

## **VERTEILUNG DER STRAHLENBELASTUNG AUF DER RAUMSTATION MIR<sup>#</sup>**

### **DISTRIBUTION OF THE RADIATION ENVIRONMENT ON SPACE STATION MIR**

N. Vana, W. Schöner, M. Noll\*, M. Fugger, Y. Akatov\*\*, S. Shurshakov\*\*

Atominstitut der Österreichischen Universitäten, Wien

\* Institut für Weltraumdosimetrie, Wien

\*\* Institute for Biomedical Problems, IMBP, Moskau, Russland

### **Zusammenfassung**

In den letzten Jahren wurden während verschiedener Weltraummissionen Thermolumineszenzdosimeter zur Messung der biologisch relevanten Strahlenbelastung eingesetzt. Die Entwicklung der sogenannten HTR-Methode ermöglicht neben der Messung der absorbierten Dosis auch die Bestimmung des mittleren LET des Strahlenfeldes. Dabei wird die Tatsache benützt, daß das Peakhöhenverhältnis des Hauptmaximum (Peak 5) zu den Hochtemperaturmaxima LET-abhängig ist. Dieses Verhältnis wurde in verschiedenen Strahlenfeldern (Alpha-, Beta- Gammastrahlung, Neutronen, hochenergetische schwere Ionen) kalibriert. Auf Grund der Kleinheit der Dosimeter ist es möglich, die Strahlenbelastung innerhalb der Raumstation MIR simultan an mehreren Positionen zu messen. Setzt man die Ergebnisse in Relation zu den Abschirmbedingungen, so ergibt sich zwar eine Abnahme der absorbierten Energiedosis mit steigender Abschirmdicke, jedoch nimmt der LET der absorbierte Strahlung und damit die biologische Wirksamkeit der Strahlung zu. Der Vergleich von gemessenen Daten mit Ergebnissen von Modelrechnungen ergab eine Diskrepanz von bis zu einem Faktor 3.

### **Summary**

The HTR-method developed for the measurement of absorbed dose and the average LET of the absorbed radiation in complex mixed radiation fields was applied during several measurement periods on space station MIR. The method utilizes thermoluminescent dosimeters and is based on the dependence of the peak ratios (HTR) on the LET. A LET calibration of the parameter HTR was performed in various radiation fields (alpha-, beta radiation, neutrons, high energetic heavy charged particles). Due to the small size of the dosimeters simultaneous measurements of the radiation environment in several positions inside space crafts are possible. The results have shown that the absorbed doserate decreases, but the average LET and therefore the biological effectiveness increases with increasing absorbing thickness. The comparison of measured data with results of model calculations revealed a discrepancy of up to a factor of 3.

<sup>#</sup> This work was supported by the Federal Ministry for Science and Traffic and the Austrian Society for Aerospace Medicine, ASM

## **1. Einleitung**

Im Weltraum, beziehungsweise in Raumstationen und Raumschiffen sind Menschen und Materie einer Strahlung von geladenen Teilchen und auch ionisierender elektromagnetischer Strahlung (Röntgen- und Gammastrahlung) in einem breiten Energiespektrum ausgesetzt. Das Strahlenklima im Weltraum resultiert hauptsächlich aus drei Quellen: galaktisch-kosmische Strahlung, solare Strahlung und geomagnetisch gebundene Strahlung. Wechselwirkungsprozesse der primären Weltraumstrahlung mit Materie transformieren diese in sekundäre Strahlung, die sich aus geladenen Teilchen, Neutronen, Gamma- und Röntgenstrahlung zusammensetzt. Ein beträchtlicher Teil der resultierenden Strahlung zeichnet sich durch eine, gegenüber Gammastrahlung, erhöhte biologische Wirksamkeit aus. Zur Berechnung der biologisch relevanten Äquivalenzdosis  $H = Q \times D$  ist daher neben der Messung der absorbierten Energiedosis  $D$  auch die Bestimmung des Qualitätsfaktors  $Q$  der Strahlung notwendig. Im derzeitigen Konzept des Strahlenschutzes ist der Qualitätsfaktor eine Funktion des linearen Energietransfers LET der absorbierten Strahlung. Aus diesem Grund wird zur Bestimmung der biologisch relevanten Dosis auch Information über den LET benötigt. Sowohl die absorbierte Dosis, als auch der mittlere LET der absorbierten Strahlung hängen von den Abschirmbedingungen der Meßposition ab. Daher ist die Messung der Verteilung der absorbierten Dosis und des LET im Inneren der Raumstation für eine konservative Abschätzung der Strahlenbelastung von großer Bedeutung.

## **2. Messung des mittleren LET mit Thermolumineszenz-Dosimetern**

Zur Bewertung der Weltraumstrahlung war es bislang notwendig, verschiedene Methoden gleichzeitig einzusetzen: Ionisationskammern, Zählrohre oder Thermolumineszenz-Dosimeter zur Messung der dünn ionisierenden Strahlung (low LET) sowie Kernspurfilm, nukleare Emulsionen bzw. Teilchenspektrometer zur Messung der dicht ionisierenden Strahlung (high LET), sowie spezielle Neutronendetektoren. Eine Bewertung erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der verschiedenen Methoden. Neuerdings wurden auch einige Messungen mit LET-Spektrometern, basierend auf gewebeäquivalenten Proportional-Zählrohren (TEPCs) durchgeführt. Alle diese Methoden sind sehr aufwendig, wobei vor allem die aktiven Detektoren und Geräte eine beträchtliche Masse haben.

In den letzten Jahren wurde am Atominstitut der Österreichischen Universitäten die HTR-Methode zur Messung des mittleren LET der absorbierten Strahlung mit kleinen Thermolumineszenz-Dosimetern (TLDs) entwickelt (1, 2). In der Standarddosimetrie wird die Lichtemission von LiF-TLDs bei etwa 200°C (dominanter Peak) zur Bestimmung der absorbierten Dosis verwendet. Die neue Methode zur Bestimmung des mittleren LET der absorbierten Strahlung basiert auf der unterschiedlichen LET-Abhängigkeit von Nieder- und Hochtemperatur-TL-Emission. Die Intensität der Lichtemission bei höheren Temperaturen (230-300°C) steigt im Verhältnis zum dominanten Peak mit zunehmendem LET. Dieser Effekt wurde mit unterschiedlichen Strahlenarten kalibriert (hochenergetische, schwere Ionen, Alpha-Teilchen, Protonen, Neutronen etc.). Als Parameter für den LET der absorbierten Strahlung wurde die Erhöhung der Lichtemission im Hochtemperaturbereich, im Vergleich zur Emission nach Co-60-Bestrahlung, normiert auf den dominanten Peak (Hochtemperatur-Verhältnis, HTR) verwendet. Diese Methode wurde mit großem Erfolg zur Messung der absorbierten Dosis und des mittleren LET bei vielen Weltraummissionen (3, 4, 5) sowie für Messungen in Flugzeugen (6, 7) und in therapeutischen Protonenstrahlen (8) eingesetzt. Zur

Bestimmung des Qualitätsfaktors wurde der gemessene mittlere LET in die Relation  $Q(L)$  nach ICRP-26 eingesetzt. Analysen von in Raumschiffen gemessenen LET-Spektren haben ergeben, daß diese Vorgangsweise für diese Spektren zu den selben Ergebnissen führt wie die Bestimmung des mittleren Qualitätsfaktors nach ICRP-60. Eine ausführliche Diskussion dieser Problematik befindet sich in Schöner et al (9).

### 3. Messungen der Verteilung der absorbierten Dosisleistung und des mittleren LET in der Raumstation MIR

Zur Bestimmung der Verteilung des Strahlenklimas in der Raumstation MIR wurden folgende Experimente durchgeführt:

- Experiment ADLET im Rahmen des russischen Langzeitfluges RLF, 1994/95: Messung der absorbierten Dosis und des mittleren LET in der Raumstation MIR in zwei Positionen mit geringer Abschirmdicke (Pos.1,  $25.9 \text{ g cm}^{-2}$ ) und hoher Abschirmdicke (Pos.2,  $38.7 \text{ g cm}^{-2}$ ).
- Experiment MIR-95: Simultane Exposition von Dosimeterpaketen in 6 Positionen auf der Raumstation MIR, Juni - November 1995.
- Experiment MIR-96: Simultane Exposition von Dosimeterpaketen in 6 Positionen auf der Raumstation MIR, Jänner - Juni 1996.

*Tab.1: Positionen der Dosimeterpakete der Experimente MIR-95 und MIR-96*

Dosimeter paket	MIR-95		MIR-96
	Position	mittlere Abschirmdicke	Position
1	Kommandeurskabine	$18.6 \text{ g cm}^{-2}$	Kommandeurskabine, Decke
2	Kabine des Bordingenieurs	$22 \text{ g cm}^{-2}$	zentrales Modul, Panel 325
3	Bereich für medizinisches Training	$36 \text{ g cm}^{-2}$	zentrales Modul, Boden, Nähe Fenster Nr. 3
4	Adaptermodul, in Fensternähe	$38 \text{ g cm}^{-2}$	Adaptermodul, in Nähe Fenster Nr. 14
5	zentraler Kontrolltisch	$53 \text{ g cm}^{-2}$	KVANT-2 Modul
6	Nähe des Strahlenschutz Monitoring Bords	$44 \text{ g cm}^{-2}$	KVANT-2 Modul, Decke des Panel 303

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Experimente zusammengefaßt. Die angegebenen Werte sind die Mittelwerte der Messungen mit unterschiedlichen Dosimetertypen (TLD-600 und TLD-700). Während der Mission ADLET (Jän. 1994 - März 1995) variierte die Dosisleistung in der Raumstation MIR in Abhängigkeit von der Abschirmung von  $0.205 \pm 0.010$  bis  $0.302 \pm 0.010 \text{ mGy d}^{-1}$ . Die Äquivalentdosis von Kosmonaut Poljakov während der 437 Tage auf der Raumstation betrug etwa 200 mSv. Die aus den kleinen TLDs mittels der HTR-Methode gewonnenen Daten des mittleren LET bzw. Qualitätsfaktors sind in ausgezeichneter Übereinstimmung mit TEPC-Messungen im Zuge französisch-russischer Experimente auf der Raumstation MIR (10), beziehungsweise der Radiation Analyses Group der NASA, gemessen während der STS-60 Mission (11).

Tab.2: Ergebnisse von Messungen im Inneren von Raumschiffen:

Mission	Dauer (d)	Position	Dosisleistung (mGy/d)	mittlerer LET (keV/μm tiss)	Q	Äquivalentdosis (mSv)
ADLET-1	182	Pos 1	0.302±0.010	7±0.1	2	110±3.7
		Pos.2	0.205±0.010	7.1±0.1	2.1	78.2±3.7
ADLET-2	300	Pos 1	0.301±0.010	5.8±0.2	1.65	148.9±5.7
		Pos.2	0.236±0.020	6.8±0.4	1.9	134.6±8.9
ADLET-3	437	Pos 1	0.288±0.010	6.4±0.1	1.8	226±8.1
		Pos.2	0.220±0.010	6.7±0.2	1.9	182±8.2
MIR-95	146	Pos.1	0.416±0.006	8.3±0.2	2.3	140±2
		Pos.2	0.447±0.019	7.7±0.2	2.2	144±6
		Pos.3	0.332±0.007	7.6±0.2	2.2	107±2
		Pos.4	0.355±0.008	7.2±0.2	2.0	104±2
		Pos.5	0.359±0.009	7.1±0.2	2.1	110±3
		Pos.6	0.393±0.009	7.8±0.3	2.2	126±3
MIR-96	188	Pos.1	0.399±0.007	8.0±0.4	2.2	165±3
	188	Pos.2	0.356±0.006	8.2±0.5	2.3	154±3
	188	Pos.3	0.490±0.006	7.7±0.5	2.2	202±3
	188	Pos.4	0.367±0.005	7.6±0.4	2.2	152±2
	306	Pos.5	0.456±0.006	6.9±0.3	2	279±4
	188	Pos.6	0.315±0.004	8.1±0.4	2.2	130±2

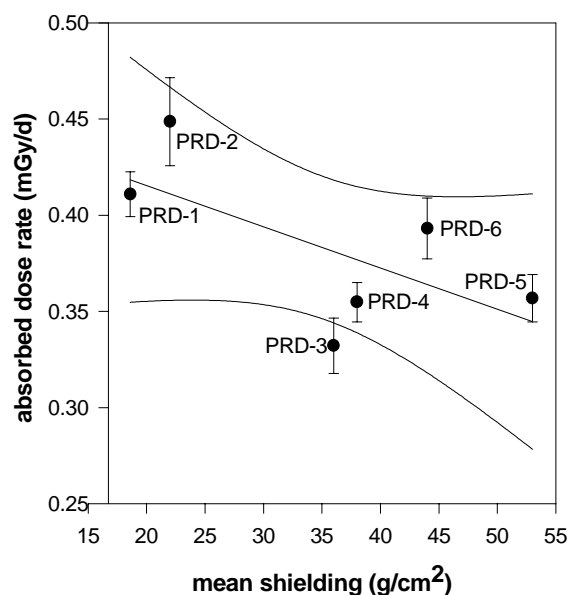


Abb.1: Abhängigkeit der absorbierten Dosis von der mittleren Abschirmdicke der Meßposition, gemessen in Experiment MIR-95

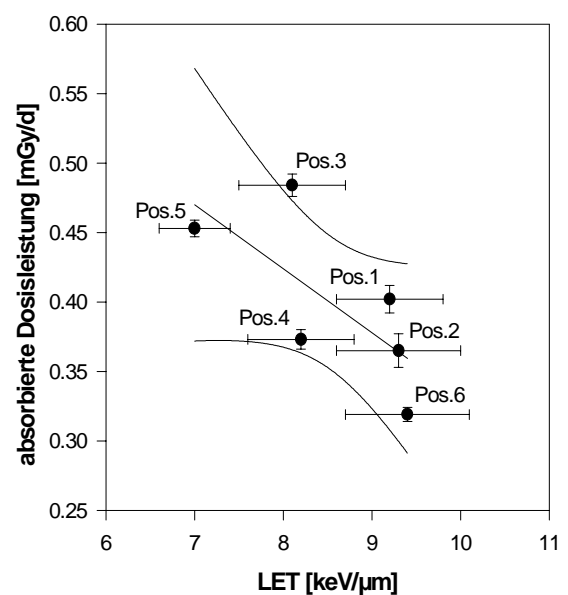


Abb.2: Zusammenhang zwischen der absorbierten Dosisleistung und dem mittleren LET der absorbierten Strahlung während des Experiments MIR-96

Die Ergebnisse zeigen, daß die absorbierte Dosisleistung tendenziell mit zunehmender Absorberdicke abnimmt (Abb.1). So wurde während der Mission ADLET-1 in Position 1 eine Dosisleistung von  $0.302 \pm 0.010$  mGy d<sup>-1</sup> und in Position 2 von  $0.205 \pm 0.010$  mGy d<sup>-1</sup> gemessen. Aufgrund der Anisotropie sowohl des Flusses der geomagnetisch gebundenen Protonen, als auch der Masseverteilung um die Meßposition, hängt das Verhältnis der

Meßwerte in den beiden Positionen von der mittleren Orientierung der Raumstation und somit von der Expositionsperiode ab. Im Gegensatz zur absorbierten Dosisleistung nimmt der mittlere LET und somit auch der Qualitätsfaktor tendenziell mit zunehmender Abschirmdicke zu (Abb.2). Eine Analyse der Daten von TLD-600 und TLD-700 hat weiters gezeigt, daß mit zunehmender Abschirmdicke der Anteil thermischer Neutronen steigt (11, 9).

#### **4. Vergleich von gemessenen Dosiswerten (Experiment ADLET) mit Ergebnissen des Trapped Radiation Modells AP-8**

Im Rahmen von Projekt ADLET wurden Modellrechnungen mit modifizierten Versionen der Programme AE-8 und AP-8 durchgeführt. Für die Transportrechnungen und die Berechnungen der Abschirmspektren der beiden Meßpositionen in der Raumstation MIR wurden von Shurshakov (12) entwickelte bzw. modifizierte Programme verwendet.

Der erste Schritt war die Berechnung der Verteilung der Abschirmmasse um die beiden Meßpositionen in der Raumstation MIR. Weiters wurde der Protonenfluß und ihr Energiespektrum mit einer modifizierten Version des Programms AP-8 min für die Umlaufbahn der Raumstation MIR (Höhe: 388 x 411 km, Inklination: 51.5°) berechnet. Aus dem so erhaltenen Protonenspektrum wurde mit einem Transportmodell die Tiefendosisverteilung berechnet, welche mit der Massenverteilung gefaltet und integriert wurde. Diese Rechnung liefert einen Dosisbeitrag von geomagnetisch gebundenen Protonen (trapped protons) von 0.54 mGy/d (in Gewebe) in Position 1 und 0.19 mGy/d in der besser geschirmten Position 2.

Um diesen berechneten Beitrag von Protonen der Strahlungsgürtel mit den von uns gemessenen Werten vergleichen zu können, müssen die gemessenen Werte noch um den Beitrag der GCR bereinigt werden. Für die GCR sind Modellvorhersagen und experimentelle Daten in guter Übereinstimmung. Außerdem ist der Beitrag der GCR zur Dosis nicht sehr empfindlich gegenüber kleinen Änderungen des Abschirmspektrums. Von Badhwar et al (13) wurden Messungen der GCR in der Raumstation MIR im September 1994 mit einem LET-Spektrometer (TEPC) durchgeführt. Der Zeitpunkt dieser Messungen lagen innerhalb der Periode RLF-ADLET 3. Der Beitrag der GCR zur Gesamtdosis lag bei 0.134 mGy/d mit einem Qualitätsfaktor von  $Q(\text{ICRP-26}) = 3.35$ . Dieser von Badhwar et al gemessene Wert wurde von uns zur Korrektur verwendet.

Die während der Phase ADLET-3 gemessene Gesamtdosisleistung war 0.283 mGy/d in Position 1 und 0.218 mGy/d in Position 2 (Mittelwerte von TLD-600 und TLD-700). Von diesen Werten wurde der mit der Detektorefficiency gewichtete Beitrag der galaktisch kosmischen Strahlung subtrahiert. Diese Rechnung liefert den gemessenen Beitrag der Protonen des Strahlungsgürtels, der mit den Ergebnissen der Modellrechnung verglichen werden kann (Tabelle 3).

Die Ergebnisse zeigen, daß die Rechnung mit dem Trapped Radiation Model AP-8 die gemessene Dosis in der schwächer geschirmten Position 1 um etwa einen Faktor 3, in der stärker geschirmten Position 2 um einen Faktor 1.7 überschätzt. Dieser Wert deckt sich mit dem von Badhwar et al gefundenen Wert von 1.8 während der Mission STS-60 (11). Offensichtlich ist die Diskrepanz zwischen Modell und Experiment in schwächer geschirmten Positionen sogar noch größer. Für eine bessere Angleichung der Parameter der

Rechenmodelle sind zusätzliche Meßdaten von außerhalb von Raumschiffen notwendig. Entsprechende Experimente sind in Vorbereitung.

*Tab.3: Vergleich der gemessenen Dosisleistung während der Phase ADLET-RLF-3 mit Ergebnissen von Modellrechnungen mit dem Trapped Radiation Modell AP-8*

pos.	shielding	total absorbed dose rate	GCR dose rate	trapped dose rate measured	trapped dose rate calculated	calc. to experiment ratio
	(g/cm <sup>2</sup> )	(mGy/d-tiss)	(mGy/d-tiss)	(mGy/d-tiss)	(mGy/d-tiss)	
pos.1	25.9	0.283	0.134	0.176	0.540	3.1
pos.2	38.7	0.218	0.134	0.111	0.190	1.7

## 5. Diskussion

Durch die Verwendung von kleinen TL-Detektoren und der HTR-Methode wurde die Messung der positionsabhängigen Verteilung der absorbierten Dosis und des mittleren LET unter unterschiedlichsten Abschirmbedingungen ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, daß die absorbierte Dosisleistung tendenziell mit zunehmender Absorberdicke abnimmt. Im Gegensatz zur absorbierten Dosisleistung nimmt der mittlere LET und somit auch der Qualitätsfaktor tendenziell mit zunehmender Abschirmdicke zu. Ein Vergleich der gemessenen Daten mit Resultaten von Modellrechnungen hat eine von der Abschirmdicke abhängige Diskrepanz bis zu einem Faktor 3 ergeben. Dies weist einerseits darauf hin, daß das in der Modellrechnung angenommene primäre Spektrum nicht mit dem realen Spektrum übereinstimmt, und andererseits die Transportrechnungen verbessert werden müßten.

## Literatur

- 1 Vana, N., et al, Proceedings IRPA 8, Montreal, 1992
- 2 Vana, N., et al, *Radiat.Prot.Dosim.*, 66, p 119-124, 1996
- 3 Vana, N., et al, *Radiat.Prot.Dosim.*, 66, p 173-177, 1996
- 4 Vana, N., et al, Proceedings 45th Congress of International Astronautical Federation IAF/IAA-94-G.2.139, Jerusalem, 1994
- 5 Vana, N., et al, Proceedings IRPA 9, Vol.2, p 253-255, 1996
- 6 Noll, M., et al, *Radiat.Prot.Dosim.*, 66, Vol 2, p 119-122, 1996
- 7 Noll, M., et al, Proceedings Strahlenbiologie und Strahlenschutz, p 390-394, 1996
- 8 Noll, M., et al, Microdosimetry, Edt. D. Goodhead, P. O'Neill, H. Menzel, p 274-277, 1997
- 9 Schöner, W., et al, 3<sup>rd</sup> Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Budapest, Hungary, 24-26 March 1998
- 10 Nguyen, V.D., et al, *Radiat. Prot. Dosim.*, 31, 1/4, 377-382, 1990
- 11 Badhwar, G.D., et al, *Radiat.Meas.*, 26, 1, 17-34, 1996
- 12 Shurshakov, V.A., State Research Center: Institute for Biomedical Problems, IMBP, Space Radiation Safety Department, Moskau, private communications, 1994-1997
- 13 Badhwar, G.D., et al, *Radiat.Meas.*, 26, 2, 147-158, 1996