichkeit kann aus der Änderung des Widerstandes auf die Änderung der Temperatur geschlossen werden. Die AC-Messbrücke (Illustration 5) zur Messung der Widerstandsänderung der Thermistoren besteht aus vier Zweigen. Je einer von zwei sich gegenüberliegenden Zweigen wird durch die beiden Thermistoren gebildet: (R_{NTC1} , R_{NTC2}), die beiden anderen Zweige durch je eine programmierbare Widerstandsdekade (R_{D1} , R_{D2}). Ihre Wider-



5: Widerstandsmessbrücke.

standswerte werden so gewählt, dass die Brückenspannung nach der halben Messzeit einen Nulldurchgang hat. Die Brückenspannung wird mit einem Lock-in-Verstärker gemessen.

Die Empfindlichkeit der Messbrücke kann bestimmt werden, indem der Widerstand der Widerstandsdekaden um einen definierten Wert verändert und die resultierende Änderung der Brückenspannung gemessen wird. Die

Thermistorempfindlichkeiten werden regelmässig durch Kalibrierung der benutzten Thermistoren bestimmt, wodurch die Rückverfolgbarkeit auf die SI-Einheit der Temperatur gewährleistet ist.

Unsicherheitsbudget

Das Unsicherheitsbudget für die mit dem Kalorimeter ermittelte Wasserenergiedosis im ⁶⁰Co-Strahlungsfeld ist in Tabelle 6 gezeigt. Die Spalte s_i enthält Beiträge zur Messunsicherheit des Typs A, die mit statistischen Methoden ermittelt wurden; angegeben ist die Standardabweichung ($k=1$). Die Spalte u_i enthält Beiträge zur Messunsicherheit des Typs B, die mit anderen als statistischen Methoden ermittelt wurden. Die grössten Beiträge stammen vom kalorischen Defekt, der Thermistorkalibrierung und den Wärmeleitungseffekten.

Erzeugung der Referenzstrahlungsfelder

Die für den Betrieb notwendigen Strahlungsfelder werden durch eine ⁶⁰Co-Bestrahlungseinheit und mit Hilfe eines Elektronenbeschleunigers erzeugt. Das ⁶⁰Co-Strahlungsfeld wird mit einer kommerziellen Alcyon-II-Bestrahlungseinheit der Herstellerfirma General Electric realisiert.

Beim Beschleuniger handelt es sich um ein M22-Mikrotron von Scanditronix. Der Beschleuniger erzeugt Elektronenstrahlen im Energiebereich zwischen 5.3 MeV und 22.4 MeV. Die Energie kann in Schritten von etwa 0.5 MeV variiert werden. Der Elektronenstrahl zeichnet sich durch eine hohe zeitliche Stabilität der Elektronenenergie, geringe transversale Strahldimensionen und eine schmale Energieverteilung aus.

Zur Erzeugung von Photonenstrahlung kann der Strahl auf einen konventionellen Strahlerkopf gelenkt werden, wo die Elektronen auf ein Target treffen und durch Bremsstrahlung Photonen erzeugen. Diese werden gefiltert und kollimiert, um die gewünschten Strahlenqualitäten und Feldgrößen zu erreichen. Die Strahlenqualität wird dabei durch den Qualitätsindex $TPR_{20,10}$ definiert. Dies ist das Verhältnis der in einem Wasserphantom absorbierten Do-

	Unsicherheit in %	
	s_i	u_i
Spezifische Wärmekapazität des Wassers (c_w)		0.01
Kalorischer Defekt (k_{HD})		0.30
Wärmeleitungseffekte (k_c)		0.15
Feldstörung (k_p)	0.05	
Thermistorkalibration	0.20	
Messung der Temperaturerhöhung (ΔT)	0.06	
Laterales Dosisprofil (k_{dd})		0.02
Abstand Strahlungsquelle – Eintrittsfenster des Wasserphantoms		0.02
Wassertiefe in Strahlrichtung		0.10
Quadratische Summation	0.21	0.35
Kombinierte relative Unsicherheit ($k=1$)		0.41

6: Messunsicherheitsbudget des Wasserkalorimeters im ^{60}Co -Strahlungsfeld.

sen bei Tiefen von 20 cm und 10 cm, bei einem konstanten Abstand zwischen Fokus der Strahlenquelle und Messort und einer Feldgröße von 10 cm x 10 cm. Die Strahlenqualitäten sind so gewählt, dass sie den in den Spitälern benutzten Werten möglichst nahe kommen.

Sekundärnormale

Zur Weitergabe der Einheit Gray werden Ionisationskammern als Sekundärnormale benutzt. Eine Ionisationskammer besteht im Wesentlichen aus einem Paar Elektroden, zwischen denen sich ein luftgefülltes Volumen befindet. Die an die Elektroden angeschlossene Hochspannung trennt die von der Strahlung im Luftvolumen durch Ionisation erzeugten Ladungsträger. Die durch Integration des Ionisationsstromes über ein definiertes Zeitintervall bestimmte Ladung ist ein Mass für die während dieses Zeitraums deponierte Dosis. Aus der Anzeige M_Q des Dosimetersystems bei der Strahlenqualität Q kann mit Hilfe des von der Strahlenqualität abhängigen Kalibrierkoeffizienten $N_{w,Q}$ die Wasserenergiedosis $D_{w,Q}$ gemäss folgender Formel bestimmt werden:

$$D_{w,Q} = N_{w,Q} \cdot M_Q$$

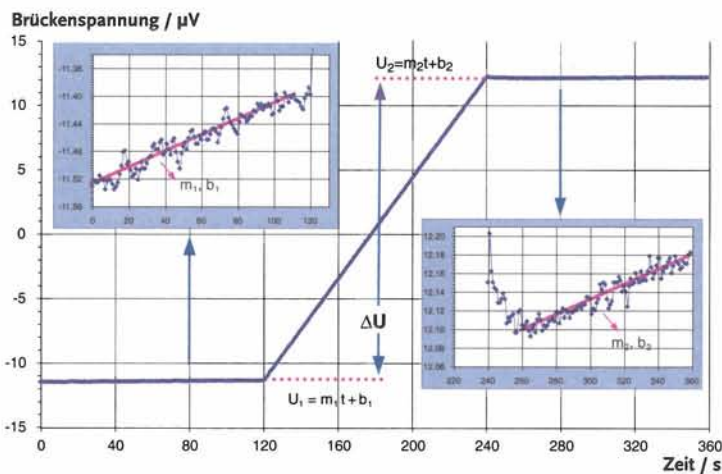
Die Sekundärnormale werden mit dem Wasserkalorimeter kalibriert, indem sie anstelle des Kalorimeter-Glasgefässes am Referenzort im Wasserphantom vermessen werden. Die Eichung der Kunden-Referenzdosimetersysteme erfolgt durch Vergleich mit den Sekundärnormalen, wodurch die metrologi-

sche Rückverfolgbarkeit auf das METAS-Primärnormal gewährleistet ist.

Bestimmung der Wasserenergiedosis mit dem Kalorimeter

Einzelmessung

In Diagramm 7 ist die gemessene Brückenspannung als Funktion der Zeit aufgetragen. Im Zeitintervall zwischen 120 s und 240 s wurde das Kalorimeter mit einer Dosisleistung von etwa 2.5 Gy/min bestrahlt, als Strahlungsquelle diente der Beschleuniger mit einer Strahlenqualität von $\text{TPR}_{20,10} = 0.716$. Mit



7: Gemessene Brückenspannung bei einer Messung mit hoch energetischer Photonenstrahlung mit einer Strahlenqualität $\text{TPR}_{20,10} = 0.716$ und einer Dosisleistung von etwa 2.5 Gy/min.

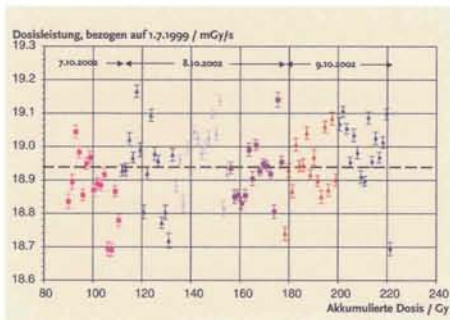
Hilfe der Messdaten in den Zeitintervallen von $t=0$ s bis $t=110$ s bzw. $t=260$ s bis $t=358$ s wird die Drift vor und nach der Bestrahlung bestimmt. In diesen Zeitintervallen werden durch lineare Regression Ausgleichsgeraden bestimmt und auf den Zeitpunkt $t=180$ s extrapoliert. Aus der Spannungs-differenz ΔU zwischen den beiden Aus-

gleichsgeraden zum Zeitpunkt $t=180$ s wird dann die gesuchte Temperaturerhöhung bestimmt, die bei der gezeigten Messung etwa 1.17 mK betrug. Man erkennt in den vergrösserten Darstellungen der Zeitintervalle vor und nach der Bestrahlung, dass das Rauschen bei der Spannungsmessung nur etwa 50 nV (Scheitelwert) beträgt.

Im Zeitintervall zwischen $t=240$ s und $t=260$ s, also unmittelbar nach dem Ende der Bestrahlung, weicht die Temperatur von den Werten der Ausgleichsgeraden ab. Dies liegt hauptsächlich an den Glaskapillaren, in denen sich die Thermistoren befinden: Glas hat eine mehr als fünfmal niedrigere Wärmekapazität als das umgebende Wasser, es erwärmt sich somit stärker. Erst etwa 20 Sekunden nach dem Bestrahlungsende hat sich ein Temperaturgleichgewicht zwischen den Glaskapillaren und dem umgebenden Wasser eingestellt. Weiterhin wird die gemessene Temperatur unmittelbar nach dem Bestrahlungsende durch die Radiolyse-Prozesse mitbestimmt. Erst nach einer gewissen Zeit wird wieder ein chemisches Gleichgewicht erreicht.

Messserie

Mit dem Kalorimeter lässt sich nur eine begrenzte Anzahl von aufeinander folgenden Einzelmessungen durchführen. Dies liegt daran, dass sich das Kalorimeter mit der akkumulierten Dosis immer weiter vom Temperaturgleichgewicht entfernt. Daher kann innerhalb einer Messserie, je nach Dosisleistung,



8: Dosisleistung, bezogen auf ein Referenzdatum, bestimmt in sechs Messserien mit je 15 Einzelmessungen mit ⁶⁰Co-Strahlung.

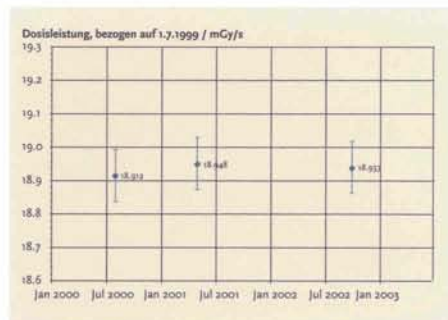
nur eine beschränkte Anzahl von Einzelmessungen durchgeführt werden. Nach einer Stabilisierungszeit von bis zu zwei Stunden ohne Bestrahlung kann dann die nächste Messserie begonnen werden.

Diagramm 8 zeigt die Ergebnisse von sechs Messserien mit je 15 Einzelmessungen. Als Strahlenquelle diente die ⁶⁰Co-Quelle. Aufgetragen ist die Dosisleistung, korrigiert auf ein Referenzdatum, als Funktion der integrierten Dosis. Die Unsicherheitsbalken enthalten lediglich Unsicherheitsbeiträge der jeweiligen Einzelmessungen vom Typ A. Mittelwertbildung über die ganze Messserie ergibt den als gestrichelte Linie eingezeichneten Wert.

Langzeitverhalten

Mit dem Kalorimeter wird regelmässig die Dosisleistung der ⁶⁰Co-Bestrahlungseinheit bestimmt. Unter der Voraussetzung, dass die Quelle keine Verunreinigungen durch andere Nuklide enthält, kann die Zeitabhängigkeit aufgrund des exponentiellen Zerfallsgesetzes mit der Halbwertszeit von ⁶⁰Co berechnet werden. Korrigiert man die gemessene Dosisleistung mit Hilfe dieser Abhängigkeit auf ein Referenzdatum, sollte sich ein konstanter Wert ergeben.

Ergebnisse von drei Messkampagnen über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren sind in Diagramm 9 dargestellt. Die Unsicherheitsbalken enthalten die gesamte Messunsicherheit gemäss Tabelle 6, also einschliesslich gemeinsamer Messunsicherheiten vom Typ B. Die Resultate stimmen innerhalb der Messunsicherheit überein, sind also konsistent zu einer im Rahmen der



9: Dosisleistung der ⁶⁰Co-Quelle, bezogen auf ein Referenzdatum, über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren.

Messunsicherheit konstanten Kalorimeterantwort und der oben angegebenen Voraussetzung.

k_Q-Faktoren

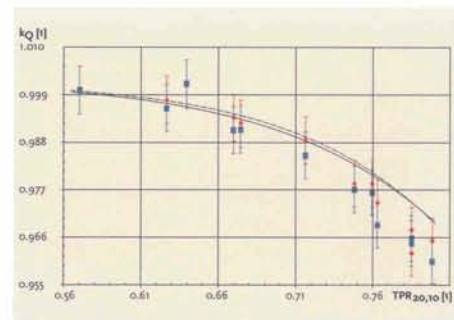
Die Kalibrierkoeffizienten von Ionisationskammern sind von der benutzten Strahlenqualität abhängig. Als Referenzstrahlenqualität der hier gezeigten Ergebnisse wurde ⁶⁰Co-Strahlung benutzt. Indem man mit Hilfe des Wasserkalorimeters Ionisationskammern bei ⁶⁰Co-Strahlung und bei verschiedenen Beschleunigerstrahlenqualitäten Q kalibriert, lässt sich der Faktor $k_Q = N_{WQ} / N_{WCo-60}$ bestimmen.

In Diagramm 10 [2] sind die am METAS gemessenen Werte mit den berechneten Werten gemäss dem internationalen Dosimetrieprotokoll TRS 398 [4] verglichen. Es wurden jeweils mehrere Kammern der Typen NE2561/2611 und NE2571 benutzt. Bis zu einem TPR_{20,10} von etwa 0,7 stimmen die gemessenen Werte von k_Q innerhalb der Messunsicherheit mit den gerechneten Werten überein. Bei höheren TPR_{20,10} beobachtet man jedoch, dass die gemessenen k_Q systematisch unter den gerechneten Werten liegen.

Dieses Verhalten wird auch von anderen Labors beobachtet; die Gründe hierfür sind nicht klar und Gegenstand der aktuellen Forschung. Dieses Ergebnis bestätigt die Notwendigkeit, Referenzdosimetersysteme bei den Strahlenqualitäten zu kalibrieren, bei denen sie eingesetzt werden.

Ausblick

Das METAS-Wasserkalorimeter wird weiterhin die metrologische Basis für die angebotene Dienstleistung der Ei-



10: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten k_Q-Faktoren [2].

chung von Referenzdosimetersystemen für die Spitäler bleiben. In den nächsten Jahren wird eine Konsolidierung dieser metrologischen Basis durchgeführt werden. Der grösste Beitrag zur Messunsicherheit stammt vom kalorischen Defekt. Es ist geplant, ihn direkt und mit einer verringerten Messunsicherheit zu bestimmen. Weiterhin wird in einem gemeinsamen Projekt zwischen dem Paul Scherrer Institut und METAS untersucht werden, ob eine modifizierte Version des Wasserkalorimeters als Primärnormal für gescannte Protonenstrahlung tauglich ist.

Referenzen

- [1] J. Medin, J. Seuntjens, N. Klassen, C. Ross, G. Stucki: «The OFMET Sealed Water Calorimeter»; Workshop on Recent Advances in Calorimetric Absorbed Dose Standards, Teddington, UK, 1999; Report CIRM 42, National Physical Laboratory, Teddington, UK (2000) 65-73.
- [2] G. Stucki, R. Schafer, H. Quintel: «The METAS Photon-Beam Primary Standard Sealed Water Calorimeter»; Workshop on Recent Advances in Absorbed Dose Standards, Melbourne, Australia, 2003.
- [3] C. K. Ross, J. P. Seuntjens, N. V. Klassen, K. R. Shortt: «The NRC Sealed Water Calorimeter: Correction Factors and Performance»; Workshop on Recent Advances in Calorimetric Absorbed Dose Standards, Teddington, UK, 1999; Report CIRM 42, National Physical Laboratory, Teddington, UK (2000) 90-102.
- [4] IAEA; «Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy – An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water», Technical Reports Series No. 398, Vienna, Austria, 2000.



Die Autoren: Manfred Sassowsky, Harald Quintel, Gerhard Stucki, Reto Schafer, alle METAS.

Dosimétrie primaire des faisceaux de photons de haute énergie

La thérapie par rayons est un des moyens importants pour traiter le cancer. Les systèmes de dosimètres de référence utilisés dans les hôpitaux sont vérifiés périodiquement conformément à l'ordonnance suisse sur la radioprotection. Les dosimètres de référence sont comparés aux étalons secondaires de METAS pour les qualités de rayonnement utilisées dans les hôpitaux. La grandeur couramment mesurée de nos jours est la dose d'énergie absorbée dans l'eau, exprimée en unités gray (Gy). Le processus primaire le plus direct pour réaliser l'unité gray est la calorimétrie dans l'eau. Son principe est la mesure de l'élévation de température due à l'absorption locale de l'énergie par l'eau. Depuis 2001, le raccordement métrologique des étalons secondaires à l'étalon primaire de METAS, un calorimètre à eau, est assuré. Le calorimètre a été perfectionné par METAS sur la base du calorimètre du laboratoire national canadien National Research Council (NRC). L'article explique le fonctionnement du calorimètre de METAS et donne quelques résultats de mesure. Cette base métrologique sera consolidée dans les années à venir. L'incertitude de mesure est due principalement au défaut calorifique. Il est prévu de le déterminer directement avec une plus petite incertitude de mesure. Dans un projet commun, l'institut Paul Scherrer et METAS examineront une version modifiée du calorimètre à eau susceptible de servir d'étalon primaire pour les rayonnements de protons scannés.

Campione primario per radiazioni di fotoni di alta energia

La radioterapia è un importante metodo di trattamento del cancro. Conformemente all'ordinanza svizzera sulla radioprotezione, i sistemi dosimetrici di riferimento utilizzati negli ospedali sono verificati periodicamente comparandoli con i campioni secondari di METAS, ricorrendo alle stesse qualità di radiazioni usate negli ospedali. Attualmente la grandezza di misura utilizzata è soprattutto la dose energetica in acqua, che è misurata nell'unità Gray (Gy). Il metodo primario più diretto per realizzare l'unità Gray è la calorimetria ad acqua. Il principio consiste nel misurare l'aumento di temperatura causato dall'energia assorbita dall'acqua. Dal 2001 è garantita la riferibilità metrologica dei campioni secondari a un campione primario METAS, un calorimetro ad acqua. Il calorimetro è un ulteriore sviluppo, operato dal METAS, del calorimetro del laboratorio di Stato canadese National Research Council (NRC). Il presente contributo illustra il funzionamento e alcuni risultati di misura selezionati del calorimetro METAS. Nei prossimi anni si procederà al consolidamento di tale base metrologica. Il più importante contributo all'incertezza di misurazione è il difetto calorico. Si prevede di misurare tale valore direttamente e con una minore incertezza di misurazione. Inoltre, nel quadro di un progetto comune tra l'Istituto Paul Scherrer e il METAS si esaminerà se una versione modificata del calorimetro ad acqua come campione primario è idonea per la radiazione protonica di scansione.

Primary dosimetry of high energetic photon radiation

Radiation therapy is one of the important treatment methods of cancer. According to the Swiss ordinance on radiation protection, the reference dosimeter systems used in the hospitals are verified periodically by comparing them with the secondary standards of METAS, using the same radiation qualities as the hospitals. The measurand nowadays is mainly the absorbed dose to water, which is measured in the unit Gray (Gy). The most direct primary method to realise the unit Gray is water calorimetry. The method consists in measuring the temperature rise caused by the energy absorbed locally in the water. Since 2001 the metrological traceability of the secondary standards to a METAS primary standard, a water calorimeter, is ensured. The calorimeter is a further development of a calorimeter developed by the Canadian NMI National Research Council (NRC). This article describes the functioning and selected measurement results of the METAS calorimeter. During the forthcoming years, this metrological basis will be consolidated. The most important contribution to the uncertainty of measurement is the heat defect. It is planned to measure its value directly and with reduced uncertainty. In the framework of a common project between the Paul Scherrer Institute and METAS it will be investigated whether a modified version of the water calorimeter can be used as primary standard for scanned proton radiation.