

## Strahlenrisiko auf Langzeitraumflügen

### Radiation risk during long-term space missions

#### Autoren

Christine E. Hellweg, Thomas Berger, Christa Baumstark-Khan

#### Institut

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Abteilung Strahlenbiologie, Köln

#### Key words

space radiation – risk of cancer – radiation syndrome – acute radiation damage – late radiation damage – cataract – neurodegenerative effects – MATROSHKA

#### Bibliografie

DOI 10.1055/a-0748-7956

#### Korrespondenzadresse

PD. Dr. med. vet. Christine E. Hellweg  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.,  
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin,  
Abt. Strahlenbiologie  
Linder Höhe, 51147 Köln  
E-Mail: christine.hellweg@dlr.de

#### ZUSAMMENFASSUNG

Der alte Menschheitstraum, nach den Sternen zu greifen und den Fuß auf unbewohnte Planeten zu setzen, rückt für den heutigen Menschen in unmittelbare Nähe. Die technisch mögliche Reise zu Mond oder Mars kann für den „Homo spatialis“ mit Sonnenstürmen und Partikelbeschuss gepflastert sein und birgt medizinische Risiken: Vor allem die erhöhte Strahlendosis der solaren und galaktischen Komponenten der Weltraumstrahlung (Elektronen, Protonen und hochenergetische schwere Teilchen) kann zu einem bedrohlichen Gesundheitsrisiko werden. Je nach Missionsdesign besteht die Möglichkeit, durch unvorhersehbare Sonnenstürme akute Strahlenschäden zu erleiden und, bedingt durch

die erhöhte biologische Wirksamkeit der galaktischen Strahlung, Langzeitschäden zu entwickeln. Abschätzungen zeigen, dass Astronauten während einer Marsreise mit einer Strahlenbelastung zu rechnen haben, die weit über dem amtlichen Grenzwert von jährlich 20 mSv für beruflich strahlenexponierte Personen in Europa liegt. Die Karrieredosis von Astronauten kann möglicherweise zu einem 3–4% erhöhten zusätzlichen Krebsrisiko führen. Des Weiteren ist mit einem früheren und häufigeren Auftreten von Katarakten zu rechnen. Das Risiko für neurodegenerative Effekte ist zurzeit schwer einschätzbar. Gegenmaßnahmen umfassen Abschirmung, Warnsysteme für Sonnenstürme und unter Umständen auch diätetische und pharmakologische Mittel.

#### ABSTRACT

The old human dream of reaching for the stars and setting foot on uninhabited planets is in the immediate vicinity of today's humans. The technically possible journey to the Moon or Mars can be paved for the „Homo spatialis“ with solar storms and particle bombardment and poses medical risks: above all the increased radiation dose of the solar or galactic components of space radiation (electrons, protons and high-energy heavy particles) can become a threatening health risk. Depending on the mission design, there is the possibility of experiencing acute radiation damage due to unpredictable solar storms and, due to the increased biological effectiveness of galactic cosmic radiation, of developing long-term damage. Estimates show that astronauts have to expect a radiation exposure during a trip to Mars, which is far above the official limit of 20 mSv annually for occupationally exposed persons in Europe. The career dose of astronauts may potentially lead to a 3–4% increased risk of cancer. Furthermore, an earlier and more frequent occurrence of cataracts can be expected. The risk of neurodegenerative effects is currently difficult to assess. Countermeasures include shielding, solar storm warning systems, and possibly dietary and pharmacological agents.

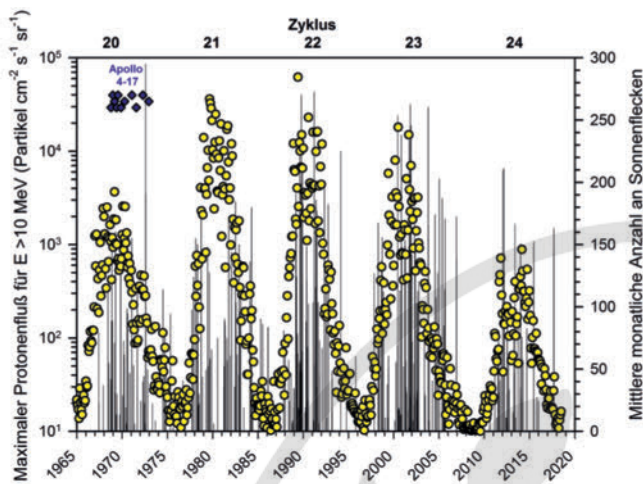
## Einleitung

Zurzeit findet die bemannte Raumfahrt im niedrigen Erdorbit auf der Internationalen Raumstation (ISS) mit einer Besatzung von 6 Astronauten statt. Missionen im Mondorbit sind in absehbarer Zeit geplant, mit einmonatigen Aufenthalten auf der cislunaren Station „Lunar Orbital Platform-Gateway“. Die bemannte Mission zum Mars ist das bisher ehrgeizigste Zukunftsprojekt der Raumfahrt und mit dem „Radiation Assessment Detector (RAD)“ auf dem „Curiosity Rover“ des „Mars Science Laboratory (MSL)“ [1] wurde erstmals die Strahlungsumgebung während des Fluges zum Mars [2] und auf dessen Oberfläche [3] gemessen. Neben der im Vergleich zur Erde im Weltraum oder auf anderen Planeten fehlenden beziehungsweise reduzierten Schwerkraft bleibt das

extraterrestrische Strahlenfeld mit seiner für den Menschen erfahrbaren anderen Qualität und höherer Quantität ein Risiko, das belastbar abgeschätzt und minimiert werden muss.

## Das Strahlenfeld im Weltraum

Die galaktische kosmische Strahlung (galactic cosmic rays, GCR) und die solaren energetischen Teilchen (solar energetic particles, SEP) sind die primären Komponenten des Strahlungsfelds im Weltraum. In der Nähe von Planeten, die von einem Magnetfeld umgeben sind, kommt eine dritte Strahlenkomponente hinzu: hochenergetische geladene Partikel, die in planetaren Magnetfeldern, den sogenannten Strahlungsgürteln, eingefangen sind.



Protonenflüsse: Wurden vom „Geostationary Operational Environmental Satellite“ (GOES) im geosynchronen Orbit gemessen und sind auf der Website des „Space Environment Service Center“ der „National Oceanic and Atmospheric Administration“ (NOAA) verfügbar [4].

- Anzahl der Sonnenflecken: Veröffentlicht das „Royal Observatory of Belgium“ regelmäßig im Internet [5].
- ◆ Zeitpunkte der bemannten Apollo-Missionen in Sonnenzyklus 20.

► **Abb. 1** Sonnenfleckenzahl und Protonenflüsse von 1965 bis heute.  
Quelle: Prof. Dr. Christa Baumstark-Khan

## Galaktische kosmische Strahlung

Die von allen Richtungen einfallende GCR entsteht außerhalb unseres Solarsystems. Ihr genauer Ursprung ist allerdings nicht ganz geklärt. So werden Supernovaausbrüche als mögliche Quellen diskutiert. GCR bestehen zu 98 % aus schweren Teilchen (Baryonen) und zu 2 % aus Elektronen. Die Baryonenkomponente setzt sich aus 87 % Protonen (Wasserstoffkerne), 12 % Alphateilchen (Heliumkerne) und weniger als 1 % schwererer Kerne mit Ordnungszahlen (Z) bis 92 (Uran) zusammen. Die Energie der GCR reicht über mehr als 15 Größenordnungen, von unter 1 MeV (Maßeinheit für Energie: Megaelektronenvolt =  $10^6$  Elektronenvolt, 1 MeV entspricht circa  $1,6 \cdot 10^{-13}$  Joule) bis zu mehr als  $10^{15}$  MeV.

Beim Eintreten in unser Sonnensystem muss die GCR den auswärts gerichteten Sonnenwind, dessen Intensität abhängig vom 11-jährigen Zyklus der Sonnenaktivität variiert, überwinden. Demzufolge variiert auch der Fluss der GCR mit dem Sonnenzyklus. Die solare Modulation bewirkt, dass der Teilchenfluss während des Minimums der Sonnenaktivität um den Faktor 2,5 größer ist als während des solaren Maximums. Für Teilchenenergien von zirka 200–700 MeV pro Nukleon (Nukleon = Kernteilchen [Protonen und Neutronen]) (MeV/n) werden während des solaren Minimums Flussraten von  $2 \times 10^3$  Protonen pro  $\mu\text{m}^2$

pro Jahr und 0,6 Fe-Ionen pro  $\mu\text{m}^2$  pro Jahr erreicht. Da die in einer Zelle applizierte Dosis proportional ist zum Quadrat der effektiven Ladung tragen die Eisenionen trotz ihrer relativ geringen Anzahl doch beträchtlich zur Gesamtdosis bei.

## Solare energetische Teilchen

Die SEP stammen von unserer Sonne. Sie setzen sich aus den niederenergetischen Partikeln des konstant von der Sonne emittierten Sonnenwinds und den mittlereenergetischen Partikeln aus Sonneneruptionen (solar flares) aus magnetisch instabilen Regionen der Sonne zusammen. Es handelt sich um Protonen, einem kleineren Anteil an Heliumkernen (~10 %) und einem noch kleineren Anteil an Neutronen, schweren Kernen und Elektronen (1 %).

Die Eruptionshäufigkeit variiert in kurzen (11-Jahres-Zyklus) und langen Zyklen (z. B. Schwabe-Zyklus). Der kurze Zyklus wird in 4 inaktive Jahre mit nur wenigen solaren Partikelereignissen (solar particle events, SPE) und 7 aktive Jahre mit einer höheren Anzahl an Sonnenflecken und einer höheren Wahrscheinlichkeit für große SPEs um das Aktivitätsmaximum der Sonne unterteilt (► Abb. 1). So wurden für den Zyklus 22 (1986–1996) nicht weniger als 8 Eruptionen mit einem hohen Anteil hochenergetischer Protonen gemessen. Die unvorhersehbaren, räumlich begrenzten Ereignisse in der Foto- und Chromosphäre der Sonne entwickeln sich schnell und nehmen Zeiträume von einigen Stunden bis Tagen ein.

Die Energiespektren und die Gesamtfluenz variieren erheblich von Ereignis zu Ereignis [3]. Bei großen Eruptionen können die emittierten Partikel Energien von mehreren hundert MeV/n bis zu GeV/n erreichen, die dabei absorbierten Dosen können für einen nur durch den Raumanzug geschützten Astronauten im freien Weltraum durch Auslösung des akuten Strahlensyndroms letal sein beziehungsweise ein Astronaut kann eine sehr hohe Hautdosis erhalten. Ein solches Ereignis fand beispielsweise zwischen den Mondmissionen Apollo 16 und 17 im August 1972 statt (► Abb. 1, Sonnenzyklus 20).

Insbesondere außerhalb des niedrigen Erdborbits ist zur Prävention solcher Expositionen ein Vorhersage- und Warnsystem erforderlich, sodass extravehikuläre Aktivitäten verschoben beziehungsweise rechtzeitig abgebrochen werden können und ein ausreichend abgeschirmter Schutzraum aufgesucht werden kann und/oder eine Schutzweste angelegt werden kann [3].

## Strahlungsgürtel der Erde

Die nach ihrem Entdecker benannten Van-Allen-Gürtel der Erde sind ringförmige Regionen eingefangener Protonen und Elektronen. Hier herrschen große Flüsse an hochenergetischen ionisierenden Partikeln sowie an Elektronen (bis 7 MeV), Protonen (bis 600 MeV) und einigen Schwerionen [6, 7]. Der äußere Gürtel enthält überwiegend Elek-

## STRAHLENEXPOSITION VON ASTRONAUTEN

### Galaktische kosmische Strahlung (galactic cosmic rays, GCR)

Abhängig von Sonnenzyklus und Abschirmung

- Chronische Ganzkörperexposition mit kleinen (mikroskopisch: hohen) Dosen
- 24/7-Exposition auf der ISS oder bei Explorationsmissionen
- Einzelne energiereiche Partikel (Elektronen, Protonen,  $\alpha$ -Partikel und schwere Ionen)

### Solare Partikelereignisse (solar particle events, SPE)

Abhängig von der Abschirmung

- Risiko einer akuten Ganzkörperexposition mit einer hohen Dosis
- Überwiegend Protonen
- Hohe Dosisraten möglich
- Gefährlich in Situationen mit unzureichender Abschirmung (z. B. während einer extravehikulären Aktivität)

### Eingefangene Partikel in den Strahlungsgürteln

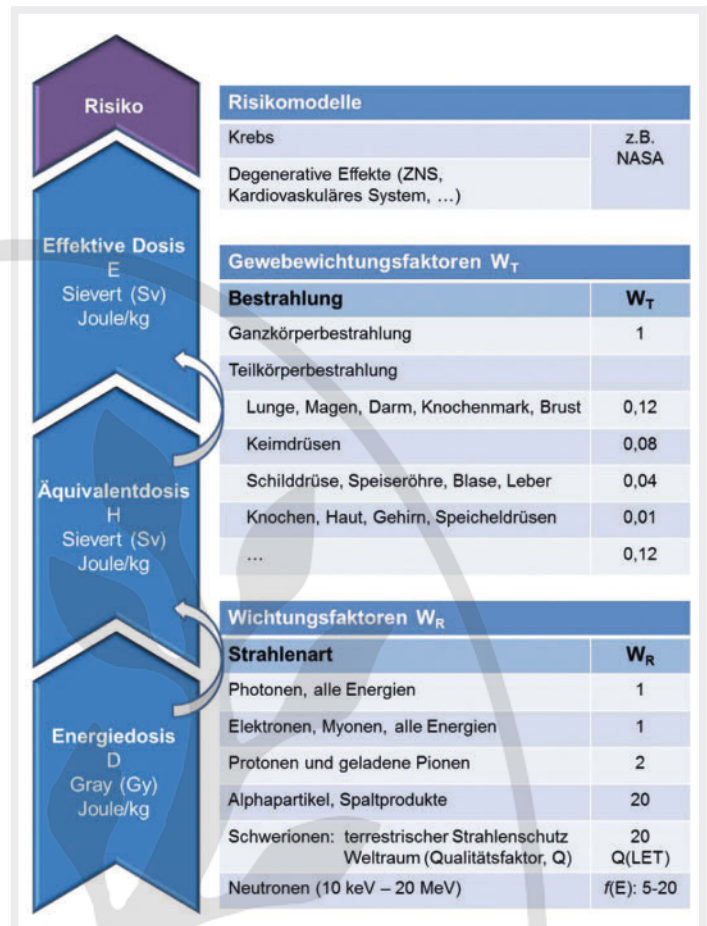
Abhängig von der Mission (Orbit und Flughöhe im erdnahen Orbit; Explorationsmission) und Sonnenaktivität

- ISS: Intermittierende Ganzkörperexposition mit niedrigen Dosen – Südatlantische Anomalie wichtig für akkumulierte Dosis
- Strahlungsgürtel werden bei Explorationsmissionen durchquert: kurze Ganzkörperexposition

tronen, der innere Gürtel größtenteils Protonen. Oberhalb des Südatlantik ist die Intensität des Erdmagnetfelds vermindert, was als Südatlantische Anomalie bezeichnet wird und teilweise damit erklärt werden kann, das die geneigte geomagnetische Dipolachse der Erde um circa 527 km in Richtung Nordwestpazifik versetzt ist [8]. Die ISS durchquert die SAA mehrmals täglich und die Partikelzählraten sind in dieser Region wesentlich höher als im Rest des ISS-Orbits [9]. Die Anhebung der ISS von 335 km Höhe (2009) auf 400–420 km (ab Mitte 2012) hat die Durchflugzeit durch die konusförmige SAA verlängert und damit den Beitrag der SAA zur Strahlendosis der ISS-Astronauten von 80  $\mu\text{Gy/d}$  (2009) auf 150  $\mu\text{Gy/d}$  (2013) erhöht [9].

### Sekundäre Strahlung

Durch Interaktion der GCR und SEP mit Materie entstehen durch Fragmentierung der Projektile oder der Zielatome Fragmente, Neutronen, Protonen, Alphateilchen, Elektronen, Röntgen- oder Gammastrahlung mit niedrigerer Energie als das Ausgangsteilchen. Diese sekundären Teilchen haben oft eine höhere biologische Wirksamkeit als die Ausgangsteilchen und insbesondere Neutronen tragen



► **Abb. 2** Von der Strahlenmessung (Energiedosis) über die Äquivalent- und effektive Dosis zum Risiko.

Quelle: PD Dr. Christine E. Hellweg, Prof. Dr. Christa Baumstark-Khan

zur bei Weltraummissionen akkumulierten biologisch gewichteten Dosis bei.

## Exposition mit Weltraumstrahlung

Im Weltraum wird der gesamte Körper des Astronauten, sowohl bei einem Aufenthalt im Innern des Raumfahrzeugs als auch bei den Raumspaziergängen, kontinuierlich bestrahlt (Übersicht Strahlenexposition von Astronauten). Aufgrund des breiten Energiespektrums der vorherrschenden Partikel und ihrer teilweise anisotropen Einfallrichtung sowie der unterschiedlichen Verteilung der Abschirmmassen um den Körper kommt es zu einer variablen Dosisverteilung in den einzelnen Organen des Körpers. Die Summe der in den einzelnen Organen deponierten und nach Strahlenart gewichteten Dosen ist die Körperdosis (in Sv) (► Abb. 2, effektive Dosis).

Die effektive Dosis wird verwendet, um das Risiko der Strahlenbelastung bei Weltraummissionen abzuschätzen. Sie wird zurzeit noch aus Messungen der Hautdosen unter Verwendung von Korrekturfunktionen mittels Strahlungstransportmodellen rekonstruiert. Die Validität solcher Mo-

► Tab. 1 Strahlungsmessungen auf der Internationalen Raumstation (ISS).

	Flächenmonitoring	Tiefendosisverteilung	Personendosimetrie
Zweck	Messung der Ortsdosis an verschiedenen Positionen in der ISS, Ermittlung von Einflussgrößen des Strahlenfelds, Optimierung der Abschirmung, Validierung von Strahlentransportmodellen	Bestimmung der Organdosen und der effektiven Dosis als Grundlage für die Abschätzung des Strahlenrisikos, Validierung von Strahlentransportmodellen	Bestimmung der persönlichen Dosis der Astronauten als Teil der medizinischen Betreuung, Grundlage für die Abschätzung des persönlichen Strahlenrisikos
Passive Detektoren	Thermolumineszenzdetektoren (TLDs), Kernspurdetektoren (CR39)		
Aktive Detektoren	Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC), Dosimetrieteleskope (z. B. DOSTEL), Szintillator/Siliziumdetektoren		z. B. Europäisches aktives Dosimeter (EAD)
Ermittelte Dosisrate	647 $\mu\text{Sv/d}$ (Mai 2016) [9]	Außen auf ISS: 700 $\mu\text{Sv/d}$ In ISS: 530–570 $\mu\text{Sv/d}$ [10, 13]	Private medizinische Daten

delle wird mithilfe von humanen Phantomen, bestehend aus natürlichen menschlichen Knochen, eingebettet in Organe und Gewebe darstellendes gewebeäquivalentes Plastikmaterial (Polyurethan) verschiedener Dichte, in der Weltraumexperimentserie MATROSHKA überprüft.

Für die Organdosismessungen im Weltraum wurden in die einzelnen Scheiben mehrere Tausend passive Detektoren (Thermolumineszenzdetektoren) aus gewebeäquivalentem Material und mehrere aktive Detektoren eingesetzt. Die Messungen zeigen eine Dominanz der aus den Strahlungsgürteln der Erde stammenden Teilchen (Elektronen und Protonen) außen auf der ISS, während in ihrem Inneren die Partikel der GCR (Schwerionen) vorherrschen. Die im Phantom gemessenen Werte zeigen, je nach Lokalisation des Phantoms, eine Hautdosis von 0,2–2,4 mGy pro Tag und 0,12–0,2 mGy pro Tag für die inneren Organe [10].

Die Hautdosis wird durch Kombination von Thermolumineszenz- und Kernspurdetektoren (CR39) als persönliche passive Dosimeter bestimmt [11]. Die „European Crew Personal Dosimeter“ (EuCPD) wurden von der Arbeitsgruppe Biophysik, Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, DLR, und der European Space Agency (ESA) für die europäischen Astronauten entwickelt. Jeder Astronaut wird mit 3 Dosimeterpaketen ausgestattet – eins für intravehikuläre Aktivitäten, eins für Weltraumspaziergänge und ein Referenzpaket, das am Schlafplatz deponiert wird [12]. Die Auswertung der Dosimeter erfolgt nach Rückkehr auf die Erde.

Das Flächenmonitoring des Strahlenfelds auf der Raumstation erfolgt ebenfalls mittels passiver und aktiver Detektoren und wird im Columbus-Modul von einem vom DLR angeführten Konsortium durchgeführt. Die Strahlenbelastung hängt ab von sonnenzyklusabhängigen Variationen, Veränderungen in der Flughöhe des ISS und Veränderungen des ISS-Höhe durch Andocken der Transportvehikel [9] und variiert innerhalb des Columbus-Moduls um bis zu 50 % in Abhängigkeit von der Abschirmdicke [12]. Eine

Übersicht über die Dosimetrie auf der ISS ist in Tabelle 1 dargestellt.

Messungen außerhalb des niedrigen Erdorbits erfolgen während der MSL-Mission mit dem „Radiation Assessment Detector“ (RAD), der sich auf dem „Curiosity Rover“ befindet. Die Dosisrate während der Passage zum Roten Planeten betrug 77  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde [2] und 26  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde auf der Marsoberfläche (zum Vergleich: auf der Kölner Domplattform werden Dosen von 0,1  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde gemessen).

## Strahlenwirkung auf Menschen und assoziierte Risiken

Die Wirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper wird entweder als deterministische Strahlenwirkung (akute Effekte) oder als stochastische Strahlenwirkung (verzögerte Effekte) charakterisiert. Deterministische Strahlenschäden sind dadurch gekennzeichnet, dass die Schwere des Schadens mit der Dosis der Strahlung zunimmt. In der Regel besteht ein Schwellenwert, ab dem Symptome zu beobachten sind. Stochastische Strahlenschäden treten zufallsbedingt auf und die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens steigt mit der Dosis. Ihr Ausprägungsgrad ist dagegen von der Dosis unabhängig.

Akute Effekte treten dann auf, wenn eine große Strahlendosis in einem kurzen Zeitraum (einige Minuten bis wenige Tage) appliziert wird. Solche Expositionen können unmittelbar kritisch für Erfolg der Mission sein. Späteffekte, wie die Entstehung strahleninduzierter Tumoren oder von Linsentrübungen, werden in dem Dosisbereich beobachtet, der zu gering ist, um akute, zum Tod führende, Effekte auszulösen (akutes Strahlensyndrom). Für beide Arten von Risiko wird eine monoton steigende Abhängigkeit von der Strahlendosis angenommen; daraus resultiert eine Korrelation mit Weltraumparametern wie Strahlenfeld und Strahlenqualität und gleichzeitig mit der Missionsdauer.

► **Tab. 2** Strahlenexposition auf der Internationalen Raumstation (ISS) und bei einer Marsmission.

Missionstyp	Dosisrate*		Missionsdauer	Missionsdosis*	Referenz
ISS	22–27 $\mu\text{Sv/h}$	0,53–0,65 mSv/d	180 d	95–120 mSv	[9, 12, 13]
Marsmission (gesamt)	-	-	1000 d	1060 mSv	[2]
• Hin- und Rückreise	77 $\mu\text{Sv/h}$	1,85 mSv/d	360 d	662 mSv	
• Marsoberfläche	26 $\mu\text{Sv/h}$	0,62 mSv/d	640 d	397 mSv	

\* Abhängig von Sonnenaktivität und Abschirmung beziehungsweise Flughöhe der ISS

► **Tab. 3** Das akute Strahlensyndrom (acute radiation syndrome, ARS).

Dosis	Beginn der Symptome	Symptome	Sterblichkeit
<b>Prodromalstadium</b>			
< 1 Gy	Wenige Stunden	Übelkeit, Erbrechen und Unwohlsein	
<b>Hämatopoietisches Syndrom</b>			
0,7–4 Gy	Tage oder Wochen nach Prodromalsymptomen	Leukopenie, Anämie (Knochenmarksdepression), Durchfälle, Zahnfleischbluten, Haarausfall, Infektionen	≥ 20 % > 50 % bei 4 Gy
<b>Gastrointestinales Syndrom</b>			
6–8 Gy	4–5 Tage nach Prodromalsymptomen	Leukopenie, Anämie (Knochenmarksdepression), schwere blutige Durchfälle, blutiges Erbrechen, Zahnfleischbluten, Haarausfall, Infektionen, Sepsis	Trotz Therapie ≥ 50 % Ab 7,5 Gy Überleben unwahrscheinlich
<b>Neurovaskuläres Syndrom</b>			
20–40 Gy	Minuten bis Stunden	Schweres Erbrechen, Schwindel, Krämpfe, Benommenheit, Kreislaufsymptome bis Kollaps	100 %

## Akutes Strahlensyndrom

Die Ausprägung des akuten Strahlensyndroms hängt ab von absorbierter Dosis, Art der Strahlung und individueller Strahlenempfindlichkeit (► Tab. 3). Nach Exposition mit niedrigen Dosen verarmt das besonders strahlenempfindliche Stammzellkompartiment im Knochenmark. Bei höheren Dosen werden zusätzlich die intermediär empfindlichen Zellen des Differenzierungskompartiments der Dünndarmschleimhaut geschädigt, sodass sich das Darmepithel nicht turnusgemäß regenerieren kann und sich ablöst. Bei sehr hohen Dosen werden strahlenresistente reife Nervenzellen geschädigt.

Für Explorationsmissionen sind die prodromalen Symptome und das hämatopoietische Syndrom relevant, da die auslösenden Dosen bei einem großen bis extrem großen SPE erreicht werden könnten. Bei dem solaren Sturm vom August 1972 wäre ein Astronaut im Raumanzug auf der Mondoberfläche einer Knochenmarksdosis von circa 4 Gy ausgesetzt worden (die  $LD_{50/30}$  ist die Dosis, die das Absterben von 50 % einer Population innerhalb von 30 Tagen bewirkt). Tabelle 4 gibt die aktuellen Grenzwerte der National Aeronautics and Space Administration (NASA) für akute Effekte und die maximale Karrieredosis für Nicht-Krebs-Effekte an.

## Neurogenerative Effekte

Effekte der GCR auf das Zentralnervensystem (ZNS) werden als „space-brain“ zurzeit intensiv diskutiert und sie umfassen kognitive Defizite und neurologische Schäden [15], die nach Bestrahlung von Mäusen und Ratten mit schweren Ionen mit verschiedenen Tests beobachtet wurden [16]. Die Defizite betreffen das Gedächtnis, Lernprozesse, die Orientierung im Raum, die Motorfunktion, Reaktionszeit und können sich auch als depressionsähnliches Verhalten und Fatigue äußern [17, 18]. Die Effekte werden bei Nagetieren in dem Dosisbereich beobachtet, der für ISS- und Explorationsmissionen relevant ist und halten ein Jahr nach Exposition an [18].

Mögliche funktionale und strukturelle Veränderungen im Gehirn umfassen oxidativen Stress, Neuroinflammation, Abbau der neuronalen Architektur und synaptischen Integrität [19]. Besonders ausgeprägte Effekte werden für schwere Ionen mit Ordnungszahlen über 10 ( $Z > 10$ ) erwartet, deshalb hat die NASA einen zusätzlichen Grenzwert für die Exposition des ZNS mit diesen Ionen eingeführt (► Tab. 4) [14]. Inwieweit bei Astronauten ein Risiko für kognitive Defizite und für ein früheres Auftreten von Demenz besteht, ist ungeklärt.

► **Tab. 4** Grenzwerte für Kurzzeiteffekte und Nicht-Krebs-Effekte während der gesamten Karriere bei Weltraummissionen, NASA Standard 3000 [14].

Organ	30-Tage-Grenzwert	1-Jahres-Grenzwert	Karrieregrenzwert
Augenlinse*	1000 mGy-Eq	2000 mGy-Eq	4000 mGy-Eq
Haut	1500 mGy-Eq	3000 mGy-Eq	6000 mGy-Eq
Blutbildende Organe	250 mGy-Eq	500 mGy-Eq	n/a
Kreislaufsystem**	250 mGy-Eq	500 mGy-Eq	1000 mGy-Eq
Zentralnervensystem (ZNS) ***	500 mGy	1000 mGy	1500 mGy
ZNS *** (Z > 10)		100 mGy	250 mGy

mGy-Eq, milliGray-Equivalent: Diese Dosis basiert auf der für den Effekt und die Strahlenart spezifischen relativen biologischen Wirksamkeit (relative biological effectiveness, RBE) und der Energiedosis. Die RBE beschreibt das Verhältnis der Energiedosis einer Referenzstrahlung  $D_{Ref}$ , die einen bestimmten biologischen Effekt hervorruft, zur Dosis einer Teststrahlung  $D_{Test}$ , die für das Eintreten der gleichen Wirkung unter gleichen Bedingungen am gleichen biologischen Objekt notwendig ist:  $RBE = D_{Ref}/D_{Test}$ . Die RBE ist abhängig von der Art des biologischen Endpunkts, der applizierten Dosis, dem Linearem Energietransfer (LET) und der Energiedosis. Für Nicht-Krebs-Effekte auf Augenlinse, Haut, blutbildende Organe und das Kreislaufsystem werden eine RBE von 6 für Neutronen (1–5 MeV) bzw. 3,5 (5–50 MeV), 2,5 für Schwerionen und 1,5 für Protonen mit einer Energie über 2 MeV empfohlen. Die RBE für ZNS-Effekte ist noch weitgehend unbekannt, deshalb ist der Grenzwert als Energiedosis in mGy angegeben, mit einem zusätzlichen Limit für Ionen mit einer Ordnungszahl > 10.

\* Diese Grenzwerte verhindern Kataraktbildung innerhalb von 5 Jahren. Katarakte durch geringe GCR-Dosen können zurzeit nicht verhindert werden.

\*\* Durchschnittliche Grenzwerte für Herzmuskel und angrenzende Arterien

\*\*\* Diese Grenzwerte wurden für den Hippocampus berechnet.

## Effekte auf kardiovaskuläres System

Ein Risiko für kardiovaskuläre Erkrankungen durch chronische Exposition mit GCR wird aus Daten der Atombombenüberlebenden in Japan [20] und Metaanalysen von beruflichen Expositionen oder Umweltexpositionen abgeleitet [21, 22]. Das relative Risiko für alle Arten von kardiovaskulären Erkrankungen wurde bei einer Dosis von 1 Sv auf 1,10–1,20 geschätzt [21, 22]. Eine Publikation zur angeblich erhöhten kardiovaskulären Mortalität bei Apollo-Astronauten [23] löste eine kontroverse Debatte aus und wird aufgrund von Mängeln in der Datensammlung und -analyse als nicht haltbar angesehen [24]. In der US-amerikanischen Astronautenpopulation war die Mortalität durch Herz-Kreislauf-Krankheiten signifikant geringer als in der US-Bevölkerung, was durch die rigorose Astronautenauswahl und den gesunden Lebensstil der Astronauten erklärt wird [24]. Die aktuellen Grenzwerte der NASA für das Kreislaufsystem sind in Tabelle 4 aufgelistet.

## Strahleninduzierte Neoplasien

Das Auftreten verschiedener radiogener Tumoren erfolgt nach einer Latenzzeit von mehreren Jahren bis zu 2–3 Jahrzehnten, von Leukämien bereits nach einigen Jahren. Statistisch signifikant nachgewiesen ist der Zusammenhang zwischen Tumorinzidenz und Exposition erst für Dosen > 0,2 Sv [25, 26]. Das stochastische Risiko bei kleinen Expositionen wird daher aus Strahlenexpositionen bei hohen Dosen (> 0,1 Sv) und Dosisleistungen durch Extrapolation zu niedrigen Dosiswerten und Dosisleistungen unter Verwendung des „dose-rate reduction effectiveness factor“ (DDREF) abgeschätzt [27]. Aus praktischen Überlegungen geht man im Strahlenschutz von einer linearen Extrapolation des Mortalitätsrisikos als Funktion

der Dosis ohne Annahme eines Schwellenwerts aus (linear, no threshold, LNT). Der gegenwärtig angenommene Wert für die Steigung der Geraden beträgt  $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$  für die Induktion von zusätzlichen Krebsfällen durch chronische Bestrahlung unter terrestrischen Bedingungen. Bei der Übertragung auf Weltraummissionen bestehen Unsicherheiten bezüglich der Strahlenqualität, der relativen biologischen Wirksamkeit (RBE), die als Qualitätsfaktor (Q) in die Berechnung eingeht (► Abb. 2) [28], und anderen, dosis- und reaktionsmodulierenden Faktoren wie zum Beispiel dem Einfluss der Schwerelosigkeit, in der Größenordnung von 400–600 % [29].

Für den Betrieb der ISS im erdnahen Orbit wurde die Forderung gestellt, dass jegliche Exposition dem ALARA-Prinzip (As low as reasonably achievable, ALARA) zu folgen hat und so gering als möglich ist und dass das zu erwartende lebenslange zusätzliche Krebsrisiko durch Weltraumstrahlung unter 3 % beträgt [30]. Die Abschätzungen für die durch Exposition mit der kosmischen Strahlung bedingten Ganzkörperdosen für die Marsmission zeigen, dass diese Forderung aufgrund der Expositionen durch die GCR, je nach Szenarium, schwer zu realisieren sein kann. Die aktuellen Grenzwerte der Weltraumagenturen sind in Tabelle 5 verzeichnet.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass es sich um ein berechnetes Krebsrisiko handelt, und dass in der kleinen Population von bisher etwa 550 Raumfahrern eine statistisch signifikante Erhöhung der Tumorinzidenz nicht nachweisbar ist und auch auf absehbare Zeit ein Nachweis wegen der hohen Rate an nicht radiogenen Tumoren und der kleinen Population nicht möglich sein wird.

► **Tab. 5** Geschlechts- und altersabhängige Grenzwerte für die effektive Dosis, die im Laufe der Karriere bei Weltraummissionen angesammelt werden darf.

Weltraumagentur	Geschlecht	Karrieregrenzwert (in Sv): Alter (in Jahren) bei erster Exposition*			
		30	35	45	55
NASA	Weiblich	0,47	0,55	0,75	1,10
	Männlich	0,62	0,72	0,95	1,50
JAXA	Weiblich	0,60	0,80	0,90	1,10
	Männlich	0,60	0,90	1,00	1,20
CSA, ESA, Roscosmos	Weiblich/Männlich	1,00	1,00	1,00	1,00

\*Das Alter bei erster Exposition bestimmt den Karrieregrenzwert (in Sv); NASA: National Aeronautics and Space Administration, USA; CSA: Canadian Space Agency; ESA: European Space Agency; Roscosmos: Russian Space Agency;

## Strahleninduzierte Katarakte

Die Augenlinse als Organ mit sich lebenslang teilenden Linsenepithelzellen, die im Falle einer Schädigung nicht eliminiert werden können und zu einer Trübung führen können, ist besonders strahlenempfindlich. Im Rahmen der „NASA's Longitudinal Study of Astronaut Health“ (LSAH) ergab der Vergleich von Astronauten mit höheren Linsendosen (> 8 mSv) mit Astronauten, deren Linse einer Dosis unter 8 mSv ausgesetzt war, ein erhöhtes Kataraktisiko bei einer Exposition > 8 mSv [31]. Die aktuellen Grenzwerte (► Tab. 4) sind im Hinblick auf den aktuellen Schwellenwert der „International Commission on Radiological Protection“ (ICRP) von 0,5 Sv (0–1 Sv) [32] sehr hoch angesetzt und verhindern die Kataraktogenese durch GCR nicht. Sofern die Katarakt erst nach Beendigung einer Mission zu Visuseinschränkungen führt, kann sie chirurgisch beseitigt werden, was während einer Marsmission eine größere Herausforderung wäre.

## Entwicklung von Gegenmaßnahmen

Der beste Strahlenschutz, nicht nur im Weltraum, ist die Vermeidung beziehungsweise Expositionsreduktion durch umsichtige Missionsplanung und Abschirmung. Die Abschirmung eines Raumschiffs liegt im Bereich von 5–20 cm Wasser (5–20 g/cm<sup>2</sup>), während die Abschirmung des Raumanzuges eines Astronauten bei einem Weltraumspaziergang auf durchschnittlich 1 cm Wassersäule (1 g/cm<sup>2</sup>) schrumpft. Gegen die solare Komponente der kosmischen Strahlung und dabei insbesondere gegen deren niederenergetische Bestandteile, ist eine Abschirmung hocheffektiv. Ein SPE-Warnsystem soll auf der NASA Orion EM-1-Mission getestet werden. Durch Aluminium ist für die hochenergetischen Partikel der galaktischen Komponente eine Reduktion der GCR-Dosis um nicht mehr als 30 % zu erreichen. Leichte Materialien mit hohem Wasserstoffgehalt, so zum Beispiel Polyethylen, sind wesentlich effektiver; trotzdem kann, da das Gewicht der Abschirmung nicht unbegrenzt erhöht werden kann, nicht mehr als 50 % der Dosis in der Abschirmung absorbiert werden.

Neben geeigneten Strahlenschutzräumen werden auch persönliche Strahlenschutzwesten getestet.

Aus biomedizinischen Gesichtspunkten kann eine sensible Astronautenauswahl dazu führen, dass gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die Weltraumstrahlung und deren Folgen reduziert werden können. So ist für ältere Besatzungsmitglieder der zu erwartende Verlust an gesunder Lebenszeit geringer als es für jüngere der Fall ist. Außerdem können Astronauten jenseits des reproduktionsfähigen Alters nicht zu einer Erhöhung der Zahl von teratogenen oder genetischen Schäden in einer Population beitragen, da sie keine Nachkommen mehr zu erwarten haben. Für die Induktion bestimmter Tumorarten besteht zudem ein geschlechtsspezifischer Zusammenhang. Dies könnte die Auswahl männlicher Besatzungen begünstigen, da Frauen ein zusätzliches Brustkrebsrisiko aufweisen. Demgegenüber stehen allerdings aus psychologischer Sicht die Vorteile einer gemischten Besatzung. Nicht zuletzt ist die Existenz einer interindividuellen Strahlenempfindlichkeit, wie sie für UV-Licht durch die verschiedenen Hauttypen demonstriert wird, für Exposition mit ionisierender Strahlung bei Weitem nicht geklärt.

Auch eine medikamentöse oder diätische Intervention kann als Strahlenschutzmaßnahme verstanden werden. So wird die Anreicherung der Nahrung mit Radikalfängern und Antioxidantien zum Schutz vor reaktiven Sauerstoffspezies erwogen. Im Tierexperiment haben mit Beeren oder getrockneten Pflaumen angereicherte Futtermittel gute Erfolge gezeigt [33, 34]. Die Gabe von Zytokinen wie Granulozyten-Kolonie-stimulierendem Faktor (G-CSF) [35] oder die Aktivierung von überlebensfördernden intrazellulären Signalwegen [36, 37] zur Therapie des ARS wird diskutiert, allerdings sollte diese durch geeignete Warnsysteme verhindert werden.

## Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

## Literatur

- [1] National Aeronautics and Space Administration. Mars Science Laboratory. Im Internet: <http://mars.nasa.gov/msl>
- [2] Zeitlin C, Hassler DM, Cucinotta FA et al. Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory. *Science* 2013; 340: 1080–1084
- [3] Carnell L, Blattnig S, Hu S et al. Evidence Report: Risk of acute radiation syndromes due to solar particle events. In: Lyndon B. Johnson Space Center. Human Research Program. Houston; 2016
- [4] NOAA Space Environment Services Center. Solar Proton Events Affecting the Earth Environment. Im Internet: <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/>
- [5] Sunspot Index and Longterm Solar Observations. Sunspot Number. Im Internet: <http://sidc.oma.be/sunspot-data/>
- [6] Reitz G. Characteristic of the radiation field in low Earth orbit and in deep space. *Z Med Phys* 2008; 18: 233–243
- [7] Nelson GA. Space Radiation and Human Exposures, A Primer. *Radiat Res* 2016; 185: 349–358
- [8] Fraser-Smith AC. Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles 1600–1985. *Reviews of Geophysics* 1987; 25: 1–16
- [9] Berger T, Burmeister S, Matthiä D et al. DOSIS & DOSIS 3D: radiation measurements with the DOSTEL instruments onboard the Columbus Laboratory of the ISS in the years 2009–2016. *J Space Weather Space Clim* 2017; 7: A8
- [10] Reitz G, Berger T, Bilski P et al. Astronaut's organ doses inferred from measurements in a human phantom outside the international space station. *Radiat Res* 2009; 171: 225–235
- [11] Straube U, Berger T, Reitz G et al. Operational radiation protection for astronauts and cosmonauts and correlated activities of ESA Medical Operations. *Acta Astronaut* 2010; 66: 963–973
- [12] Berger T, Przybyla B, Matthiä D et al. DOSIS & DOSIS 3D: long-term dose monitoring onboard the Columbus Laboratory of the International Space Station (ISS). *J Space Weather Space Clim* 2016; 6: A39
- [13] Berger T, Bilski P, Hajek M et al. The MATROSHKA experiment: results and comparison from extravehicular activity (MTR-1) and intravehicular activity (MTR-2A/2B) exposure. *Radiat Res* 2013; 180: 622–637
- [14] Williams R. NASA Space Flight Human-System Standard Volume 1, Revision A: Crew Health. In: National Aeronautics and Space Administration. NASA Technical Standards. Washington, D.C.; 2015
- [15] Jandial R, Hoshide R, Waters JD et al. Space-brain: The negative effects of space exposure on the central nervous system. *Surg Neurol Int* 2018; 9: 9
- [16] Shukitt-Hale B, Casadesus G, Cantuti-Castelvetri I et al. Cognitive deficits induced by 56Fe radiation exposure. *Adv Space Res* 2003; 31: 119–126
- [17] Parihar VK, Allen BD, Caressi C et al. Cosmic radiation exposure and persistent cognitive dysfunction. *Sci Rep* 2016; 6: 34774
- [18] Parihar VK, Maroso M, Syage A et al. Persistent nature of alterations in cognition and neuronal circuit excitability after exposure to simulated cosmic radiation in mice. *Exp Neurol* 2018; 305: 44–55
- [19] Acharya MM, Baddour AA, Kawashita T et al. Epigenetic determinants of space radiation-induced cognitive dysfunction. *Sci Rep* 2017; 7: 42885
- [20] Shimizu Y, Kodama K, Nishi N et al. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950–2003. *BMJ* 2010; 340: b5349
- [21] Little MP. Radiation and circulatory disease. *Mutat Res* 2016; 770 (Pt B): 299–318
- [22] Little MP, Azizova TV, Bazyka D et al. Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. *Environ Health Perspect* 2012; 120: 1503–1511
- [23] Delp MD, Charvat JM, Limoli CL et al. Apollo Lunar Astronauts Show Higher Cardiovascular Disease Mortality: Possible Deep Space Radiation Effects on the Vascular Endothelium. *Sci Rep* 2016; 6: 29901
- [24] Cucinotta FA, Hamada N, Little MP. No evidence for an increase in circulatory disease mortality in astronauts following space radiation exposures. *Life Sci Space Res (Amst)* 2016; 10: 53–56
- [25] Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950–1997. *Radiat Res* 2003; 160: 381–407
- [26] Pierce DA, Preston DL. Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. *Radiat Res* 2000; 154: 178–186
- [27] Cucinotta FA. A new approach to reduce uncertainties in space radiation cancer risk predictions. *PLoS One* 2015; 10: e0120717
- [28] Cucinotta FA. Biophysics of NASA radiation quality factors. *Radiat Prot Dosimetry* 2015; 166 (1–4): 282–289
- [29] Cucinotta FA, Schimmerling W, Wilson JW et al. Space radiation cancer risks and uncertainties for Mars missions. *Radiat Res* 2001; 156 (5 Pt 2): 682–688
- [30] Cucinotta FA. Space radiation risks for astronauts on multiple International Space Station missions. *PLoS One* 2014; 9: e96099
- [31] Cucinotta FA, Manuel FK, Jones J et al. Space radiation and cataracts in astronauts. *Radiat Res* 2001; 156 (5 Pt 1): 460–466
- [32] Hamada N, Sato T. Cataractogenesis following high-LET radiation exposure. *Mutat Res* 2016; 770 (Pt B): 262–291
- [33] Rabin BM, Shukitt-Hale B, Joseph J et al. Diet as a factor in behavioral radiation protection following exposure to heavy particles. *Gravit Space Biol Bull* 2005; 18: 71–77
- [34] Schreurs AS, Shirazi-Fard Y, Shahnazari M et al. Dried plum diet protects from bone loss caused by ionizing radiation. *Sci Rep* 2016; 6: 21343
- [35] Romero-Weaver AL, Ni J, Lin L et al. Orally Administered Fructose Increases the Numbers of Peripheral Lymphocytes Reduced by Exposure of Mice to Gamma or SPE-like Proton Radiation. *Life Sci Space Res (Amst)* 2014; 2: 80–85
- [36] Burdelya LG, Gleiberman AS, Toshkov I et al. Toll-like receptor 5 agonist protects mice from dermatitis and oral mucositis caused by local radiation: implications for head-and-neck cancer radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2012; 83: 228–234
- [37] Toshkov IA, Gleiberman AS, Mett VL et al. Mitigation of Radiation-Induced Epithelial Damage by the TLR5 Agonist Entolimod in a Mouse Model of Fractionated Head and Neck Irradiation. *Radiat Res* 2017; 187: 570–580