



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



TRIGA
CENTER
Atominstutut

Bestimmung der Strahlenexposition im Modul Columbus der ISS mit Thermolumineszenzdosimetern

Projektarbeit

Daniel Hackl, BSc

11712169

Betreut durch:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Musilek

Dieter Hainz, BSc

Ing. Monika Veit-Öller

Ausgeführt am:

TRIGA Center Atominstutut

Stationallee 2, A-1020 Wien

13. Januar 2024

Kurzfassung

Das Strahlenfeld im Weltraum unterscheidet sich grundlegend in seiner Zusammensetzung und Intensität von dem auf der Erde. Im Rahmen des Dosis 3D Projekts wird seit 2012 die Strahlendosis im Modul Columbus der ISS an elf Positionen mit Thermolumineszenzdosimetern bestimmt. In dieser Arbeit wurden die Dosimeter (TLD-300, TLD-600 und TLD-700) von Dosis 3D-23 ausgewertet. Durch eine vorliegende Pre-Flight Kalibrierung sowie zwei durchgeführte Post-Flight Kalibrierungen konnte die Weltraum-Energiedosis bestimmt werden. Die Tages-Weltraumexpositionsdosisis beträgt im Durchschnitt $311 \mu\text{Gy}/\text{d}$ für die TLD-600 (n- und γ -Strahlung), $263 \mu\text{Gy}/\text{d}$ für die TLD-700 und $272 \mu\text{Gy}/\text{d}$ für die TLD-300 (beide nur γ -Strahlung). Darüber hinausgehend wurde eine Validierung der Kalibrierfaktoren eines neuerstellten TLD-300 Dosimetersets durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass trotz der unterschiedlichen Glühkurven und Peak-5-Höhen bei derselben Messposition dennoch eine genaue Energiedosis durch die Pre- und Post-Flight Kalibrierung bestimmt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit konnte auch demonstriert werden, dass das Tempern der TLD bei 100°C einen eindeutigen Einfluss auf die Glühkurvenstruktur und die Kalibrierfaktoren hat. Es ist daher eine konsistente Behandlung der Dosimeterchips für die Weltraumauswertung sowie die Pre- und Post-Flight Kalibrierung zu empfehlen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iii
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Ionisierende Strahlung	4
2.1.1 Aktivität	5
2.2 Physikalischen Dosisgrößen	5
2.2.1 Energiedosis	6
2.2.2 Kerma	6
2.2.3 Linearer Energietransfer (LET)	7
2.3 Thermolumineszenzdosimetrie	7
2.4 Weltraumstrahlung	11
3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	13
3.1 TLD-Auswertung	13
3.1.1 Lichtstandard	16
3.1.2 Tempern	16
3.2 Aufbereitung des Messkurven	17
3.3 Annealing	19
3.4 Post-Flight Kalibrierungen	19
3.5 Validierung der Kalibrierfaktoren eines neuerstellten Dosimetersets	21
3.6 Einfluss des Temperns auf die Glühkurven und Kalibrierfaktoren	23
3.7 Berechnung der Energiedosis	24

Inhaltsverzeichnis

4 Ergebnisse und Diskussion	26
Literatur	29

Abbildungsverzeichnis

1.1	Weltraumkapsel Crew Dragon Endeavour	1
1.2	Dosimeterpäckchen auf der ISS (1)	2
1.3	Dosimeterpäckchen auf der ISS (2)	3
1.4	Dosimeterpakete	3
2.1	Strahlungsarten	4
2.2	Diagramme zur Thermolumineszencdosimetrie	8
2.3	Glühkurven	9
2.4	Weltraumstrahlung	11
3.1	Messgerät TLD-DAT II	15
3.2	Lichtstandard	16
3.3	Glühkurven der 2. Messposition (TLD-300)	17
3.4	Glühkurven der 7. Messposition (TLD-600)	18
3.5	Glühkurven der 11. Messposition (TLD-700)	18
3.6	Ofen	19
3.7	Bestrahlungseinrichtung	20
3.8	Glühkurven aller TLD-300 (Space)	21
3.9	Kalibrierfaktoren der TLD-300	22
3.10	Nettokurven der PFK-1 und PFK-2 (TLD-600)	23
3.11	Kalibrierfaktoren der TLD-600	24
3.12	Kalibrierfaktoren der TLD-700	24
4.1	Gesamte Weltraum-Energiedosis	26
4.2	Tägliche Weltraum-Energiedosis	27

Tabellenverzeichnis

2.1	TLD-Typen	10
4.1	Gesamte Weltraum-Energiedosis	26
4.2	Tägliche Weltraum-Energiedosis	27

Abkürzungsverzeichnis

$T_{1/2}$	Halbwertszeit
eV	Elektronenvolt
FF	Filterfaktor
HPGe	High Purity Germanium
IR-Filter	Infrarotfilter
ISS	International Space Station
Kerma	Kinetic Energy Released per Mass Unit
LEO	Low Earth Orbit
MDA	Measuring & Data Acquisition
PFK-2	Post-Flight Kalibrierung 2
PFK-1	Post-Flight Kalibrierung 1
SEG	Sekundärelektronengleichgewicht
TLD	Thermolumineszenzdosimeter

1 Einleitung



Abbildung 1.1: Die Weltraumkapsel Crew Dragon Endeavour der Crew-6 im Anflug auf die ISS [1].

Das Strahlenfeld im Weltraum unterscheidet sich grundlegend in seiner Zusammensetzung und Intensität von dem auf der Erde. Im Rahmen des Projekts »Dosis 3D« werden seit Mai 2012 passive Detektorpakete (siehe [Abbildung 1.2](#) und [Abbildung 1.3](#)) an elf verschiedenen Messpositionen im Forschungslabor Columbus der International Space Station (ISS) zur Aufzeichnung der Strahlendosis platziert. Somit kann eine dreidimensionale Auflösung der Strahlendosis im Modul erreicht werden. Diese Daten werden u.a. für die genauere Bestimmung der Strahlenbelastung von Astronauten herangezogen. [2] Die eingesetzten Thermolumineszenzdosimeter (TLD) werden etwa alle sechs Monate ausgewechselt und nach der Rückkehr auf die Erde auf verschiedene Universitäten der gesamten Welt aufgeteilt und von diesen ausgewertet. Die Dosimeter von Dosis 3D-23 wurden mit der Mission SpaceX Crew-6 der NASA transportiert (siehe [Abbildung 1.1](#)), welche am 2. März 2023 von der Erde abhob und am 4. September 2023 auf der Erde landete [3]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwölf Pakete (siehe [Abbildung 1.4b](#)) von Dosis 3D-23 ausgewertet, welche sich aus den

Dosimetertypen TLD-300, TLD-600 und TLD-700 zusammensetzen. Ein Paket besteht aus drei Serien der verschiedenen Dosimetertypen, zu je acht TLD-Kristallen. Das zwölftes Paket stellt das Background-Paket dar, welches den gesamten Weg bis zum Abflug und von der Landung mit den restlichen Paketen zurückgelegt hat. Es dient der Erfassung natürlicher Strahlung auf der Erde sowie künstlicher Strahlung, welche bei einer Röntgenkontrolle durch Zollbehörden auftreten kann. Dies ermöglicht eine Bereinigung der Daten und eine exakte Berechnung der Energiedosis, welche im Weltraum von den Dosimetern aufgezeichnet wurde (Weltraum-Energiedosis).

Die Ziele dieser Arbeit umfassen die:

- Bestimmung der Weltraum-Energiedosis.
- Post-Flight Kalibrierung und Bestimmung des Korrekturfaktors.
- Validierung der Kalibrierfaktoren eines neuerstellten TLD-300 Dosimetersets.
- Untersuchung des Einflusses des Temperns auf die Glühkurvenstruktur und die Kalibrierfaktoren.

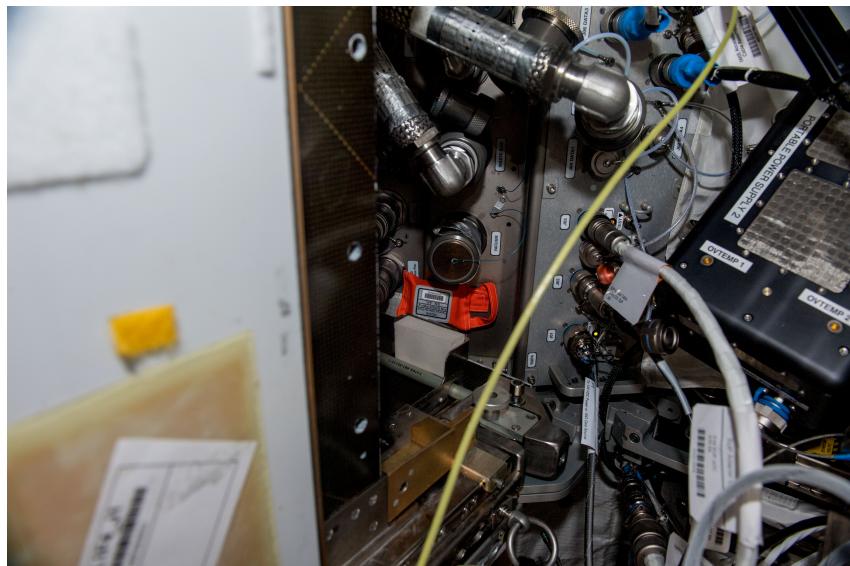


Abbildung 1.2: Ein Päckchen im Modul Columbus der ISS, welches hunderte Dosimeter-Chips, u.a. auch ein Paket dieser Arbeit, enthält. [4].

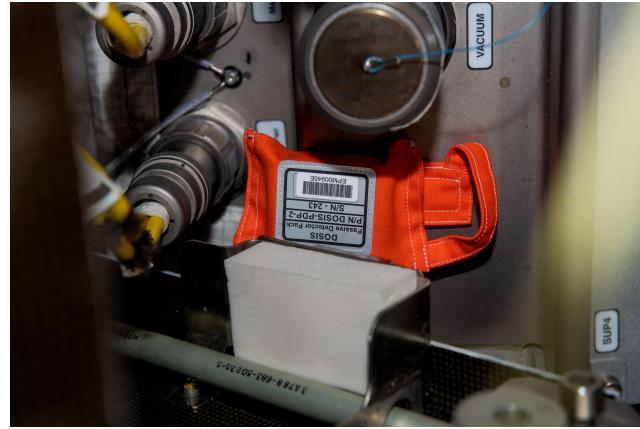


Abbildung 1.3: Ein Päckchen im Modul Columbus der ISS, welches hunderte Dosimeter-Chips, u.a. auch ein Paket dieser Arbeit, enthält. [4].



(a) Transportbox mit allen Dosimeterpaketen



(b) Die Zwölf Dosimeterpakete



(c) Die umsortierten Dosimeter für die Auswertung

Abbildung 1.4: Die verschiedenen Dosimeterpakete zum Zwecke des Transports, der Messung und der Auswertung.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Ionisierende Strahlung

Radioaktivität bezeichnet die spontane Umwandlung eines Atomkerns in einen anderen Kern und geht mit der Freisetzung von energiereicher, ionisierender Strahlung einher. Ionisierende Strahlung ist dadurch gekennzeichnet, dass die in einem Material enthaltenen Atome oder Moleküle beim Durchdringen auf direkte oder indirekte Weise ionisiert werden, was zur Bildung elektrisch geladener Atome oder Moleküle führt [5]. Die erforderliche Ionisierungsenergie variiert je nach Material. Zum Beispiel beträgt sie für menschliches Gewebe etwa 12,4 Elektronenvolt (eV) [6, S. 8]. In Festkörpern kann die erforderliche Energie niedriger sein. Für Germanium, welches im High Purity Germanium (HPGe) Detektor (Gammaspektrometer) verwendet wird, liegt sie bei lediglich etwa 3 eV [7, S. 15]. Man unterscheidet ionisierende Strahlung bezüglich ihrer Zusammensetzung sowie der Fähigkeit, Materie indirekt oder direkt ionisieren zu können:

- **Teilchenstrahlung:** α -, β - und Neutronenstrahlung, etc. (siehe Abbildung 2.1)
- **Elektromagnetischer Wellenstrahlung:** γ - (Ursprung im Kern) und Röntgenstrahlung (Ursprung in der Atomhülle)

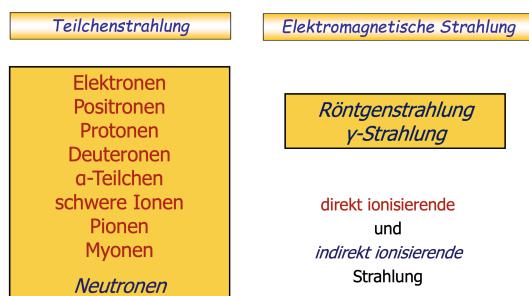


Abbildung 2.1: Unterscheidung zwischen Teilchen- und Wellenstrahlung sowie direkt und indirekt ionisierender Strahlung [8, S. 4].

Ionisierende Strahlung wechselwirkt mit Materie auf unterschiedliche Art und Weise. Dies kommt auf die Strahlungsart und deren Energie sowie das Absorbermaterial an.

2.1.1 Aktivität

Die Aktivität A eines radioaktiven Stoffes, welches aus N Atomen besteht, ist definiert durch die Anzahl der radioaktiven Zerfälle pro Zeiteinheit [9, S. 14]:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N \quad [A] = 1 \text{ Bq} \equiv \text{s}^{-1} \quad (2.1)$$

Dies umfasst auch isomere Übergänge eines Kerns unter Aussendung von γ -Strahlung [10]. Die Zerfallskonstante λ gibt die Zerfallswahrscheinlichkeit an, und hängt mit der Halbwertszeit ($T_{1/2}$) über folgende Beziehung zusammen [9, S. 14]:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (2.2)$$

2.2 Physikalischen Dosisgrößen

Zu den fundamentalen Größen in der klinischen Dosimetrie zählen die physikalischen Dosisgrößen. Ausgehend von diesen lassen sich dann die für den Strahlenschutz wichtigen **operativen Dosisgrößen** (Messgrößen), sowie die **Strahlenschutzdosisgrößen** (Schutzgrößen) bestimmen. Um eine klare Abgrenzung zu den physikalischen Dosisgrößen zu erreichen, welche die Einheit Gray verwenden, sind die für den Strahlenschutz relevanten Größen in Sievert angegeben. [11] Diese spielen für diese Arbeit jedoch nur eine untergeordnete Rolle und werden daher nicht näher beschrieben.

2.2.1 Energiedosis

Die Energiedosis entspricht der in einem betrachteten Massenelement m absorbierten mittleren Energie E_{abs} [11, S. 192]:

$$D = \frac{dE_{abs}}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_{abs}}{dV} \quad , \quad [D] = \frac{J}{kg} = 1 \text{ Gy} \text{ (1 Gray)} \quad (2.3)$$

Da die Ionisierungsenergie vom Material abhängt, muss für die Energiedosis das Absorbermaterial bekannt sein. [11, S. 193]

2.2.2 Kerma

Kinetic Energy Released per Mass Unit (Kerma) entspricht der im Massenelement m durch indirekt ionisierende Strahlung auf geladene Sekundärteilchen übertragenen kinetischen Energie E_{trans} [11, S. 193]:

$$K = \frac{dE_{trans}}{dm} = \frac{1}{\rho} \frac{dE_{trans}}{dV} \quad , \quad [D] = \frac{J}{kg} = 1 \text{ Gy} \text{ (1 Gray)} \quad (2.4)$$

Wie bei der Energiedosis muss auch für die Kerma das Absorbermaterial bekannt sein. Die TLD wurden in einer Plastikmappe mit 2 mm Wanddicke gelagert und bestrahlt. Dies hat den Grund, dass sich ab dieser Dicke näherungsweise ein Gleichgewicht der einfallenden und ausfallenden Sekundärteilchen einstellt. Dies wird als Sekundärelektronengleichgewicht (SEG) bezeichnet. Die Kerma entspricht somit bis auf einen Korrekturfaktor (siehe [Abschnitt 3.7](#)) der Energiedosis. Würde man keine Mappen verwenden, wäre die Kermadosis deutlich höher als die Energiedosis, da mehr Energie auf Sekundärteilchen übertragen wird als direkt im Absorbermaterial deponiert wird. Dies bedeutet, dass die in dieser Arbeit bestimmten Dosen der Energiedosis und Kerma entsprechen und daher in Gray angegeben werden.

2.2.3 Linearer Energietransfer (LET)

Der lineare Energietransfer geladener Teilchen beschreibt den mittleren Energieverlust E_Δ pro zurückgelegter Weglänge s [10, S.311-312]:

$$LET = L_\Delta = \frac{dE_\Delta}{ds} \quad (2.5)$$

$$[L] = \frac{J}{m} = \frac{keV}{\mu m}, \Delta \text{ in eV}$$

Die Energieabgabe erfolgt definitionsgemäß durch Stoßwechselwirkung und nicht durch Strahlungsbremseung. Der Energieverlust entspricht dem angegebenen Delta (Δ). Ausgehend vom linearen Energietransfer können die verschiedenen Strahlungsarten in locker (β und γ) und dicht ionisierende Strahlungsarten (α -, n-Strahlung; energieabhängig) eingeteilt werden. [10, S. 311-312] Dies wird in den Qualitätsfaktoren berücksichtigt. Mit diesen kann dann die Mess-Äquivalentdosis berechnet werden [11, S. 202].

2.3 Thermolumineszenzdosimetrie

Um ionisierende Strahlung zu messen und daraus Dosen zu berechnen, können bestimmte Materialien verwendet werden, welche bei der Bestrahlung interessante Eigenschaften aufzeigen. Thermolumineszenzdosimeter sind den Festkörperdetektoren zuzuordnen. Wird ein Kristall bestrahlt, können bei der Betrachtung der Elektronen im Energiebandschema (siehe Abbildung 2.2a) verschiedene Fälle eintreten. Voraussetzung ist jeweils, dass die absorbierte Energie durch die ionisierende Strahlung größer ist, als die Bandlücke zwischen dem Valenzband und dem angeregten Band bzw. dem Leitungsband. Das Elektron kann zum einen genug Energie erhalten, um ins Leitungsband gehoben zu werden und ist dann als quasifrei zu betrachten. Dies wird auch als Ionisierung bezeichnet. Zum anderen kann bei der Absorption von einer geringeren Energie das Elektron in einen angeregten Zustand in das angeregte Band übergehen und ein Exziton bilden. Ein Exziton ist ein durch elektrostatische Anziehung gebundenes Elektron-Loch-Paar und ist ein Quasiteilchen. Es kann sich dabei ebenfalls durch den Kristall bewegen. [12, S. 505] Ein Exziton kann nun in einem

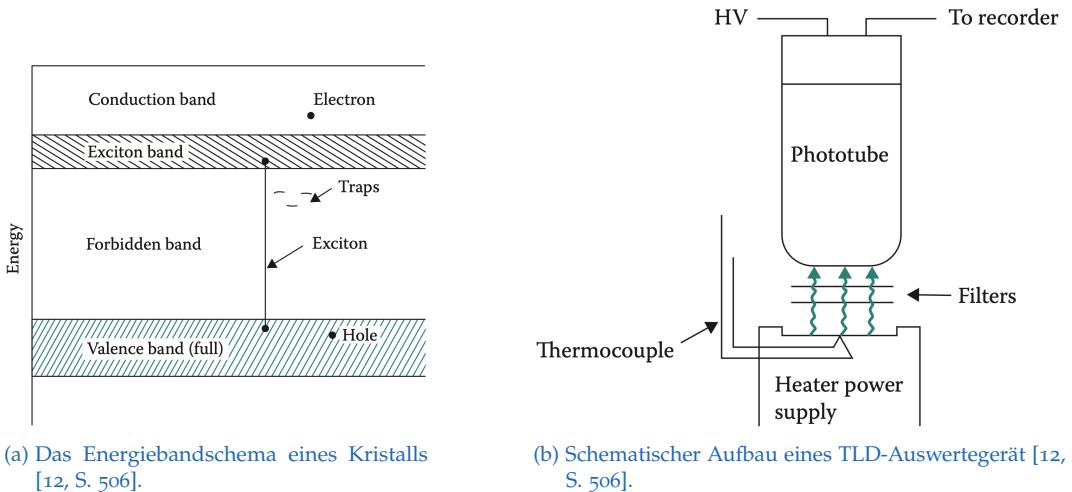


Abbildung 2.2: Diagramme zur Thermolumineszenzdosimetrie

langlebigen Trap gefangen werden und dort einen Teil der ursprünglich absorbierten Strahlungsenergie speichern. [11, S. 328] Solche »Traps« entstehen durch Verunreinigungen des Kristalls mit anderen Elementen oder auch durch Defekte in der Struktur. Wird nun der Kristall kontrolliert aufgeheizt, werden die in den Traps gefangenen Elektronen bei ausreichender Energie bzw. Temperatur wieder in das Leitungsband gehoben, aus dem sie leicht wieder mit der Fehlstelle im Valenzband rekombinieren können. Dabei wird die Energiedifferenz in Form von Photonenstrahlung frei, welche mithilfe eines mit Hochspannung betriebenen Photomultipliers detektiert werden kann (siehe Abbildung 2.2b). Diese grundlegende Eigenschaft bestimmter Materialien wird als Thermolumineszenz bezeichnet. [12, S. 505]

Plottet man die Temperatur, welche mit der Zeit konstant erhöht wird, und den Lichtstrom, welcher durch den Photomultiplier gemessen wird, erhält man sogenannte Glühkurven (siehe Abbildung 2.3). Eine solche Kurve zeigt mehrere »Peaks«, welche den unterschiedlichen »Traps« verschiedener Energieniveaus entsprechen. Die Anzahl der in den »Traps« gefangenen Exzitonen ist proportional zu der Höhe der Glowpeaks bzw. zu der darunter eingeschlossenen Fläche. Die Peakhöhe gibt wiederum einen Rückschluss auf die ursprünglich absorbierte Strahlendosis und kann durch präzise Vor- und Nachkalibrierung der Dosimeter mit einer bekannten Strahlenquelle zu einer sehr genauen Ermittlung der Energiedosis genutzt werden. [12] Im Rahmen dieser Projektarbeit wird stets die Peakhöhe von Peak fünf zur weiteren Berechnung verwendet.

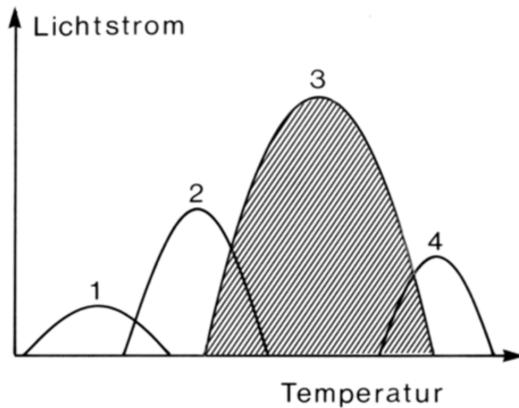


Abbildung 2.3: Die Glühkurven eines Thermolumineszencenzdosimeters [11, S. 329].

Nach jeder Bestrahlung und Auswertung der Dosimeter werden diese wieder »zurückgesetzt«, im Englischen wird dies als »Annealing« bezeichnet. Dabei werden die Dosimeterkristalle gemäß eines bestimmten Zeit-Temperaturschemas ausgeheizt. Danach sind die Dosimeter wieder verwendbar. Die Eigenschaft, wieder in den Ausgangszustand zurückkehren zu können, ist eine der Anforderungen, die an Materialien gestellt werden, welche für die Thermolumineszenzdosimetrie infrage kommen. Darüber hinausgehend sollen die »Traps« bei Zimmertemperatur für lange Zeit thermisch stabil sein. Das unerwünschte Verschwinden der besetzten »Traps« wird als thermisches »Fading« bezeichnet. Beim Ausheizen sollte das Lichtsignal genügend groß sein. Außerdem sollte eine lineares Ansprechverhalten des Materials über eine große Reichweite an Dosiswerten gewährleistet sein. [12, S.506].

Die heute weitreichend verwendeten Materialien, welche diesen Ansprüchen genügen, umfassen $\text{CaSO}_4\text{:Mn}^1$, natürliches CaF_2 , $\text{CaF}_2\text{:Mn}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Mn}$, und LiF [12, S. 507]. TLD-100 Dosimeter bestehen zu 92,6 % aus Li-7 und zu 7,4 % aus Li-6 und können sowohl γ als auch thermische Neutronenstrahlung messen. Dies geschieht über eine (n,α) -Reaktion, wenn ein thermisches Neutron von Li-6 eingefangen wird (Absorptionsquerschnitt $\sigma_a = 950 \text{ b}$). Ähnliches gilt für TLD-600, wobei hier die Neutronenaffinität noch höher ist, da das Material zu 95,62 % aus Li-6 besteht. Die TLD-700 bestehen zu 99,993 % aus Li-7 und sind daher nur für den Nachweis von γ -Strahlung geeignet. Um zwischen der Neutronen- und γ -Energiedosis unterscheiden zu können,

¹Das Element nach dem Doppelpunkt zeigt an, womit das Element oder die Verbindung dotiert wurde.

wird gleichzeitig ein neutronenaffiner TLD, z.B.: ein TLD-100 oder TLD-600, mit einem rein γ -sensitiven Dosimetertyp (z.B.: TLD-700) eingesetzt. Um die Neutronendosis zu bestimmen, wird dann z.B.: die Differenz gebildet. [12, S. 507] Der Dosimetertyp TLD-300 ist gegenüber γ -Strahlung sensitiv und eignet sich besonders für die Bestimmung einer Umgebungsdosisis (operative Dosisgröße), da CaF₂-Dosimeter sehr empfindlich gegenüber γ -Quanten sind, jedoch eine stärkere Energieabhängigkeit zeigen. Diese wird vor allem für den Energiebereich unter 100 keV deutlich [11, Fig. 15.5]. Die LiF-Dosimeter eignen sich hingegen gut zur Bestimmung von Schutzgrößen (Personendosimetrie), da die effektive Ordnungszahl gemäß [11, Tab. 15.1] mit $Z_{eff} = 8,2$ ähnlich zu der menschlichen Gewebes ist.

Material	Handelsname	Gemessene Strahlung
^{nat} LiF:Mg,Ti	TLD-100, MTS-N	γ , n (thermisch)
CaF ₂ :Dy	TLD-200	γ
CaF ₂ :Tm	TLD-300	γ
⁶ LiF:Mg,Ti	TLD-600, MTS-6	γ , n (thermisch)
⁷ LiF:Mg,Ti	TLD-700, MTS-7, MTT-7	γ
⁶ LiF:Mg,Cu,P	TLD-600H, MCP-6	γ , n (thermisch)
⁷ LiF:Mg,Cu,P	TLD-700H, MCP-7	γ

Tabelle 2.1: Verschiedene Thermolumineszenzdosimetertypen, charakterisiert durch ihre Zusammensetzung und die nachweisbare Strahlungsart. [13, S. 13]

2.4 Weltraumstrahlung

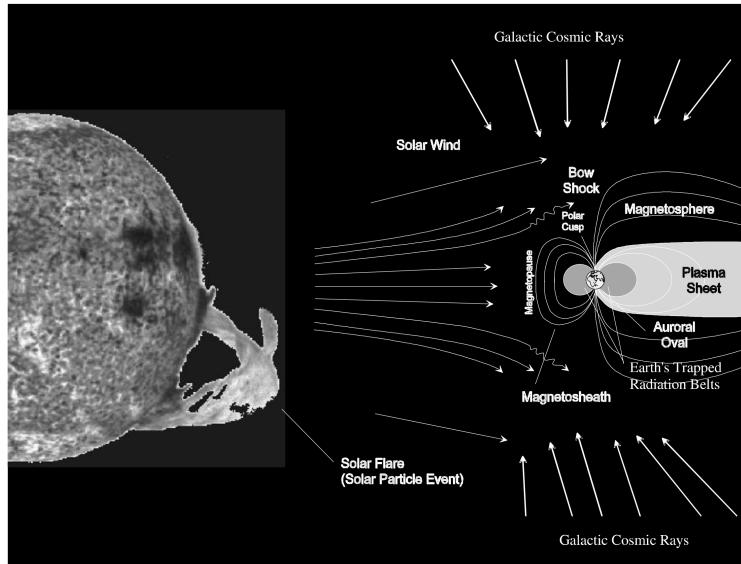


Abbildung 2.4: Die Weltraumstrahlung mit ihren einzelnen Komponenten [14, S. 257].

Bei Raumfahrten wird der menschliche Körper einer höheren Strahlendosis ausgesetzt, da sich das ionisierende Strahlenfeld von dem auf der Erde deutlich unterscheidet. Die Internationale Raumstation, ISS, befindet sich in der niedrigen Erdumlaufbahn, im Englischen Low Earth Orbit (LEO) und daher außerhalb der Magnetosphäre, welche geladene Teilchen ablenkt und somit von der Erdoberfläche weglenkt. [14] Auf der Erde kann man von einer täglichen Strahlendosis von 0,0025 mSv ausgehen, welche durch kosmische und terrestrische (externe) Strahlung verursacht wird. Auf der ISS beträgt dieser Wert etwa 0,8 mSv. [2] Dieser schwankt jedoch, abhängig vom Sonnenzyklus. Es gibt drei verschiedene primäre ionisierende Strahlungsquellen (siehe Abbildung 2.4):

1. **Galaktische Kosmische Strahlung:** Der Ursprung ist außerhalb unseres Sonnensystems. Sie besteht zu 98 % aus einer baryonischen Komponente (davon 87 % Protonen, 12 % α -Teilchen und 1 % Teilchen höherer Ordnungszahlen) sowie einer leptonischen Komponente (Elektronen und Positronen). [14]

2. **Van-Allen-Strahlungsgürtel:** Die Erde ist von einem Strahlungsgürtel umgeben, welcher sich v.a. aus energiereichen Protonen und Elektronen zusammensetzt. Diese sind durch das Erdmagnetfeld an komplexe, zyklotronische Bahnen gebunden. Aufgrund der Südatlantischen Anomalie, bei welcher das Erdmagnetfeld schwächer ist und der Van-Allen-Gürtel deutlich niedriger ist, überschneidet sich die Flugbahn der ISS mit einem Bereich von hoher Protonenzahl und -energie in diesem Bereich. Diese Anomalie entsteht dadurch, dass die magnetische Achse und die Rotationsachse der Erde nicht zusammenfallen, sondern sowohl in Winkel als auch in Mittelpunkt versetzt sind, sodass die durch die Magnetfeldachse bestimmte Grenze des Strahlungsgürtels an dieser Position näher an der Erdoberfläche ist. Dies hat zur Folge, dass etwa die Hälfte der Strahlendosis auf der ISS auf das Durchqueren des Neutronengürtels in der Nähe der Südatlantischen Anomalie zurückzuführen ist, während die andere Hälfte durch die galaktische kosmische Strahlung entsteht. [14]
3. **Solar Particle Event:** Durch sogenannte »Flares« oder einen koronalen Massenauswurf kommt es in der Sonne zum Masseausstoß geladener Teilchen. Werden diese Teilchen nun in der Atmosphäre bzw. dem interplanetaren Raum beschleunigt, spricht man von einem »Solar Particle Event«. Dieses Phänomen kommt relativ selten vor, man kann mit 50 Ereignissen im 11-jährigen Zyklus der Sonne rechnen. Für die Strahlendosis der Astronauten sind vor allem die hochenergetischen Protonen von Bedeutung, welche vermehrt ausgestoßen werden. [14]

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

3.1 TLD-Auswertung

Nach der Entnahme der Dosimeterpakete aus der Transportbox wurden die Kristalle in drei verschiedene Mappen umsortiert (siehe [Abbildung 1.4](#)), um eine bessere Handhabung für die Auswertung zu ermöglichen. Für die Auswertung wurde das Gerät TL-DAT II (siehe [Abbildung 3.1c](#)) verwendet. Dieses besteht u.a. aus den in [Abbildung 2.2b](#) gezeigten Elementen: einer Heizkammer mit einem Thermoelement, auf welches die TLD-Kristalle aufgelegt werden (siehe [Abbildung 3.1a](#)). Darüber wird ein Deckel mit einem Sichtfenster und Bajonettverschluss eingesetzt (siehe [Abbildung 3.1b](#)). Durch eine Drehkammer kann nun der Photomultiplier auf die Position über der Heizkammer bewegt werden. Vor dem Eintrittsfenster des Multipliers wurden noch je nach Dosimetertyp unterschiedliche Filter¹ eingesetzt:

- **Graufilter NG3:** Für die TLD-300 wurde der Graufilter NG3 eingesetzt, welcher die Lichtintensität gleichmäßig über das gesamte Wellenspektrum reduziert. Dies verhindert eine notwendige Totzeitkorrektur bei zu hohen Impulszahlen im Photomultiplier.
- **Infrarot-Filter:** Für TLD-600 und TLD-700 wurde ein Infrarotfilter (IR-Filter) eingesetzt, welcher das Lichtsignal im Bereich der Schwarzkörperstrahlung reduziert.

Der Photomultiplier wird mit einem Hochspannungsnetzteil betrieben. Zusätzlich ist das Messgerät mit einer Vakuumpumpe sowie einem mit hochreinem Stickstoff gefüllten Tank verbunden. Vor jeder Messung wird die Heizkammer zuerst evakuiert und anschließend mit hochreinem Stickstoff (ca. 150 l/h) gespült, da es bei hohen Temperaturen zu Chemilumineszenz

¹Die verschiedenen Filter haben unterschiedliche Lichtschwächungsfaktoren, auch als Filterfaktor (FF) bezeichnet. Diese werden in [Abschnitt 3.4](#) näher beschrieben.

kommen kann, bei welcher die Luft selbst Photonen emittiert und somit die Glühkurve verfälschen würde. Der Photomultiplier ist per Kabel mit einem PC verbunden. Auf diesem wird mit dem Programm Measuring & Data Acquisition (MDA) das Lichtsignal digital erfasst. Mithilfe des Programms ist auch das Heizverhalten steuerbar. Prinzipiell wird die Temperatur des Thermoelements um fünf °C pro Sekunde erhöht. Das bedeutet genau genommen, dass die Intensität (Lichtimpulse) als Funktion der Zeit gemessen wird, wobei die Zeit mit einer Temperaturänderung fest verknüpft ist. Je nach Dosimetertyp wird auf unterschiedliche Temperaturen aufgeheizt:

- **TLD-300:** Heizen bis 400 °C, Messen bis 450 °C
- **TLD-600 & -700:** Heizen bis 480 °C, Messen bis 500 °C

Die Dosimeter werden gemäß folgendem Ablauf einzeln ausgewertet:

1. Einlegen des TLD-Kristalls auf das Heizelement
2. Verschließen mithilfe des Deckels mit Sichtfenster
3. Auflegen des Deckels um Umgebungslicht auszublenden
4. Photomultiplier durch bewegen der Drehscheibe in Position bringen
5. Evakuieren der Heizkammer durch Betätigen der Taste »VAC« am Messgerät TLD-DAT II
6. Spülen der Heizkammer durch Betätigen der Taste »N₂«. Während der gesamten Messung wird die Kammer mit Stickstoff gespült
7. Am PC wird mit dem Programm »MDA« die Messung gestartet
8. Nach Erreichen der Maximaltemperatur wird die Stickstoffzufuhr unterbrochen

Um Messstandards einzuhalten und Fehlerquellen zu reduzieren, welche zu einem Verlust der Information in den TLD-Kristallen führen würden, wurden folgende zusätzliche Schritte durchgeführt:

- Bei der 1. Messung des Tages bzw. nach einer längeren Pause wird zuerst eine Leermessung (analog zu TLD-Messung nur ohne Kristall) durchgeführt.
- Anschließend werden 1-2 Lichtstandards gemessen.
- Am Ende einer Messposition zu je acht TLD wird bei einer Temperatur von 40 oder 45 °C ein Lichtstandard gemessen.

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung



(a) Die Heizkammer mit einem eingelegten TLD-Kristall.



(b) Die mit dem Deckel verschlossene Heizkammer.



(c) Das Messgerät TLD-DAT II (links) mit dem Photomultiplier (vertikal) sowie das Hochspannungsnetzteil (rechts).

Abbildung 3.1: Das zur Auswertung verwendete Messgerät TLD-DAT II.

3.1.1 Lichtstandard

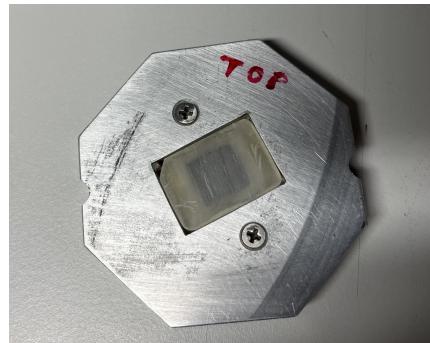


Abbildung 3.2: Der Lichtstandard, welcher sich aus einer Natururan-Folie in einem Kunststoff-Szintillator zusammensetzt.

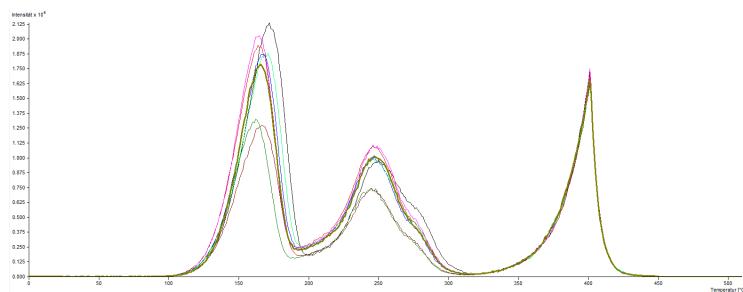
Der Lichtstandard besteht aus einer Folie Natururan (10×10 mm), welche in einem Kunststoffszintillator eingeschlossen ist. Die durch das U-238 emittierten α -Teilchen führen zu einer kontinuierlichen Anregung des Szintillators an, welcher dadurch Photonen emittiert. Dieses konstante Lichtsignal wird als Referenzsignal genutzt.

3.1.2 Tempern

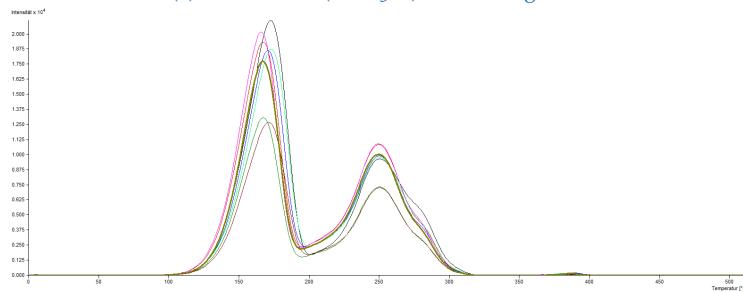
In der Vergangenheit wurden die TLD-600 und TLD-700 »getempert«. Bei diesem Prozess werden die Dosimeterkristalle vor der Messung für eine halbe Stunde bei 100°C im Ofen ausgeheizt. Dies wird gemacht, damit die Glühkurvenstruktur der beiden Dosimetertypen einander stärker ähneln, da beim TLD-600 vor dem Tempern Peak vier und Peak fünf nicht so exakt getrennt sind, wie dies nach dem Prozess der Fall ist. Dadurch wird auch bei den TLD-600 Peak fünf leicht höher. Es wurden bei der Pre-flight Kalibrierung, sowie bei der Weltraumdosimeterauswertung und bei der zweiten Post-flight Kalibrierung die TLD-600 und TLD-700 getempert. Lediglich bei der ersten Post-flight Kalibrierung wurden die Dosimeter aufgrund eines Fehlers nicht getempert.

3.2 Aufbereitung des Messkurven

Ab etwa 300 °C kommt es zu einem starken Anstieg der detektierten Lichtimpulse. Dies ist auf die Schwarzkörperstrahlung zurückzuführen. Die gemessenen Glühkurven werden durch ein Hintergrundsignal, welches u.a. auf thermisches Rauschen und Lichteindringen in den Messapparat zurückzuführen ist, verfälscht. Um diesen Hintergrund abziehen zu können, wird ein Kurvenfit durch die Messpunkte des Bereichs 21 °C bis 60 °C sowie dem Bereich ab etwa 325 °C (Schwarzkörperstrahlung) bis in den Kurvenanstieg gelegt. Diese synthetische Hintergrundkurve wird dann mithilfe des Programms MDA von der ursprünglichen Kurve abgezogen. Außerdem wird eine 21-Punkt Glättung durchgeführt, sowie das Maximum von Peak fünf auf 250 °C (TLD-300) bzw. 220 °C (TLD-600 & -700) verschoben. Die bereinigte Nettokurve wird dann mit dem Programm ausgewertet. Insbesondere die Peakhöhe von Peak fünf ist für die Dosisberechnung besonders wichtig.



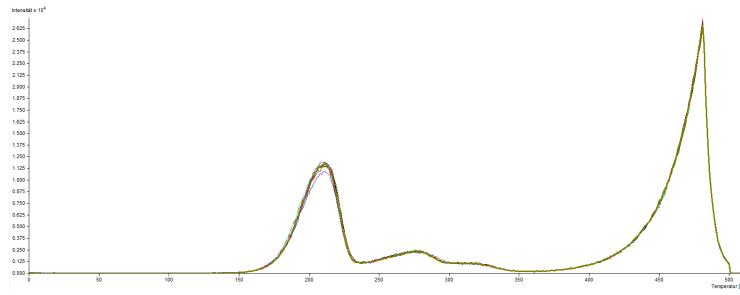
(a) Glühkurven (TLD-300) mit Hintergrund.



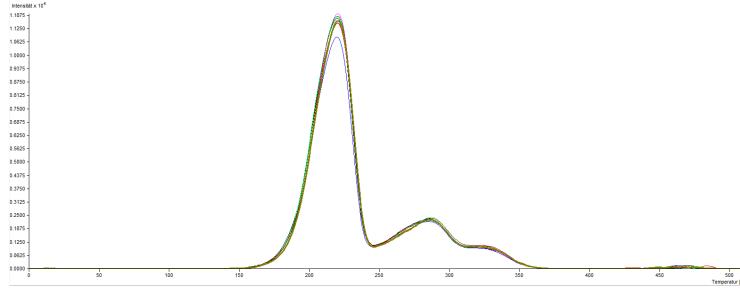
(b) Glühkurven (TLD-300) ohne Hintergrund.

Abbildung 3.3: Glühkurven der 2. Messposition unterschiedlicher TLD-300 Batches mit und ohne Hintergrund.

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

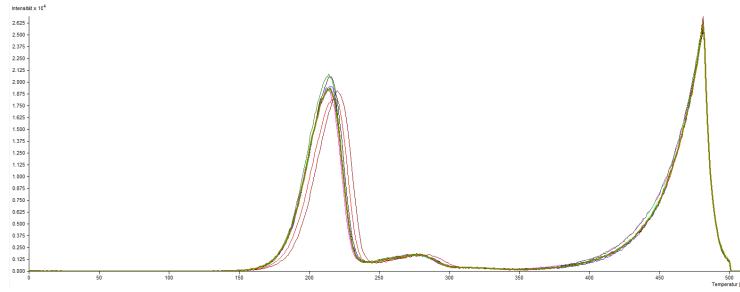


(a) Glühkurven (TLD-600) mit Hintergrund.

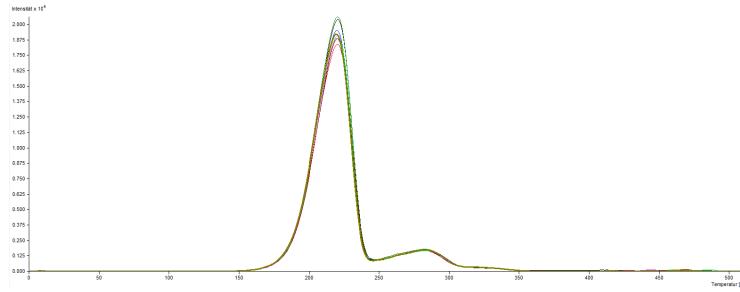


(b) Glühkurven (TLD-600) ohne Hintergrund.

Abbildung 3.4: Glühkurven der 7. Messposition der TLD-600 mit und ohne Hintergrund.



(a) Glühkurven (TLD-700) mit Hintergrund.



(b) Glühkurven (TLD-700) ohne Hintergrund.

Abbildung 3.5: Glühkurven der 11. Messposition der TLD-700 mit und ohne Hintergrund.

3.3 Annealing

Nach jeder Auswertung müssen die Dosimeter bei hohen Temperaturen ausgeheizt werden, um wieder bei nachfolgender Bestrahlung korrekte Werte zu liefern. Dies wird wie bereits in [Abschnitt 2.3](#) beschrieben, als »Annealing« bezeichnet. Dafür wird im konkreten Fall ein elektrischer Ofen verwendet. Nachdem dieser 400 °C erreicht hat, werden die auf einer Glaspalte platzierten TLD-Kristalle in den Ofen geschoben (siehe [Abbildung 3.6](#)). Die Dosimeter werden für eine Stunde bei dieser Temperatur ausgeheizt. Anschließend wird der Ofen abgeschaltet und man lässt ihn über Nacht im geschlossenen Zustand auskühlen.



Abbildung 3.6: Ofen zum Ausheizen der TLD (Annealing oder Temperiern).

3.4 Post-Flight Kalibrierungen

Nach der Messung und Auswertung der TLD-Kristalle wurden pro Dosimetertyp drei Serien ausgewählt: die Messpositionen zwei, acht und elf mit je acht Kristallen. Es wurden zwei Kalibrierungen durchgeführt, da bei der Pre-Flight Kalibrierung der TLD-600 und TLD-700 ein IR-Filter sowie ein NG5-Graufilter bei der Auswertung vor dem Photomultiplier eingesetzt wurde, während bei der Space-Auswertung und der Post-Flight Kalibrierung 1 (PFK-1) nur ein IR-Filter verwendet wurde. Die Schwächungsfaktoren der verschiedenen Filter wurden in der wissenschaftlichen Arbeit »Die Rolle von

Thermolumineszenzdetektoren in der Dosimetrie« [15, S. 112-126] bestimmt und betragen:

- **TLD-300 NG₃-FF_{max}**: $19,570 \pm 0,929$
- **TLD-600 Matroschka NG₅-FF_{max}**: $2,310 \pm 0,097$
- **TLD-700 Matroschka NG₅-FF_{max}**: $2,441 \pm 0,058$

Die ausgewählten Dosimeter wurden mit einer Cäsium-Quelle über einen bestimmten Zeitraum bestrahlt, wodurch die Energiedosis der Dosimeter berechnet werden konnte:

- **Post-flight Kalibrierung 1**: 12.10.2023 bis 16.10.2023 (94:40 h bei 1,25 m Abstand), D = 41,90 mGy
- **Post-flight Kalibrierung 2**: 20.10.2023 bis 23.10.2023 (72:00 h bei 1,25 m Abstand), D = 31,85 mGy



Abbildung 3.7: Die zur »Post-Flight« Kalibrierung verwendete Bestrahlungseinrichtung mit einer Cs-137 Quelle.

Die Auswahl der Dosimeter wurde zufällig getroffen und soll als Stichprobe repräsentativ für die Grundgesamtheit stehen. Das bedeutet, dass für die Dosimeter dieser Serien die einzelnen Kalibrierfaktoren bestimmt werden. Die Kalibrierfaktoren berechnen sich gemäß folgendem Zusammenhang:

$$Cal\ Fact = \frac{I_{Peak\ 5} \cdot FF}{D} = \frac{I_{Peak\ 5\ (real)}}{D} \quad (3.1)$$

Für die PFK-1 und die Post-Flight Kalibrierung 2 (PFK-2) wurden anschließend die einzelnen Kalibrierfaktoren ins Verhältnis zu den Faktoren der

Pre-Flight Kalibrierung gesetzt und daraus der Mittelwert für die PFK-1 gebildet. Der Korrekturfaktor ergibt sich dann für die TLD-300 zu:

$$\text{Corr Fact } (TLD - 300) = \frac{1 + MW^*}{2} = 1,064 \quad (3.2)$$

Dabei entspricht in [Gleichung 3.2](#) MW^* dem Mittelwert der Verhältnisse der beiden Post-Flight Kalibrierungen. Für die TLD-600 und TLD-700 wurde nur der Mittelwert der Verhältnisse der PFK-2 verwendet:

$$\text{Corr Fact } (TLD - 600) = \frac{1 + MW_{PFK-2}}{2} = 0,999 \quad (3.3)$$

$$\text{Corr Fact } (TLD - 700) = \frac{1 + MW_{PFK-2}}{2} = 0,989 \quad (3.4)$$

3.5 Validierung der Kalibrierfaktoren eines neuerstellten Dosimetersets

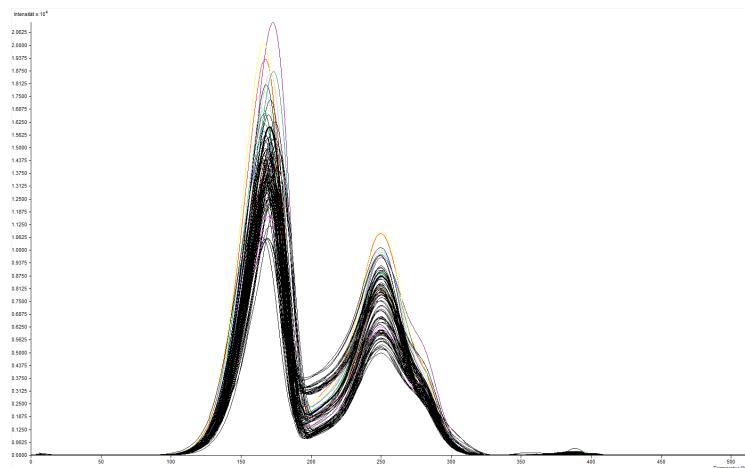
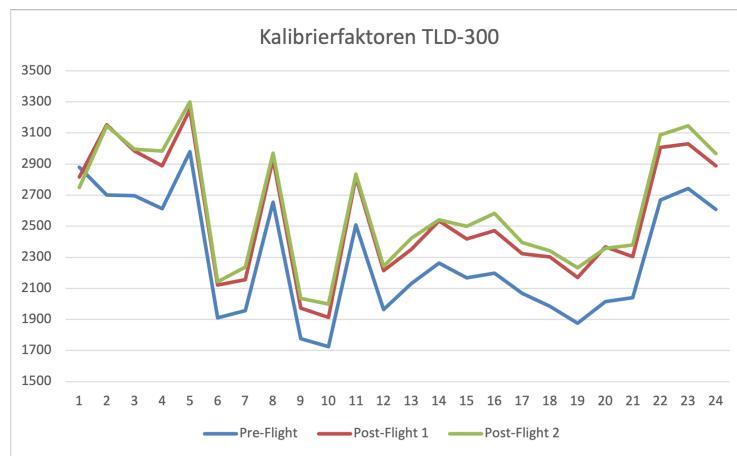


Abbildung 3.8: Die Glühkurven der ausgewerteten TLD-300, welche im Weltraum bestrahlt wurden.

Die TLD-600 und -700 wurden bereits im Rahmen der Dosis 3D Mini verwendet. Für diese Exposition wurde ein weiteres Set an TLD-300 hinzugefügt,

welches aus verschiedenen Dosimeterbatches zusammengestellt worden ist. Die Dosimeter wurden vor der Weltraumexposition kalibriert. Man sieht anhand von [Abbildung 3.8](#), dass sich die Form der Glühkurven zum Teil stark voneinander unterscheiden. Die Unterschiede können nur zum Teil auf die verschiedenen Energiedosen zurückgeführt werden, da selbst bei einer Messposition die Kurven relativ stark voneinander abweichen, wie dies in [Abbildung 3.3](#) für die Position zwei gezeigt wird. Trotz dieser Abweichungen können verlässliche Energiedosen berechnet werden, da die Dosimeter vor und nach dem Flug kalibriert werden. Die Kalibrierung wird nicht für jeden einzelnen Dosimeterkristall durchgeführt, sondern nur ausgewählte Dosimeterserien um den Arbeitsaufwand zu minimieren. Bei dieser Arbeit waren es beispielsweise drei Serien zu je acht Kristallen. Man sieht anhand der [Abbildung 3.9](#), dass die Kalibrierfaktoren bis auf eine vertikale Verschiebung einen identen Verlauf zeigen. Somit konnte die zuverlässige Kalibrierfähigkeit dieses neuerstellten Dosimetersets validiert werden.



[Abbildung 3.9:](#) Die Kalibrierfaktoren verschiedener TLD-300 der Pre-Flight, PFK-1 und PFK-2.

3.6 Einfluss des Temperns auf die Glühkurven und Kalibrierfaktoren

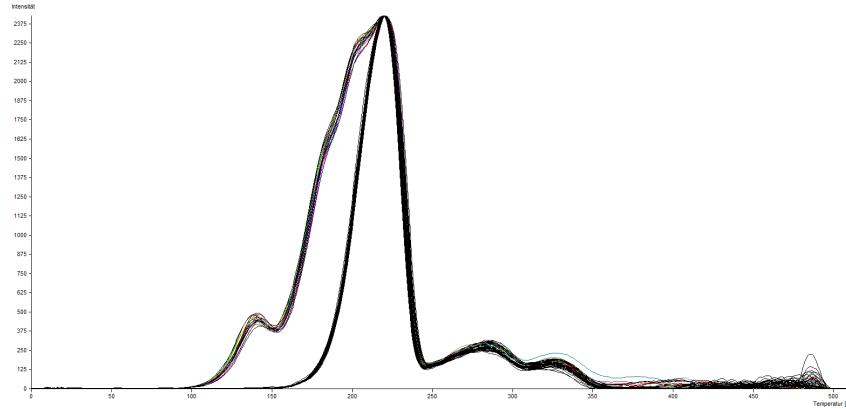


Abbildung 3.10: Alle TLD-600 Nettokurven der PFK-1 (nicht getempert) und PFK-2 (getempert). Die Kurven wurden bezüglich ihres Maximums normiert.

Wie bereits beschrieben, wurden die TLD-600 und TLD-700 bei der PFK-1 nicht getempert, wohingegen die TLD bei der PFK-2 diesem Prozess unterzogen wurden. Man kann anhand von [Abbildung 3.10](#) erkennen, dass der Peak fünf erhalten geblieben ist, wohingegen die Peaks zwei bis vier bereits durch die Wärmebehandlung bei 100 °C (thermisches Fading) verloren gegangen sind. Es kommt dadurch auch zu einer leichten Veränderung bezüglich der Höhe von Peak fünf. Betrachtet man die Kalibrierfaktoren (siehe [Abbildung 3.11](#)), kann man deutlich erkennen, dass die Faktoren der Pre-Flight und PFK-2 näher zueinander liegen sowie einen ähnlicheren Verlauf zeigen, während sie bei der PFK-1 stärker abweichen. Aufgrund dieser Beobachtungen ist es daher zu empfehlen, die TLD-600 und TLD-700 Chips bei den Kalibrierungen sowie bei der Weltraum-Auswertung konsistent zu behandeln. Das bedeutet, die Dosimeterchips entweder jedes mal zu tempern, oder dies zur Gänze wegzulassen. Es wurden daher für die spätere Berechnung des Korrekturfaktors zur Dosisberechnung nur die Werte der Pre-Flight und PFK-2 Kalibrierung verwendet. Dasselbe wurde für die TLD-700 durchgeführt und zusätzlich wurde der Wert für Kristall Nr. 15 entfernt (siehe [Abbildung 3.12](#)).

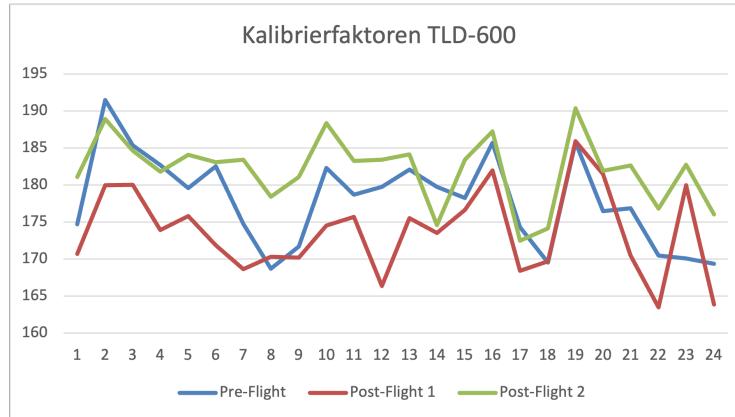


Abbildung 3.11: Die Kalibrierfaktoren (TLD-600) der Pre-Flight, PFK-1 und PFK-2.

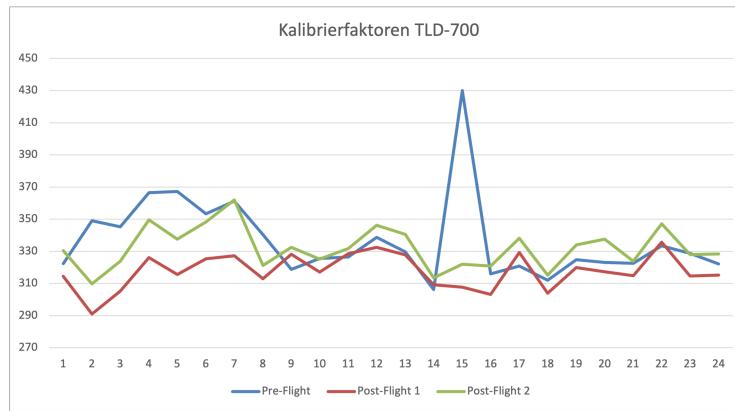


Abbildung 3.12: Die Kalibrierfaktoren (TLD-700) der Pre-Flight, PFK-1 und PFK-2.

3.7 Berechnung der Energiedosis

Um die genaue Weltraum-Dosis der einzelnen Messpositionen zu ermitteln, müssen einige Korrekturen durchgeführt werden. Die korrigierte Weltraum-Energiedosis wird gemäß folgender Formel berechnet [16, S. 50]:

$$D_{SEG \ Corr} = \left(\frac{I_{Peak\ 5\ (real)}}{Cal\ Fact\ (Pre) \cdot Corr\ Fact} - D_{mean\ BG} \right) \cdot 0,9206 \quad (3.5)$$

Dabei entspricht $I_{Peak\ 5\ (real)}$ der Höhe von Peak fünf, $Cal\ Fact\ (Pre)$ ist der durch die Pre-Flight Kalibrierung ermittelte Faktor und $Corr\ Fact$ ist der in

[Abschnitt 3.4](#) für die jeweiligen Dosimetertypen bestimmte Korrekturfaktor. $D_{mean\ BG}$ ist die Hintergrund-Dosis, welche durch das Background-Paket ermittelt wurde und von den Weltraumdosen abgezogen werden muss. Die hintergrundkorrigierte Dosis wird mit dem Faktor 0,9206 multipliziert, da im Weltraum durch das vorherrschende Mischfeld der kosmischen Strahlung ein SEG nicht exakt erfüllt wird [16, S. 45]. Somit erhält man die Weltraum-Energiedosis $D_{SEG\ Corr}$ eines Sekundärelektronengleichgewichts. Die Berechnung der Energiedosen wurde mit einer vorgefertigen Excel-Datei durchgeführt. Diese stammt aus den Dosis 3D Auswertungen der Vorjahre und wurde angepasst. Die relevanten Daten für die weitere Berechnung umfassen:

- **Annealing:** 27.10.2022
- **Launch:** 02.03.2023
- **Return:** 03.09.2023
- **Readout (TLD-300):** 04.10.2023
- **Readout (TLD-600):** 06.10.2023
- **Readout (TLD-700):** 10.10.2023

Das bedeutet, dass die Weltraumdosimeter 185 Tage im Weltraum waren. Die berechneten Energiedosen können in [Kapitel 4](#) betrachtet werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Position	TLD-600 [mGy]	TLD-700 [mGy]	TLD-300 [mGy]
1	58,48 ± 1,96	48,01 ± 1,70	52,04 ± 0,93
2	74,16 ± 2,18	59,29 ± 2,11	62,66 ± 2,96
3	50,38 ± 0,87	42,06 ± 0,98	45,21 ± 2,51
4	51,63 ± 2,44	44,45 ± 0,78	43,61 ± 2,20
5	54,48 ± 1,39	43,14 ± 0,87	43,83 ± 1,11
6	62,37 ± 1,47	54,68 ± 1,69	58,34 ± 2,98
7	59,64 ± 1,17	52,94 ± 0,69	55,27 ± 1,49
8	58,96 ± 1,22	49,65 ± 5,03	50,30 ± 1,03
9	48,52 ± 0,85	43,31 ± 0,87	42,60 ± 1,57
10	50,44 ± 1,36	43,58 ± 1,11	43,29 ± 0,64
11	64,31 ± 2,17	54,87 ± 1,68	56,00 ± 0,65

Tabelle 4.1: Die gesamte Energiedosis im Weltraum der verschiedenen Messpositionen und Dosimetertypen. Der angegebene Fehler entspricht der einfachen Standardabweichung gemäß [17].

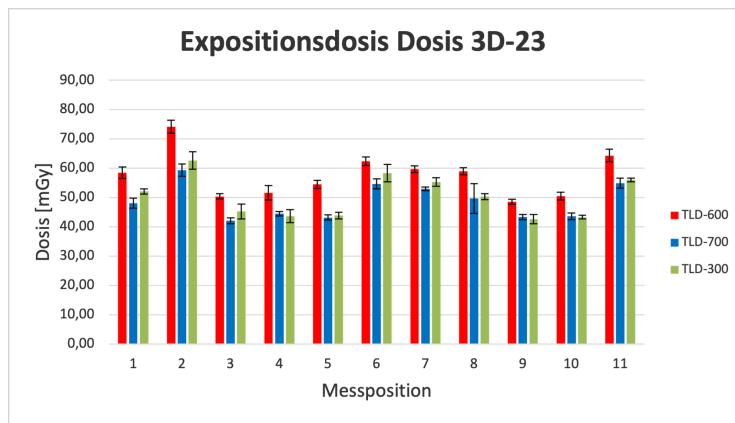


Abbildung 4.1: Die graphische Darstellung der gesamten Weltraum-Energiedosis der verschiedenen Messpositionen sowie Dosimetertypen.

Position	TLD-600 [$\mu\text{Gy/d}$]	TLD-700 [$\mu\text{Gy/d}$]	TLD-300 [$\mu\text{Gy/d}$]
1	$316,10 \pm 10,62$	$259,53 \pm 9,20$	$281,32 \pm 5,01$
2	$400,85 \pm 11,01$	$320,50 \pm 11,42$	$338,71 \pm 15,97$
3	$272,34 \pm 4,42$	$227,37 \pm 5,28$	$244,40 \pm 13,57$
4	$279,07 \pm 12,32$	$240,29 \pm 4,23$	$235,71 \pm 11,87$
5	$294,51 \pm 7,05$	$233,20 \pm 4,70$	$236,89 \pm 6,02$
6	$337,15 \pm 7,42$	$295,57 \pm 9,15$	$315,35 \pm 16,14$
7	$322,38 \pm 5,93$	$286,16 \pm 3,73$	$298,76 \pm 8,05$
8	$318,68 \pm 6,17$	$268,35 \pm 27,17$	$271,91 \pm 5,57$
9	$262,25 \pm 4,32$	$234,10 \pm 4,73$	$230,26 \pm 8,49$
10	$272,62 \pm 6,87$	$235,54 \pm 6,01$	$234,00 \pm 3,46$
11	$347,65 \pm 10,84$	$296,60 \pm 9,11$	$302,73 \pm 3,49$

Tabelle 4.2: Die tägliche Energiedosis im Weltraum der verschiedenen Messpositionen und Dosimetertypen. Der angegebene Fehler entspricht der einfachen Standardabweichung gemäß [17].

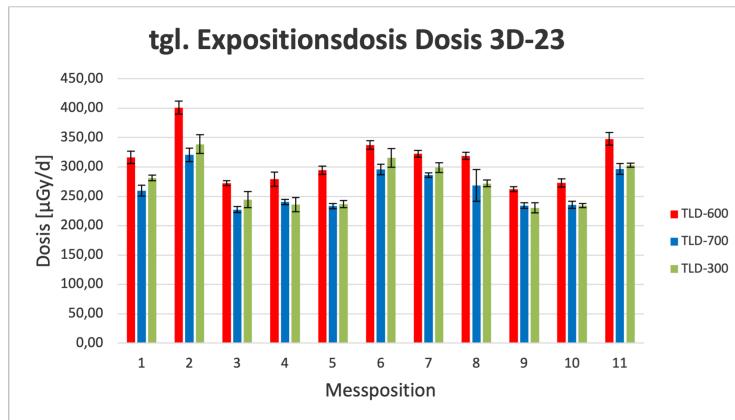


Abbildung 4.2: Die graphische Darstellung der gesamten Weltraum-Energiedosis der verschiedenen Messpositionen sowie Dosimetertypen.

Die Werte in Tabelle 4.1 sind in Abbildung 4.1 dargestellt und entsprechen der gesamten Weltraum-Energiedosis an den elf verschiedenen Messpositionen für einen Messzeitraum von 185 Tagen. In Tabelle 4.2 und Abbildung 4.2 sind die täglichen Expositionsdosens angeführt und geplottet. Die Dosen der TLD-300 und TLD-700 sind annähernd ident. Dies ist zu erwarten, da beide Dosimetertypen gegenüber γ -Strahlung sensiv sind, während die

höheren Werte der TLD-600 durch die zusätzlich gemessene Neutronendosis erklärbar sind. Im Vergleich zu den früheren Dosis 3D Auswertungen der Jahre 2013, 2014 und 2015 sind die Werte von 2023 etwas niedriger [16, S. 62-63], bewegen sich jedoch in einem ähnlichen Bereich. Die Energiedosen variieren jedoch während des Sonnenzyklus und hängen auch von der sich ändernden Entfernung der ISS von der Erde ab. Abschließend ist zu sagen, dass sich die Weltraum-Dosisbestimmung mit Thermolumineszenzdosimetern bewährt hat und durch die Pre- und Post-Flight Kalibrierung konsistente und genaue Daten liefert. Dies wurde in dieser Arbeit auch mit einem neuerstellten TLD-300 Set demonstriert, bei der trotz der unterschiedlicher Glühkurven und Peak-5-Höhen bei derselben Messposition dennoch eine genaue Energiedosis bestimmt werden konnte. Es konnte auch gezeigt werden, dass das Temperiern der TLD-600 und TLD-700 bei 100 °C einen eindeutigen Einfluss auf die Glühkurvenstruktur und folglich auch auf die Kalibrierfaktoren hat. Es wird daher empfohlen, eine konsistente Behandlung dieser Dosimeterarten bei den Kalibrierungen sowie bei der Weltraum-Auswertung beizubehalten.

Literatur

- [1] »NASA's SpaceX Crew-6 Mission, Crew-6 Returns Safely to Earth after Splashdown,« NASA. (4. Sep. 2023), Adresse: <https://blogs.nasa.gov/crew-6/> (besucht am 13. 11. 2023) (siehe S. 1).
- [2] »Kosmische Strahlung auf der ISS in 3D,« Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). (14. Dez. 2016), Adresse: https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2016/20161214_kosmische-strahlung-auf-der-iss-in-3d_20443 (besucht am 13. 11. 2023) (siehe S. 1, 11).
- [3] »SpaceX Crew-6,« NASA. (2023), Adresse: <https://www.nasa.gov/mission/spacex-crew-6/> (besucht am 13. 11. 2023) (siehe S. 1).
- [4] *Dosis 3D-23*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (siehe S. 2, 3).
- [5] »Was ist ionisierende Strahlung?« Bundesamt für Strahlenschutz. (24. März 2022), Adresse: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/einfuehrung/einfuehrung.html> (besucht am 06. 04. 2023) (siehe S. 4).
- [6] A. Dr. Musilek, *Technischer Strahlenschutz I, Kapitel 1: Grundlagen und Anwendungen*, Technische Universität Wien, 25. Nov. 2020. Adresse: <http://ati238-63.ati.tuwien.ac.at/~amusilek/Strahlenschutzunterlagen/> (besucht am 06. 04. 2023) (siehe S. 4).
- [7] A. Dr. Musilek, *Technischer Strahlenschutz I, Kapitel 11: Detektoren und Strahlungsmessung*, Technische Universität Wien, 13. Nov. 2020. Adresse: <http://ati238-63.ati.tuwien.ac.at/~amusilek/Strahlenschutzunterlagen/> (besucht am 06. 04. 2023) (siehe S. 4).
- [8] A. Dr. Musilek, *Technischer Strahlenschutz I, Kapitel 7: Wechselwirkung von Photonen mit Materie*, Technische Universität Wien, 25. Nov. 2020. Adresse: <http://ati238-63.ati.tuwien.ac.at/~amusilek/Strahlenschutzunterlagen/> (besucht am 06. 04. 2023) (siehe S. 4).

- [9] A. Dr. Musilek, *Technischer Strahlenschutz I, Kapitel 2: Radioaktiver Zerfall*, Technische Universität Wien, 25. Nov. 2020. Adresse: <http://ati.238-63.ati.tuwien.ac.at/~amusilek/Strahlenschutzunterlagen/> (besucht am 06.04.2023) (siehe S. 5).
- [10] H. Krieger, *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*, ger, 5. Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum, 2017, ISBN: 3662557606. DOI: [10.1007/978-3-662-55760-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55760-0) (siehe S. 5, 7).
- [11] H. Krieger, *Strahlungsmessung und Dosimetrie*, 3rd ed. 2021. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Imprint: Springer Spektrum, 2021, ISBN: 3658333898. DOI: [10.1007/978-3-658-33389-8](https://doi.org/10.1007/978-3-658-33389-8) (siehe S. 5–10).
- [12] N. Tsoulfanidis und S. Landsberger, *Measurement and Detection of Radiation*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015, ISBN: 9781482215496. Adresse: <https://books.google.at/books?id=A93WoQEACAAJ> (siehe S. 7–10).
- [13] R. Dipl.-Ing. Bergmann, *Thermoluminescent dosimetry and its applications*, Technische Universität Wien (siehe S. 10).
- [14] E. Benton und E. Benton, »Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond,« Englisch, *Nuclear instruments & methods in physics research. Section B, Beam interactions with materials and atoms*, Jg. 184, Nr. 1, S. 255–294, 2001, ISSN: 0168-583X (siehe S. 11, 12).
- [15] I. Schwingenschlögl, »Die Rolle von Thermolumineszenzdetektoren in der Dosimetrie,« Technische Universität Wien, 2008 (siehe S. 19, 20).
- [16] M. Blum, »Evaluierung der Strahlenexposition im Modul Columbus der ISS, einschließlich Untersuchung der Dosimeter-Kalibrierung,« Technische Universität Wien, Juli 2020 (siehe S. 24, 25, 28).
- [17] »STABW.N (Funktion),« Microsoft Corporation. (), Adresse: <https://support.microsoft.com/de-de/office/stabw-n-funktion-6e917c05-31a0-496f-ade7-4f4e7462f285> (besucht am 09.11.2023) (siehe S. 26, 27).