

Strahlen aus dem Weltall

Risiken für Astronauten und Elektronik

Gerade einmal gut vierzig Jahre sind vergangen, seit der erste Sputnik die Welt faszinierte, und nun greift die Menschheit im wörtlichen Sinne nach den Sternen. Nicht mehr nur der Mond ist das Ziel, unser nächster Planet – Mars – wird schon angepeilt. Amerika und Rußland planen in sehr konkreter Weise eine bemannte Expedition. Die für das Jahr 2002 fest vorgesehene „Internationale Raumstation Alpha“ stellt dazu nur einen Zwischenschritt dar. Auch alle kleinen Pannen auf der „MIR“, welche die Medien so gern aufbauschen, ändern nichts daran: Die Technik der Weltraumfahrt hat so enorme Fortschritte gemacht, daß die Gefahren des Transports in den Hintergrund getreten sind, obwohl sie immer noch bestehen und nur durch eine akribische Logistik beherrscht werden können.



Foto: ESA

Langzeitaufenthalte im Raum sind eine beinahe alltägliche Realität geworden, und es stellen sich neue Fragen, die zu Beginn nicht die Bedeutung hatten, die sie heute einnehmen müssen: Welchen Risiken ist der Mensch im Raum ausgesetzt, wenn die Technik des Transports sicher geworden ist? Zum einen ist es die sogenannte Schwerelosigkeit (der Wissenschaftler spricht lieber von „Mikrogravitation“), zum anderen die im Vergleich zur Erde drastisch erhöhte Strahlung. Während man im ersten Fall in begrenztem Maße Gegenmaßnahmen durch ausgeklügelte Trainingsprogramme ergreifen kann, ist gegen die Strahlengefährdung im wahrsten Sinne des Wortes „kein Kraut“ gewachsen. Es hat lange gedauert, bis die NASA sich des Strahlenproblems annahm, nun unternimmt sie aber große Anstrengungen, die damit verbundenen Probleme eingehend zu untersuchen. Deutsche Gruppen haben sich schon frühzeitig damit beschäftigt, der im letzten Jahr verstorbene Biophysiker Horst Bücker hat sich schon zu Beginn der siebziger Jahre – erst in Frankfurt, später bei der DLR in Köln – mit dieser Problematik auseinandergesetzt. Die Gießener Biophysik untersucht seit mehr als zwanzig Jahren die biolo-

gische Wirkung beschleunigter schwerer Teilchen, eben derjenigen Partikel, die auch im Weltraum eine wichtige Rolle spielen.

Strahlung ist ein immerwährender Begleiter in unserem Umfeld, ohne das Licht der Sonne könnte Leben nicht existieren. Daß Strahlen aber auch schädigen können, braucht man heute nicht mehr besonders zu betonen, da die Proteste gegen Castor-Transporte die ganze Republik erschüttern. Es kann nicht häufig genug gesagt werden – Strahlung ist nicht gleich Strahlung, es kommt auf die Energie an (manche sagen auch Härte). Sichtbares Licht, Mikrowellen, Radiowellen sind „weich“ – das heißt, sie transportieren wenig Energie –, Röntgen- und Gammastrahlen sind „hart“. Nur sie sind in der Lage, Atomen Elektronen zu entreißen – das heißt, sie zu ionisieren –

und Moleküle zu zerbrechen. Wie kleine, äußerst intensive Geschosse verändern sie die Erbsubstanz unserer Körperzellen, unterbinden die lebensnotwendige Zellteilung oder verändern die Eigenschaften in einer Weise, daß Krebs entstehen kann. Die Gesundheitsschäden der Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki haben dies der ganzen Welt deutlich vor Augen geführt. Viel ist mittlerweile über die diesen Vorgängen zugrundeliegenden Mechanismen bekannt, was es auch erlaubt, kategorisch zu erklären, daß „weiche“ Strahlen diese Wirkungen nicht haben.

Das Leben ist mit der Strahlung groß und alt geworden, wahrscheinlich war sie sogar ein wichtiger Motor der Evolution. Um sich vor einem Übermaß an Mutationen zu schützen, haben schon sehr einfache Organis-

men Gegenmaßnahmen ergriffen durch die Entwicklung von Reparaturmechanismen, welche es erlauben, Schäden im Genom zu erkennen und in begrenztem Maße rückgängig zu machen (Seite 72ff.)

Wie schon angedeutet, gibt es viele verschiedene Strahlenarten, nicht nur Wellenstrahlung (ionisierend sind davon aber nur Röntgen- und Gammastrahlung), sondern auch solche in Form geladener Partikel wie Elektronen, schnelle Wasserstoffkerne (Protonen), Heliumkerne (Alpha-Teilchen) und noch schwerere geladene Teilchen. Ebenso gehört die Neutronenstrahlung hierher, die aus ungeladenen Teilchen mit ungefähr der Masse eines Protons besteht.

„Die Dosis macht es“, hat schon Paracelsus festgestellt. Dies gilt auch für die Strahlenwirkung, aber nicht

Strahlung – Größen und Einheiten

Strahlung ist Transport von Energie. Sie kann entweder in Form elektromagnetischer Wellen oder von Partikeln auftreten. Diese unterscheiden sich in Masse und Ladung. Die Masse wird in „atomaren Masseneinheiten“ (Abkürzung: u), die Energie in „Elektronenvolt“ (eV) angegeben:

$$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Die Ladung wird auf die „Elementarladung“ (entspricht $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb) bezogen. Elektromagnetische Strahlung ist masselos, kann nach Planck aber durch „Energiequanten“ (Photonen) charakterisiert werden.

Typische Quantenenergien von Wellenstrahlungen

Strahlenart	Quantenenergie in eV
Radiowellen	$10^{-8} - 10^{-5}$
Mikrowellen	$10^{-5} - 10^{-1}$
Infrarot	0,1 - 1
sichtbares Licht	2 - 5
Ultraviolett	5 - 100
Röntgenstrahlen	500 - 500 000
Gammastrahlen	10 000 - 10 000 000

Einige wichtige Partikel sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Typische Partikelstrahlungen

Name	Masse in atomaren Einheiten	Ladung in Elementarladungen	Freies Vorkommen
Proton	1	+1	Weltraum
Neutron	1	0	obere Atmosphäre
Elektron	1/1836	-1	Atmosphäre, in der Umwelt aus Radioaktivität
Alphateilchen	4	+2	Weltraum, in der Umwelt aus Radon
Kohlenstoffatomkerne	12	+6	Weltraum
Eisenatomkerne	56	+26	Weltraum

in ganz einfacher Weise. Strahlung überträgt Energie, konsequenterweise wird die Dosis in Joule/kg gemessen, wobei man den speziellen Namen „Gray“ (Gy) verwendet, benannt nach dem 1965 verstorbenen englischen Physiker und Strahlenbiologen Louis Harold Gray, einem Schüler des Nobelpreisträgers William Lawrence Bragg. Es ist eindrucksvoll, sich die biologischen oder medizinischen Wirkungen der Energiebeträge zu veranschaulichen. Eine für den Menschen mittlere letale Dosis (5 Gy) entspricht gerade einmal einem Tausendstel der Menge, die man bei dem Verzehr des Inhalts eines Joghurtbechers zu sich nimmt. Es ist also nicht die Menge an Energie, die tödlich wirkt, sondern die Form, in der sie die Zellen unseres Körpers erreicht, nämlich als sehr effektive, kleine Geschosse, als

„Quanten“. Dies hat schon zu Beginn dieses Jahrhunderts der Frankfurter Biophysiker Friedrich Dessauer erkannt, womit er einen Grundstein zur Entwicklung der modernen Molekularbiologie legte. Aber nicht nur der Energieinhalt der Strahlung spielt eine Rolle, auch die Art, wie sie im Gewebe deponiert wird. Hinterläßt sie eine dichte Spur enganeinanderliegender Ionisationen, so ist die Wirkung ungleich größer, auch wenn die gesamte Energie gleich geblieben ist. Man muß also die Dosis noch mit einem „Strahlenwichtungsfaktor“ multiplizieren, um eine Abschätzung für die biologische Wirkung zu erhalten. Diese neue, für den Strahlenschutz bedeutsame Größe nennt man „Äquivalenzdosis“ und mißt sie in „Sievert“ (Sv), benannt nach dem schwedischen Strahlenforscher Ru-

dolf Sievert. Früher war das „rem“ gebräuchlich, der Umrechnungsfaktor ist 100, das heißt, 1 Sv entspricht 100 rem.

Auf der Erde spielen in der natürlichen Umgebung im wesentlichen nur Gammastrahlen und Alphateilchen eine Rolle, Neutronen entstehen bei Kernprozessen und sind nur im Umfeld der Kernenergie zu finden. Alle anderen Strahlenarten haben an der Strahlenbelastung des Normalbürgers kaum einen Anteil, abgesehen natürlich von der medizinischen Anwendung der Röntgenstrahlen. Im Weltraum ist alles anders: Elektromagnetische Strahlen spielen im primären Feld praktisch keine Rolle, die ionisierende Komponente besteht nur aus geladenen Teilchen, Protonen, Alphateilchen und einer Reihe schwerer Atomkerne bis zum Eisen. Sie kommen ent-

Friedrich Dessauer
Jahrgang 1881, baute, um sich sein Studium der Elektrotechnik und Physik zu finanzieren, in Aschaffenburg die ersten Röntgenapparate für medizinische Anwendungen. Im Dezember 1918 wurde er Mitglied der Zentrumspar-
teii, weil er sie „für die am wenigsten schlechte Partei“ hielt. 1920 wurde Dessauer an die Universität Frankfurt berufen, wo er das „Institut für Physikalische Grundlagen der Medizin“ gründete. Mit seinen Forschungen über die biologische Wirkung ionisierender Strahlen gehörte er zu den Begründern der Biophysik. Von 1924 bis 1933 ging er als Zentrumsabgeordneter in den Reichstag. Als Hauptgesellschafter der „Rhein-Mainischen Volkszeitung“ wurde Dessauer zur Zielscheibe der Frankfurter Nationalsozialisten. 1933 kam er in Untersuchungshaft und ging schließlich mit fünfzig Reichsmark in der Tasche ins Exil nach Istanbul, später nach Fribourg in der Schweiz. 1951 kehrte er an die Universität Frankfurt zurück und hielt trotz schwerer Strahlenkrankheit bis kurz vor seinem Tod 1963 noch Vorlesungen, die zunehmend um Themen der Philosophie kreisten.

Strahlenwirkung – Größen und Einheiten

Die physikalische Grundgröße für die Wechselwirkung von Strahlung und Materie ist die „Energiedosis“, welche die pro Masse absorbierte Energie angibt. Sie wird gemessen in Joule pro Kilogramm und trägt den speziellen Namen „Gray“ (Gy).

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

Früher wurde das „rad“ benutzt: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

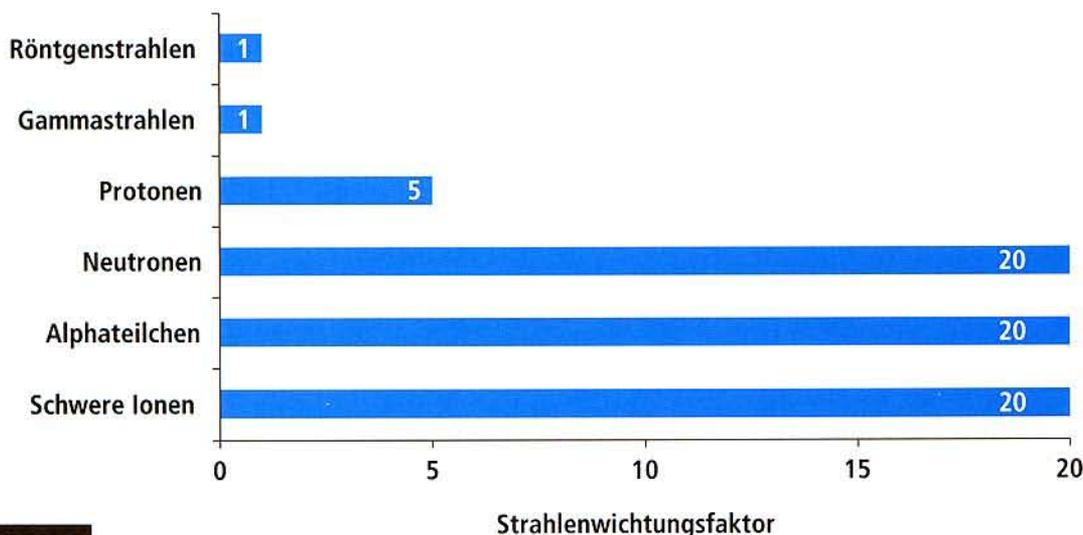
Die Dosis allein ist nicht ausschlaggebend für die biologische Wirkung, die außerdem von der Ionisierungsdichte abhängt. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu

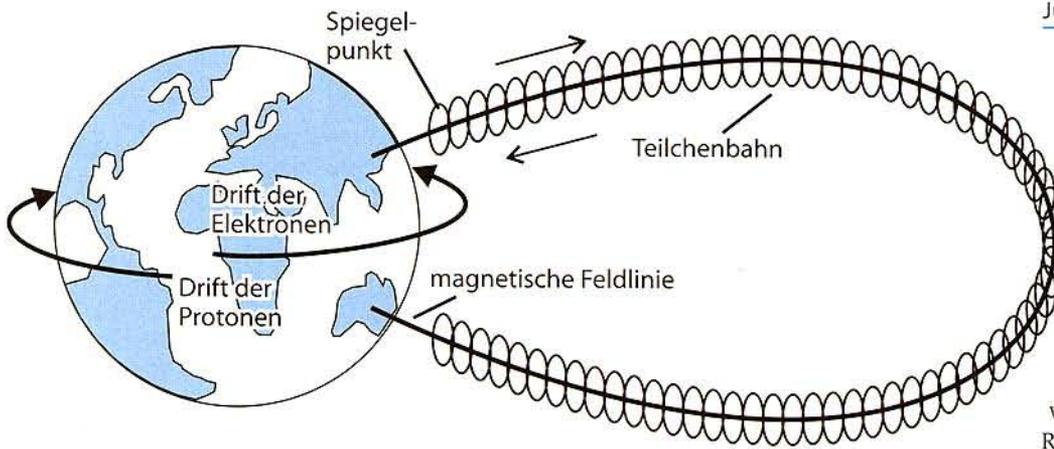
tragen, werden „Strahlenwichtungsfaktoren“ eingeführt, mit denen die physikalisch erfaßte Energiedosis zu multiplizieren ist. Man erhält dann die „Äquivalenzdosis“, welche im Strahlenschutz die entscheidende Kenngröße zur Abschätzung des Risikos darstellt. Sie wird gemessen in „Sievert“ (Sv). Die ältere Einheit war das „rem“.

$$\text{Äquivalenzdosis} = \text{Energiedosis} \times \text{Strahlenwichtungsfaktor}$$

(Einheit: Sievert = Strahlenwichtungsfaktor \times Gray
 $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$)

Typische Strahlenwichtungsfaktoren sind im folgenden Diagramm dargestellt:





weder aus der Tiefe des Weltalls (galaktische Komponente) oder von unserer Sonne. Der Energiebereich, der von ihnen überstrichen wird, erstreckt sich über circa 20 Größenordnungen und erreicht Werte, die weit über die Leistungen auch der größten und aufwendigsten Beschleuniger hinausgeht (ein einziges solches Proton enthält mehr Bewegungsenergie als der Aufschlag von Boris Becker). Auf der Erde allerdings kommen sie nicht an. Dafür gibt es zwei Gründe: Unser Planet besitzt ein Magnetfeld, das die langsameren der geladenen Partikel ablenkt. Dabei werden sie von den Magnetfeldlinien gewissermaßen eingefangen und pendeln in spiralförmigen Bahnen von Pol zu Pol. Hierdurch entstehen die berühmten Strahlungsgürtel, die nach van Allen benannt sind, die sie 1958 mit unbemannten Satelliten identifizier-

te. Es gibt zwei von ihnen. Der erste erstreckt sich in Höhen von circa 2000 bis 4000 km und enthält vor allem Protonen. Der zweite liegt zwischen 10.000 und 20.000 km und speichert vor allem Elektronen. Die Höhenangaben sind allerdings nicht so genau zu nehmen: Da das Erdmagnetfeld an einigen Stellen „verbeult“ ist, gibt es Regionen, wo die Strahlungsgürtel vergleichsweise nahe an die Oberfläche unseres Planeten herankommen. Eine solche liegt im südlichen Atlantik vor der Küste Brasiliens, die „südatlantische Anomalie“ mit einer Höhe von „nur“ 350 km. Da die bemannten Satelliten auf ihrem Flug die ganze Erdoberfläche überstreichen, geraten sie regelmäßig in diese strahlungsreiche Zone, was den Hauptanteil der erhaltenen Strahlung ausmacht.

Energierichere Partikel kommen bis zu unserer Atmosphäre, in der sie dann ihr Schicksal ereilt. Sie stoßen mit den Kernen der Stickstoff- und Sauerstoffatome zusammen, wobei zum einen diese teilweise fragmentiert werden, zum anderen können durch Kernreaktionen radioaktive Stoffe gebildet werden, die man als „kosmogene“ Radionuklide bezeichnet. Diese Vorgänge sind die Quelle des Radiokohlenstoff (C-14) und des radioaktiven Wasserstoffs Tritium. Würden sie nicht auf die beschriebene Weise kontinuierlich nachgeliefert, so wären sie wegen ihrer kurzen Halbwertszeit (5700 bzw. 12 Jahre) längst aus unserer Umwelt verschwunden. Bei den Zusammenstößen entsteht eine ganze Reihe neuer Teilchen, geladene und ungeladene, die ihrerseits häufig noch weitere Reaktionen durchführen können, so daß ein primäres Ion am Anfang einer vielverzweigten Kaskade stehen kann. Die oberen Schichten unserer Atmosphäre sind voll von regelrechten „Teilchenschauern“. Nur wenige von ihnen gelangen bis zur Erde, das, was man als den Anteil der kosmischen Strahlung im Strahlenfeld unserer Umgebung bezeichnet, besteht vor allem aus Elektronen und Mesonen. Wichtig sind auch noch die Neutronen. Sie sind ungeladen und biologisch besonders wirksam. Auf der Erde kommen sie natürlicherweise praktisch nicht vor. In großen Höhen ist das anders. Hier entstehen sie bei den beschriebenen Kernprozessen und bilden einen wichtigen Teil der Belastung für Flugpersonal und Passagiere.

Das beschriebene Szenario führt zu einer paradoxen Situation: Man sollte meinen, daß die Strahlenbelastung mit steigender Höhe kontinuierlich zunimmt. Das ist aber durchaus nicht so: Die biologische Wirksamkeit der vielen neuen Teilchen (vor allem der Neutronen) ist größer als die der primären Komponente, so daß in einer Höhe von circa 20 km ein Maximum der biologisch wirksamen Dosis festzustellen ist. Dies ist gerade der Bereich, in welchem Ultraschallflugzeuge operieren. Für Astronauten ist darüber hinaus noch bedeutsam, daß sie regelmäßig die Ausläufer des unteren

Höherteilchenschauer

Die primäre Weltraumstrahlung besteht in der Hauptsache aus Protonen, Alphateilchen und zu einem geringen Anteil aus schwereren Kernen. Ihre Energien erstrecken sich über einen sehr großen Bereich (bis zu 10^{20} eV). Bei dem Auftreffen auf die Lufthülle initiieren sie Kernreaktionen, als deren Folge radioaktive Elemente, aber auch eine große Zahl sekundärer Teilchen entstehen. Dazu

gehören (sekundäre) Protonen, Neutronen, Mesonen und Elektronen. Außerdem tritt noch elektromagnetische Strahlung auf. Auch die sekundären Produkte verfügen in der Regel noch über genügend Energie, so daß sie ihrerseits noch weitere Reaktionen starten können.

So kommt es in den obersten Schichten der Lufthülle zu Teilchenkaskaden, nur wenige erreichen allerdings die Erdoberfläche, wo sie zur Umgebungsstrahlung beitragen.



Strahlungsgürtels durchqueren. So ist zu verstehen, daß die Strahlenbelastung in der relativ niedrig fliegenden Raumstation (circa 450 km) durchaus größer ist als im extraterrestrischen Raum.

Was bisher beschrieben wurde, charakterisiert gewissermaßen den „Normalfall“. In Zeiten hoher Sonnenaktivität kann es darüber hinaus zu sehr erheblichen Eruptionen kommen, bei denen sehr große Mengen geladener Teilchen – vor allem Protonen und Alphateilchen – ins Weltall hinausgeschleudert werden, so daß die Dosen in kurzer Zeit um mehrere Zehnerpotenzen ansteigen können. Diese *solar flares* sind unvorhersagbar, ihre Wirkung kann unter Umständen sogar zu einer unmittelbaren Bedrohung in Form akuter Strahlenschäden führen, ganz abgesehen von dem ohnehin bestehenden Langzeitrisko wie Krebs und Erbveränderungen. Eine auch nur annähernd ausreichende Abschirmung scheidet im Raumschiff vor allem an Gewichtproblemen.

Biologische Wirkungen der Welt- raumstrahlung

Das Strahlenfeld im Weltraum ist zwar ungleich stärker als das in unserem Umfeld auf der Erde, aber es ist dennoch nicht intensiv genug, um seine Wirkungen auf biologische Objekte unmittelbar zu erfassen. Es gibt zwar experimentelle Ansätze, sie sind jedoch sehr aufwendig und können deshalb nur Teilerkenntnisse liefern, die natürlich sehr wichtig sind. Ergänzt und ausgebaut werden müssen sie durch gezielte Studien auf der Erde. Sie gehen zunächst von der Kenntnis der verschiedenen Komponenten der Welt-
raumstrahlung aus und untersuchen systematisch deren Effekte auf ausgewählte Modellobjekte. Hierbei spielen vor allem Säugerzellen eine große Rolle, die in den letzten Jahren von verschiedenen Arbeitsgruppen systematisch studiert worden sind. Dies wurde möglich durch Großbeschleuniger, die ursprünglich für die kernphysikalische Forschung konzipiert wurden, aber auch für die Biophysik von unschätzbarem Wert sind. Pionierarbeit auf diesem Gebiet wurde im kalifornischen Berkeley geleistet, wo schon in den dreißiger Jahren von Ernest O. Lawrence

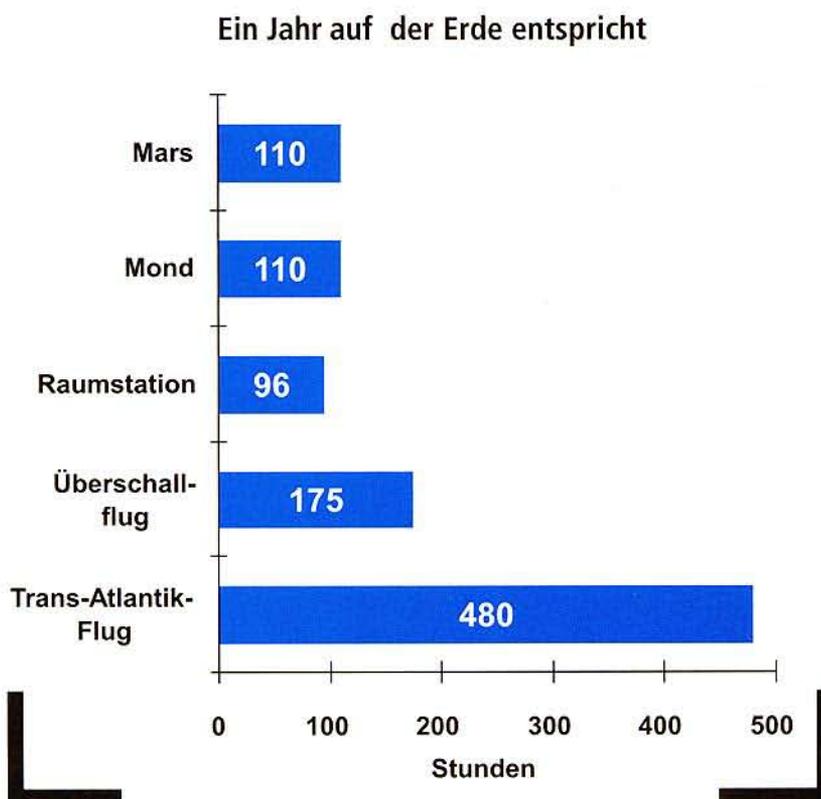
(Nobelpreis 1939) die ersten Ringbeschleuniger (Zyklotron) konzipiert wurden. Diese Entwicklung fand seinen ersten Höhepunkt in dem „Bevalac“, in dem auch schwerere Ionen auf sehr große Energien beschleunigt werden konnten. Leider ist diese grandiose Maschine aus Geldgründen vor einigen Jahren abgeschaltet und mittlerweile demontriert worden. Der erste Beschleuniger, der es ermöglichte, alle Kerne des periodischen Systems zu beschleunigen, wurde bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt gebaut. Er ist in seiner Vielseitigkeit bis heute einmalig auf

der Welt. Kleinere Teilchenbeschleuniger für schwere Ionen gibt es noch in Rußland und Japan.

Um die Besonderheit der biologischen Wirkung schwerer geladener Teilchen zu verstehen, wie sie im Weltraum vorkommen, muß man sich klarmachen, daß die Art der Energieübertragung anders verläuft als bei konventionellen Röntgen- oder Gammastrahlen. Diese erzeugen bei ihrer Interaktion zunächst in großer Zahl Elektronen, welche die Zellen unseres Körpers durchsetzen und dabei Energie übertragen. Die Einzelbeträge sind relativ gering – die Menge macht es. Diese

Höhenabhängigkeit der Strahlenbelastung

Die mittlere jährliche Äquivalenzdosis auf der Erde beträgt 2,4 mSv, wobei der Anteil aus der kosmischen Strahlung auf Meereshöhe circa 12 Prozent (0,3 mSv) ausmacht. Er steigt mit der Höhe an, in ca. 20 km erreicht er ein Übergangsmaximum. Dies kommt dadurch zustande, daß die biologisch relativ unwirksamen, schnellen kosmischen Teilchen auf Grund der Wechselwirkung mit der Atmosphäre in andere effektivere Partikel umgewandelt werden, vor allem Neutronen. In noch größeren Höhen überwiegt dann wieder die primäre Strahlung. Eine Vorstellung vermittelt die folgende Abbildung, in der angegeben wird, in wieviel Stunden unter verschiedenen Bedingungen das Äquivalent eines Jahres auf der Erde erreicht wird:



Situation führt dazu, daß bei einer bestimmten Strahlendosis alle Teile des Körpers ungefähr in gleichem Maße Schäden davontragen. Bei schweren geladenen Teilchen ist das ganz anders. Sie übertragen schon bei einem Einzeldurchgang sehr viel Energie, was bedeutet, daß zum Erreichen einer bestimmten Dosis eine viel geringere Zahl als bei Elektronen notwendig ist. Dies heißt aber nicht anderes, als daß auch die Zahl der Treffer entsprechend niedriger liegt und daß nicht alle Zellen gleichermaßen betroffen sind. Das Energiedepositionsmuster ist daher ausgesprochen heterogen: Nur wenige Zellen erhalten einen Treffer, während die meisten ungetroffen davonkommen. Man hat sich also für die Wirkung einzelner Ionen auf individuelle Zellen zu interessieren, was experimentell eine neue Situation schafft. Bisher ist man dabei rein statistisch vorgegangen, das heißt, man hat aus den Effekten auf

eine große Zahl von Zellen die Reaktionen einzelner Teilchen „herausgerechnet“. Erst in den letzten zwei Jahren ist es möglich geworden, wirklich auf der Einzelzellebene zu arbeiten, bisher aber nur mit Strahlung aus leichten Atomkernen.

Die Gießener Biophysik hat vor mehr als zwanzig Jahren die ersten biologischen Versuche in Darmstadt durchgeführt und die Arbeiten seither konsequent weitergeführt. In der letzten Zeit haben wir uns vor allem auf die Veränderung der genetischen Information konzentriert, und es ist uns gelungen, die weltweit größte Datenbasis über die Mutationsauslösung durch schwere Ionen zu erstellen. Während in der Anfangsphase die Experimente vor allem mit leichter handhabbaren Mikroorganismen wie Hefezellen durchgeführt wurden, hat sich nun das Interesse auf Säugerzellen konzentriert.

Mutationen spielen für die Ab-

schätzung des Strahlenrisikos eine Schlüsselrolle. Werden sie in den Keimzellen eines Menschen ausgelöst, so können sie in der Nachkommenschaft zu schwerwiegenden Erbschäden führen („genetisches Strahlenrisiko“). Aber auch in anderen Körperzellen sind sie keineswegs harmlos. Sie können die Eigenschaften so verändern, daß es zur Induktion eines Tumors kommt. Mutationen sind sicher nicht der einzige Auslöser einer solchen Entartung, aber sie tragen einen erheblichen Anteil daran.

Betrachtet man die beschriebene Situation mit schweren geladenen Teilchen, so ist man mit einem speziellen Problem konfrontiert. Da schon bei einem einzigen Durchgang sehr hohe Energiemengen deponiert werden, sollte man meinen, daß die Zellen unmittelbar abgetötet würden. Es wäre dann unerheblich, ob eine Mutation induziert worden wäre – eine Zelle, die sich nicht mehr teilen kann, stellt keine Gefahr dar, da sie ihre veränderte Information nicht mehr weitergeben kann. Etwas salopper formuliert: Eine tote Zelle ist eine gute Zelle – jedenfalls in Bezug auf das Krebsrisiko. Nun sind schwere Ionen zwar sehr effektiv im Hinblick auf die Zelltötung, wovon man bei der Strahlentherapie recht erfolgreich Gebrauch macht, aber nicht jede Teilchenpassage führt zum Zelltod, übrigens auch nicht bei den bisher schwersten untersuchten, den Uran-Ionen. Falls die Zellen jedoch überleben, dann ist die Wahrscheinlichkeit der Mutationsauslösung recht hoch. Sie liegt – bezogen auf dieselbe Strahlendosis – bei Heliumkernen (Alphateilchen) um ca. einen Faktor 20 höher als bei Röntgenstrahlen. Bei schwereren Kernen nimmt sie wieder ab, weil dann der Einfluß der Abtötung überwiegt, aber sie verschwindet nicht. Das bedeutet, daß auch ein einziges Teilchen den Beginn eines Tumors auslösen kann. Die Wahrscheinlichkeit ist zwar sehr gering, weil viele andere Faktoren noch eine Rolle spielen (z. B. das Immunsystem), aber sie ist nicht zu vernachlässigen. Es ist daher verständlich und notwendig, daß die Weltraumagenturen diesen Fragen verstärkte Beachtung zuwenden.

Wege der Strahlenschädigung

Alle Lebensvorgänge beruhen auf der Reaktionen von Molekülen. Die Bindungen, welche sie zusammenhalten, werden durch Elektronen vermittelt. Strahlung genügender Energie kann sie aus ihren Bahnen werfen – dieser Vorgang wird als *Ionisation* bezeichnet. Röntgen-Gamma-, Alphastrahlen können dies bewirken, schnelle schwere Atomkerne auch, sichtbares Licht, Mikro- und Radiowellen dagegen nicht. Eine Ionisation im genetischen Material einer Zelle, der Desoxyribonukleinsäure (DNA) kann deren Struktur nachhaltig verändern – Zelltod, Mutationen und krebserzeugende Entartung können die Folge sein.

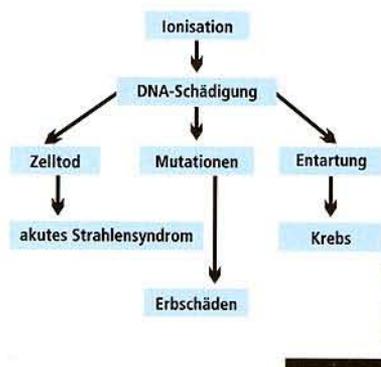
Zelltod beeinträchtigt die Funktion besonders der Organe, welche auf eine laufende Erneuerung durch Zellteilung angewiesen sind - Haut, Magen-Darm-Trakt, Blutbildungssystem, Immunsystem. Zu große

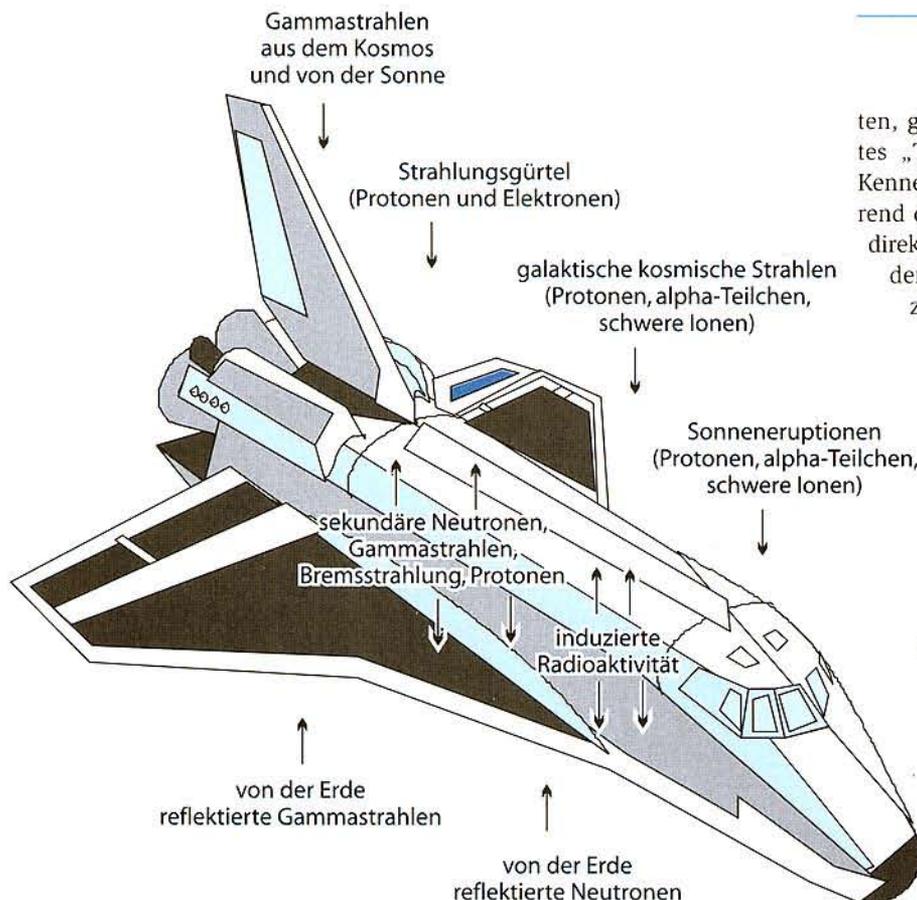
Schädigung führt zum akuten Strahlentod. In der Strahlentherapie benutzt man die inaktivierende Wirkung zum Abtöten von Tumorzellen.

Mutationen in der Keimbahn können in der Nachkommenschaft zu Erbkrankheiten führen (genetisches Risiko).

Erbveränderungen in Körperzellen bewirken häufig ihre Entartung. Dies ist die erste Stufe zur Entstehung eines Tumors (Krebsrisiko).

Von der Ionisation zum Krebs





Strahlenrisiko und Schwerelosigkeit

Wie schon gesagt, haben Zellen im Laufe der Evolution sehr wirkungsvolle Reparatursysteme entwickelt, die es ihnen erlaubt, Schäden in ihrer genetischen Information zu erkennen und zu korrigieren. Es erhebt sich die interessante und auch wichtige Frage, ob sie im Weltraum unter den Bedingungen der „Mikrogravitation“ ebenso gut funktionieren. Zwar würde man zunächst annehmen, daß molekulare Vorgänge auf Veränderungen der Gravitation nicht ansprechen, da die Energie ihrer Wärmebewegung (thermische Energie) bei weitem größer ist als die durch den Übergang zur Schwerelosigkeit zu erwartenden Änderungen. Größere Zellbestandteile, wie der Zellkern, „fühlen“ sie jedoch durchaus, wie Experimente mit Pflanzenzellen gezeigt haben. Es kann also durchaus möglich sein, daß Vorgänge, welche die Zellteilung regulieren, auch die Reparaturvorgänge beeinflussen. Die Antwort kann nur das Experiment liefern. Solche Untersuchungen wurden in den letzten zwei Jahren ebenfalls von der Gießener Biophysik in Zu-

sammenarbeit mit der NASA und der europäischen Weltraumagentur mit Unterstützung der deutschen Weltraumagentur DARA durchgeführt. Das Objekt waren in diesem Fall eine besondere Variante von Hefezellen, bei denen durch eine einfache Veränderung der Kulturtemperatur die Reparatur an- bzw. abgeschaltet werden konnte. Da die Strahlenintensität bei den kurzen Shuttle-Flügen nicht ausreicht, wurden die Zellen entweder vorab in Gießen bestrahlt oder aber in einem speziellen Aufbau während des Fluges der Wirkung von Betastrahlen ausgesetzt. Die logistischen Probleme bei solchen Experimenten sind nicht zu vernachlässigen. Das beginnt schon bei dem Transport: Natürlich durften die empfindlichen Proben weder zur Kontrolle mit Strahlen durchleuchtet, noch wegen der Kontaminationsgefahr geöffnet werden. Nicht alle Fluggesellschaften waren zu dieser Zusammenarbeit bereit, aber es darf hier gesagt werden, daß am schließlichen Erfolg die Lufthansa einen wichtigen Anteil hatte. Da die Experimente im Shuttle von den Astronauten durchgeführt werden muß-

ten, ging dem Flug ein ausgedehntes „Trockenübungsprogramm“ im Kennedy Space Center voran. Während der kritischen Phasen bestand direkter Funk- und Videokontakt zu den Kollegen im All. Die Akribie zahlte sich aus – alle Experimente verliefen nach Plan, und die Ergebnisse zeigten eindeutig, daß die zelluläre Reparaturmaschinerie auch unter Mikrogravitation so funktioniert wie auf der Erde. Natürlich sagt dies noch nichts darüber, ob nicht durch Änderungen im Immunsystem dennoch eine höhere Empfindlichkeit besteht. Es ist bekannt, daß es unter langen Perioden der Schwerelosigkeit in seiner Wirksamkeit reduziert ist, aber diese Fragen können durch Versuche auf der zellulären Ebene natürlich nicht beantwortet werden. Dazu sind Tierexperimente notwendig, die allerdings von deutscher Seite nicht durchgeführt werden können, wohl aber von der NASA geplant werden. Wenn man bedenkt, daß ein Aufenthalt in der Raumstation typischerweise auf mehrere Monate veranschlagt ist und daß ein Marsflug circa drei Jahre dauert, so sieht man, daß diese Probleme durchaus bedacht werden müssen.

Weltraumstrahlung und elektronische Steuerungssysteme

Die Probleme des Strahlenrisikos werden normalerweise immer im Zusammenhang mit dem bemannten Weltraumflug gesehen, aber es besteht auch für elektronische Steuerungssysteme. Ihre grundlegenden

Jürgen Kiefer, Professor für Biophysik am Strahlenzentrum, wurde 1936 im westfälischen Hagen geboren. Nach dem Studium der Physik in Gießen, München und Berlin schloß er sich 1962 dem gerade neu geschaffenen Institut für Biophysik der Universität Gießen an. Nach einem kürzeren Forschungsaufenthalt in London wurde er 1965 promoviert. Die Habilitation folgte – wieder nach einem diesmal längeren Abstecher nach England (Manchester) im Jahre 1970. Zusammen mit Professor Alfred Schraub und Ernst-Ludwig Sattler wirkte er am Aufbau des Strahlenzentrums mit. Sein Hauptinteresse liegt in der Aufklärung der Zusammenhänge von physikalischer Strahlenwirkung und biologischen Phänomenen. Zusammen mit seinen Mitarbeitern Eckart Schneider und F. Schöpfer führte er vor mehr als zwanzig Jahren

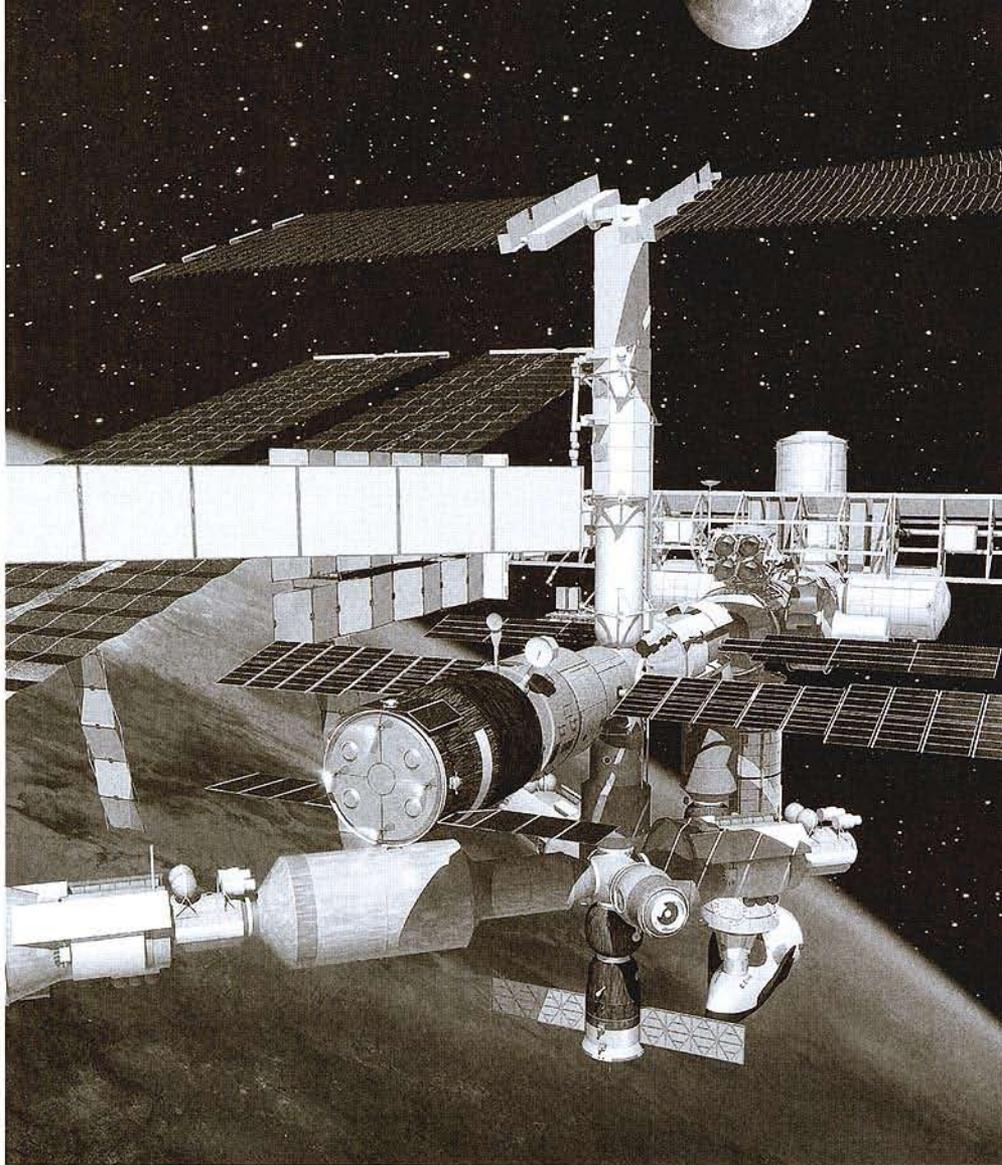
JUSTUS-LIEBIG-
UNIVERSITÄT
GIESSEN

Prof. Dr. Jürgen Kiefer

Strahlenzentrum
Leihgesterner Weg 217
35392 Gießen
Telefon (0641) 99-15300
Telefax (0641) 99-15309

die ersten biologischen Experimente am damals brandneuen Ionenbeschleuniger UNILAC der GSI in Darmstadt durch. Damals begann auch die Zusammenarbeit mit dem Lawrence Berkeley Laboratory in Berkeley, die bis heute andauert. Als Experte der Internationalen Atomenergieagentur IAEA ging er 1980 als Gastprofessor an die Ahmadu Bello University in Zaria, Nigeria. Daraus resultierte dort der Aufbau eines Studienganges „Strahlenbiophysik und Strahlenschutz“, der auch heute noch erfolgreich besteht und eine Reihe afrikanischer Studenten im Rahmen der vereinbarten Zusammenarbeit nach Gießen gebracht hat.

Die „schweren Teilchen“ katalysierten das Interesse an der Weltraumstrahlung, das mit der Zeit immer intensiver wurde und in enger Zusammenarbeit mit ESA und NASA kulminierte. Heute ist Jürgen Kiefer Vorsitzender der „Radiation Advisory Group“ der ESA, Sprecher des Fachverbandes „Strahlenphysik und Strahlenwirkung“ der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und zweiter Vorsitzender der „Gesellschaft für Biologische Strahlenforschung“.



Die geplante internationale Raumstation Alpha. Man sollte denken, daß die Strahlenbelastung zunimmt, je weiter man in den Weltraum hinauskommt. Tatsächlich sind aber die niedrigen Umlaufbahnen um die Erde besonders belastet.
Foto: ESA

Einheiten sind mittlerweile so klein, daß sie mit zellulären Strukturen vergleichbar sind. Trifft ein Teilchen einen solchen Mikroschaltkreis, so kann es seine Funktion entscheidend verändern, was schwerwiegende Störungen nach sich ziehen kann. Die grundlegenden Mechanismen sind ganz ähnlich wie in der Strahlenbiologie, so daß sich nun Biophysiker und Schaltungstechniker in gemeinsamen Forschungsprogrammen wiederfinden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden auch auf der Erde angewendet, zum Beispiel dort, wo elektronische Anlagen Strahlung ausgesetzt werden, sei es im Kernenergiebereich, sei es bei medizinischen Bestrahlungsanlagen.

„Spin-off“ der Weltraumstrahlenbiologie

Die Weltraumforschung allgemein steht unter den kritischen Blicken von Öffentlichkeit und Wissenschaft, weil die Kosten recht erheblich sind und das Geld möglicher-

weise woanders sinnvoller eingesetzt werden könnte. So wird immer wieder die Frage nach dem irdischen Nutzen gestellt, dem „Spin-off“. Sieht man einmal davon ab, daß im Gesamtbudget die Strahlenbiophysik nur einen sehr geringen Anteil beansprucht, so sind ihre Kenntnisse durchaus auch auf der Erde von Bedeutung. Ein besonders spektakuläres Beispiel ist die Anwendung geladener Atomkerne zur Strahlentherapie von Tumoren. Im Dezember 1997 sind die ersten Patienten bei der GSI in Darmstadt bestrahlt worden, in Japan läuft ein ähnliches Programm schon seit einiger Zeit, wobei schon an circa 100 Patienten – meist positive – Erfahrungen gesammelt werden konnten. Natürlich hätte man sich damit auch ohne die Forschungen zum Weltraumstrahlenrisiko beschäftigt, aber die in diesem Zusammenhang erzielten Ergebnisse flossen stimulierend mit ein. Sehr viel unmittelbarer besteht eine Beziehung zum na-

türlichen terrestrischen Strahlenrisiko. Sein größter Anteil geht auf das Edelgas Radon, das Zerfallsprodukt des Radiums zurück. Es ist überall, vor allem in Häusern zu finden. Radon selbst und seine unmittelbaren Folgeprodukte sind Alphastrahler und werden mit der Atemluft eingeatmet. Es kommt zum Teil zu Ablagerungen in Lunge und Bronchialsystem, so daß durch die Strahleneinwirkungen Lungenkrebs entstehen kann. Daß dies tatsächlich der Fall ist, weiß man aus epidemiologischen Studien an Bergarbeitern in Uranminen. Hier sind die Konzentrationen jedoch ungleich höher als in der normalen Umwelt, und man weiß noch längst nicht genug über die Wirkungen niedriger Radondosen. Bei ihnen werden nur wenige Lungenepithelzellen tatsächlich getroffen – die Situation ist also vergleichbar mit der Weltraumstrahlung, Erkenntnisse und Methoden können unmittelbar übertragen werden. •