

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Untersuchungen der Ortsdosisleistung in Flugzeugen unter
Berücksichtigung des Sonnenzyklus, der Lageveränderung der
magnetischen Pole und der Auswirkung von solaren Ereignissen
zur Qualitätssicherung der Dosisermittlung für das fliegende
Personal - Vorhaben 3608S10003**

**Auftragnehmer:
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig**

F. Wissmann

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.



Bundesamt für Strahlenschutz

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-93/14

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2014080611460

Salzgitter, August 2014

Forschungsvorhaben 3608S10003

Untersuchungen der Ortsdosisleistung in Flugzeugen unter Berücksichtigung des Sonnenzyklus, der Lageveränderung der magnetischen Pole und der Auswirkung von solaren Ereignissen zur Qualitätssicherung der Dosisermittlung für das fliegende Personal

– Abschlußbericht –

Vorhabensdauer vom 1. Februar 2009 bis 31. Januar 2012

Verlängerung bis 29. Februar 2012

Frank Wissmann

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

E-mail: frank.wissmann@ptb.de

An dem Vorhaben waren beteiligt:

Oleksiy Burda, Thorsten Klages, Frank Langner, Frank Wissmann
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Sönke Burmeister, Bernd Heber, Thomas Möller
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)
Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Leibnizstr. 11
24098 Kiel

Daniel Matthiä, Nicole Santen, Matthias Meier, Michael Wirtz, Günther Reitz
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
Linder Höhe
51147 Köln

Jürgen Briese
Deutsche Lufthansa AG (DLH), Umweltkonzepte Konzern, FRA CP/U
Lufthansa Aviation Center
Airportring
60546 Frankfurt/Main

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
1 Kurzdarstellung der Vorgaben	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das FE-Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2 Eingehende Darstellung der Arbeitspakete	6
2.1 Arbeitspaket 1	6
2.1.1 AP 1.1 Auswahl von Messinstrumenten	6
2.1.2 AP 1.2 Einbau von Messinstrumenten	8
2.1.3 AP 1.3 Kalibrierung der Messinstrumente	9
2.1.4 AP 1.4 Messflüge	9
2.2 Arbeitspaket 2	10
2.2.1 AP 2.1 Kontinuierliche Messwerterfassung	10
2.2.2 AP 2.2 Datenerfassung und Datenspeicherung	11
2.3 Arbeitspaket 3	11
2.3.1 AP 3.1 Vergleich mit zugelassenen Rechenprogrammen	11
2.3.2 AP 3.2 Berücksichtigung von SPE	12
2.4 Arbeitspaket 4	14
2.4.1 AP 4.1 Datenauswertung und Berichte	14
2.4.2 AP 4.2 Konzept zur Anpassung der Rechenprogramme	14
2.4.3 AP 4.3 Dosimetrische Bewertung der Ergebnisse	15
3 Berichte der Projektpartner	18
3.1 Bericht der PTB	18
3.1.1 Direkte Kalibrierung	18
3.1.2 Kalibrierung mittels Qualitätsfaktoren	21
3.1.3 Bestimmung von Routendosen	24
3.1.4 Vergleich von Rechenprogrammen	25
3.2 Bericht der CAU	28
3.2.1 Datenauswertung	28
3.2.2 Dosisraten im solaren Minimum	28
3.2.3 Abhängigkeit der Dosisraten vom Solarzyklus	34
3.3 Bericht des DLR	37
3.3.1 Simulationsrechnungen für Teilchenflüsse und LET-Spektrum	37
3.3.2 Vergleich des berechneten LET-Spektrums mit DOSTEL Daten	37
3.3.3 Evaluation und Kauf eines Neutronendosimeters	38

3.3.4 Messflug nach Buenos Aires im September 2010	39
Literaturverzeichnis	44
Anhang	
A Zusammenstellung der Flughäfen und deren IATA-Code	48
B Abkürzungen	49

Kurzfassung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Datenbasis für die Zulassungsprüfung von Programmen zur Ermittlung der Dosis des fliegenden Personals nach §103 StrlSchV sowie zur Validierung berechneter Dosen und die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Ersatzdosis beim Auftreten eines solaren Ereignisses. Wesentliche Grundlage für die Durchführung war das Messsystem NAVIDOS, das im Rahmen des Vorgängervorhabens des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Laufzeit 2006 - 2009) gemeinsam von der PTB, der CAU und dem DLR entwickelt wurde. Darauf aufbauend konnten im Laufe des Vorhabens insgesamt drei Systeme in Passagierflugzeuge vom Typ Airbus A340 der Lufthansa eingebaut und dauerhaft betrieben werden. Als Strahlungsdetektoren wurden Silizium-Detektoren verwendet. Das bedeutet, dass die in Silizium gemessene absorbierte Energie bzw. Dosis in eine Umgebungs-Äquivalentdosis umgerechnet werden muss. Dies erfolgte mittels der Kalibrierung der Messdaten mit dem PTB-Programm FDOScalc. Bei dieser sogenannten Feldkalibrierung sind Messdaten aus 2008 (für NAVIDOS-1) bzw. aus 2009 (für NAVIDOS-2) über einen großen Bereich der vertikalen Abschneidesteifigkeit mit den berechneten Dosisraten normiert worden. Mit den daraus ermittelten Kalibrierfunktionen wurden dann alle folgenden Messdaten kalibriert. Da in FDOScalc mathematische Funktionen zur Beschreibung früherer PTB-Messungen verwendet werden, ist eine Rückführbarkeit auf die Primärnormale der PTB im Rahmen der Unsicherheiten gegeben. Alle Messdaten wurden von der CAU und der PTB unabhängig voneinander analysiert und die Ergebnisse verglichen, wodurch systematische Fehler bei der Analyse vermieden werden konnten. Insgesamt konnten mit NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 zwischen August 2008 und Dezember 2011 36694 Messpunkte (30-Minuten-Mittelwerte) in Flughöhen zwischen 9,0 km und 12,5 km gemessen werden, was 18347 h reiner Messzeit entspricht.

Zusätzlich zu den Langzeitmessungen mit den NAVIDOS-Systemen wurde im August 2009 von der PTB mit dem Referenzmessgerät π DOS ein Messflug mit der DLH nach Kapstadt durchgeführt. Das DLR und die DLH organisierten im September 2010 ein Messflug von Frankfurt (FRA) nach Buenos Aires (EZE). Dabei wurde mit verschiedenen Geräten, u.a. ein HAWK-TEPC des DLR und im Rahmen des Vorhabens beschaffter Neutronenmonitor LB6411-Pb, die Breitengradabhängigkeit der Dosisrate gemessen.

Im Rahmen des Vorhabens und des Vorgängervorhabens des BMVBS konnte von August 2008 bis Januar 2012 ein einmaliger Datensatz gewonnen werden. Die Messungen sind geprägt durch das unerwartet lange solare Minimum von 2008 bis Anfang 2010. Erst ab Januar 2010 nahm die Sonnenaktivität langsam zu. Ein solares Ereignis, das zu einem *Ground Level Enhancement* und einer signifikanten Erhöhung der Ortsdosisrate in Flughöhen führt, fand im Laufe dieses Vorhabens nicht statt und konnte deshalb nicht vermessen werden.

Mittels der in diesem Vorhaben durchgeführten Messungen konnten die in Deutschland für die Dosisermittlung des fliegenden Personals zugelassenen Rechenprogramme EPCARD, FREE und PCAIRE überprüft werden. Dazu wurden auf neun von Frankfurt ausgehenden Flugrouten die Routendosis, d.h. die Umgebungs-Äquivalentdosis, jeweils für Hin- und Rückflug berechnet und mit den Messungen verglichen. Daraus ergaben sich zwei wesentliche Ergebnisse: i) Alle Programme stimmen innerhalb von $\pm 30\%$ mit den Messwerten überein; ii) eine Anpassung der Programme untereinander ist nicht erforderlich.

Braunschweig, den 8. Januar 2013

1. Kurzdarstellung der Vorgaben

1.1. Aufgabenstellung

Nach §103 StrlSchV ist die Strahlenexposition des fliegenden Personals zu ermitteln und zu überwachen. Dazu wird die Strahlenexposition in Flugzeugen mit Rechenprogrammen berechnet, die durch die PTB geprüft und vom LBA zugelassen werden. Wesentliche Einflussparameter sind der 11-jährige Sonnenzyklus und das unregelmäßige Auftreten von solaren Ereignissen, den sogenannten *solar particle events* (SPE). Die Verifikation von Rechenprogrammen zur Ermittlung der Strahlenexposition in Flugzeugen erfolgte bisher auf der Basis von Messdaten der PTB aus den Jahren 1997 bis 1999 und 2004. Für eine qualitätsgesicherte Dosisermittlung sind Messungen der Ortsdosisrate in Flughöhen über mindestens einen halben Sonnenzyklus erforderlich. Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer Datenbasis für die Zulassungsprüfung von Programmen zur Ermittlung der Dosis des fliegenden Personals nach §103 StrlSchV sowie zur Validierung berechneter Dosen (z.B. für epidemiologische Studien) und die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Ersatzdosis beim Auftreten eines solaren Ereignisses. Die Ziele sollten wie folgt erreicht werden:

- (i) Messungen der Ortsdosisrate in Verkehrsflugzeugen auf weltweit verteilten Routen über einen halben Sonnenzyklus.
- (ii) Entwicklung eines Konzeptes bzgl. der nachträglichen Berücksichtigung eines solaren Ereignisses.

Die Installation von mehreren Messgeräten in Verkehrsflugzeugen sollte die weltweite Dosismessung entsprechend der Flugrouten der eingesetzten Flugzeuge ermöglichen. Durch zusätzliche Vergleichsflüge mit dem Referenzsystem der PTB sollten die neuen Messdaten mit den bisherigen Messdaten der PTB verknüpft bzw. kalibriert werden. Damit sollte dann die Grundlage geschaffen werden, um die für die Dosisermittlung des fliegenden Personals verwendeten Programme im weiteren Verlauf des derzeitigen Sonnenzyklus zu überprüfen.

Die Installation von Messgeräten sollte es auch ermöglichen, den zeitlichen Verlauf der Ortsdosisrate während eines solaren Ereignisses zu untersuchen. Da solche Ereignisse sehr selten auftreten, wurde angestrebt, dass sich immer mindestens ein Messgerät in Flughöhen befindet. Mit den Messungen sollte dann die Berechnung eines solchen Ereignisses überprüft werden.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das FE-Vorhaben durchgeführt wurde

Die wesentliche Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens war der Einbau von Messgeräten in Verkehrsflugzeuge. Die Entwicklung der notwendigen Messgeräte wurde durch das Forschungsvorhaben des BMVBS [BMVBS 2006] gefördert und die Messgeräte standen für die weitere Nutzung zur Verfügung. Insgesamt waren im Verlauf des Vorhabens drei Messgeräte in drei Verkehrsflugzeugen vom Typ Airbus A340 der DLH eingebaut und im Messbetrieb.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Von Beginn an konnte in Verkehrsflugzeugen gemessen werden, da ab August 2008 im Rahmen des BMVBS-Vorhabens [BMVBS 2006] ein Messgerät bereits eingebaut war. Dazu kamen im Laufe des Vorhabens zwei weitere Messgeräte: ab März 2009 und ab Dezember 2009. Monatliche Wechsel der Datenträger der Messgeräte durch die DLH ermöglichten eine relativ zeitnahe Auswertung der Messdaten und damit auch die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Messgeräte. Durch den Betrieb von drei Messgeräten ist es gelungen, kontinuierlich die Ortsdosisrate in Flughöhen über mehr als drei Jahre mit nur sehr geringen Unterbrechungen zu ermitteln. Damit war die technische Voraussetzung vorhanden, immer mit mindestens einem Gerät in Flughöhen zu messen.

Die Sonne durchlief während der Projektlaufzeit eine ungewöhnlich lange Phase mit sehr geringer Aktivität. Trotz ansteigender Sonnenaktivität seit 2010 kam es auch bis zum Ende des Vorhabens zu keinem dosisrelevanten Ereignis, das zu einem GLE bzw. einer Erhöhung der Dosisrate in Flughöhen führte. Im Zusammenhang mit einigen wenigen *Solar Energetic Particle* (SEP) Ereignissen kam es zum Auftreten von koronalen Massenauswürfen (*Coronal Mass Ejections*, CMEs). Diese führten zu einer Reduzierung der Zählrate des Oulu Neutronenmonitors um wenige Prozent. Eine entsprechende Änderung der Dosisraten in Flughöhen konnte nicht festgestellt werden. Ursache dafür waren hauptsächlich die zu großen statistischen Schwankungen der Messwerte.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Dosimetrische Untersuchungen der kosmischen Strahlung in Flughöhen wurden in Europa seit den 1990er Jahren durchgeführt. Initiiert durch internationale Konferenzen fanden sich Institutionen aus ganz Europa in Forschungsprojekten zusammen, die teilweise durch die Europäische Kommission gefördert wurden. Ein Großteil der erzielten Ergebnisse dieser Projekte ist in einem Bericht der Europäischen Kommission erschienen [EC 2003]. Der Bericht gibt eine sehr gute Übersicht über die bis etwa 2003 gemessene weltweite Verteilung der Dosisraten in Flughöhen. Eine Zusammenfassung über die in Europa durchgeführten Projekte wurde auf dem EURADOS Workshop *Cosmic Radiation And Aircrew Exposure* im Jahr 2009 in Braunschweig präsentiert [Beck et al. 2009, Beck 2009a].

In Deutschland wurden seit 1997 Langzeitmessungen mit fest installierten Messgeräten durch das damalige Österreichische Forschungszentrum Seibersdorf (heute: Austrian Institute of Technology, AIT) und der PTB in Kooperation mit der DLH durchgeführt [Beck et al. 1999, Schrewe 2000]. Sowohl das AIT [Beck et al. 2005] als auch die PTB [Wissmann 2006] konnten in den Jahren 2003 bis 2004 Dauermessungen an Bord von Verkehrsflugzeugen der DLH mit gewebe-äquivalenten Proportionalzählern durchführen. Von August 2008 bis Januar 2012 erfolgten die in diesem Vorhabensbericht beschriebenen Messungen an Bord von Verkehrsflugzeugen

der DLH. In Europa wird zur Zeit dauerhaft an Bord von Verkehrsflugzeugen nur in Spanien [Sáez Vergara, Dominguez-Mompell 2009] und in der Tschechischen Republik [Ploc et al. 2011, Malusšek et al. 2011] gemessen.

Weltweit ist es nur zehn Mal gelungen, während solarer Ereignisse, die zu einem GLE führten, die zusätzliche Strahlexposition in Flughöhen zu messen (für eine Übersicht siehe Ref. [Beck et al. 2009b]). Im April 2001 führten die Ereignisse zum GLE 60. Zwei Messinstrumente waren damals in Flughöhen: das System ACREM des AIT [Bartlett et al. 2002] und das Messgerät Liulin [Spurný, Dachev 2001] des *Nuclear Physics Institute* der Tschechischen Akademie der Wissenschaften. Beide Messungen ergaben auf den Flügen von Frankfurt nach Dallas bzw. von Prag nach New York eine zusätzliche Äquivalentdosis von 21 μSv bzw. 15 μSv [Beck et al. 2009b]. Während der sogenannten *halloween storms* im Oktober 2003 (GLE 65) gelangen dem AIT Messungen mit einem TEPC, der zu der Zeit an Bord eines Verkehrsflugzeugs der DLH eingebaut war. Dabei wurde eine zusätzliche Äquivalentdosis auf einem Flug von München nach Chicago von 16 μSv gemessen [Beck et al. 2005].

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Hervorzuheben ist an dieser Stelle die jahrelange gute Zusammenarbeit mit der Deutschen Lufthansa AG. Insbesondere hat sich für dieses Vorhaben neben der Koordination durch die Abteilung Umweltkonzepte Konzern (Deutsche Lufthansa AG) unter Leitung von Herrn Dr. Karlheinz Haag auch Herr Thomas Dauer (Lufthansa Technik AG, LHT) und sein Team sehr intensiv eingesetzt. Seine Arbeit war die wesentliche Grundlage dafür, dass insgesamt drei Messgeräte in drei Airbus A340 im Dauerbetrieb messen konnten.

Trotz modernster Messtechnik ist es nicht gelungen, innerhalb der Passagierkabine einen ausreichenden Empfang des GPS-Signals sicher zu stellen. Deshalb war die Kooperation mit dem MOZAIC-Projekt [Marenco et al. 1998] eine entscheidende Voraussetzung für den Erfolg des Vorhabens. Die an Bord von zwei Airbus A340 Flugzeugen, in denen jeweils ein NAVIDOS in Betrieb war, gewonnenen Flugkoordinaten ermöglichten eine räumlich aufgelöste Analyse der Messdaten von zumindest zwei NAVIDOS-Geräten. Für die zuverlässige Übermittlung der Flugkoordinaten sei an dieser Stelle Herrn P. Nédélec (Laboratoire d'Aérodologie, CNRS, Université de Toulouse) gedankt.

2. Eingehende Darstellung der Arbeitspakete

2.1. Arbeitspaket 1

2.1.1. AP 1.1 Auswahl von Messinstrumenten

Die Auswahl von Messgeräten beruhte auf den bisher innerhalb der Kollaboration RAMONA gemachten Erfahrungen mit verschiedenen aktiven Dosimetrie- bzw. Detektorsystemen. Für die Durchführung des Vorhabens wurden folgende Systeme ausgewählt:

- gewebe-äquivalente Proportionalzähler (TEPC):

Die PTB entwickelte das Messsystem π DOS [Schrewe 2000, Wissmann et al. 2004], basierend auf einem 2"-TEPC (\varnothing 5,69 cm; Hersteller: Far West Technology), das nach einer langen Erprobungsphase zwischen Dezember 2003 und September 2004 in einem Airbus A340 der DLH fest eingebaut war [Wissmann 2006]. Auf Grund der vielfältigen Kalibrierung in Referenzstrahlungsfeldern der PTB ist π DOS in seinem Messverhalten sehr gut charakterisiert und die erzielten Dosiswerte sind rückführbar auf die Primärnormale der PTB. π DOS ist so konzipiert, dass das System bis zu 12 h völlig autark messen kann. Für den Dauerbetrieb ist eine externe Stromversorgung anschließbar. Die Messdaten werden über eine extern zugängliche Speicherkarte gesichert.

Das transportable 5"-TEPC System HAWK (\varnothing 12 cm; Hersteller Far West Technology) wird seit einigen Jahren erfolgreich vom DLR betrieben. Der TEPC ist zusammen mit der kompletten Datenerfassung in einem Alu-Zylinder untergebracht und kann über eine Batterie oder externe Stromversorgung betrieben werden. Auch hier erfolgt die Messdatensicherung über eine Speicherkarte.

Beide beschriebenen TEPC-Systeme sind für den Einbau in Flugzeugen auf Grund ihrer Größe nur bedingt einsetzbar. Allerdings sind beide Geräte als Referenz-Messgeräte für die Dosismessung in komplexen Strahlungsfeldern hervorragend geeignet.

- Si-Halbleiter-Detektoren:

Ein Fortschritt in der technischen Entwicklung ist die Miniaturisierung der Dosimeter. Ein wichtiger Schritt dahin ist das Gerät Liulin, das vom *Space Research and Technology Institute of the Bulgarian Academy of Sciences* (SRTI-BAS) in Sofia (Bulgarien) entwickelt und vertrieben wird [Dachev et al. 1989, Spurný 2002, Spurný 2003]. Liulin basiert auf einem Si-Detektor, ist handlich und mit einer Masse, je nach Ausführung, von etwa 300 g sehr leicht. Mit Liulin wird seit mehreren Jahren im Weltall und in Flughöhen u. a. von Institutionen aus Deutschland, Frankreich, Spanien und der Tschechischen Republik erfolgreich gemessen. Sowohl die PTB als auch das DLR betreiben Messgeräte des Typs Liulin. Das Dosimetrieteleskop (DOSTEL) wurde 1996 am Institut für Reine und Angewandte Kernphysik der Christian-Albrechts-Universität in Kiel in Zusammenarbeit mit dem DLR entwickelt und realisiert. Basierend auf zwei Si-Halbleiterdetektoren wurde das Teilchenteleskop für Messungen im Weltraum

konzipiert. Bei der Konstruktion des Instruments wurde den Anforderungen der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA bezüglich Leistungsaufnahme, Vibrationsunempfindlichkeit, Ausgasung und elektromagnetischer Abstrahlung Rechnung getragen. Bei Messflügen auf den Shuttle-Flügen STS76 (1996), STS81 (Januar 1997) und STS84 (Mai 1997) der NASA, sowie auf der Raumstation MIR (Oktober 1997 bis Januar 1998) stellte DOSTEL seine Leistungsfähigkeit unter Beweis. Unter anderem sind zwei DOSTEL-Einheiten beim *Dosimetric Mapping* (DOSMAP) Experiment (April 2001 - Juli 2001) auf der Internationalen Raumstation ISS zum Einsatz gekommen [Reitz et al. 2005]. Ein weiter entwickeltes Instrument kam als Strahlungsmonitor auf der *European Exposure Facility* (EuTEF) zum Einsatz. Auch bei Messkampagnen in Flugzeugen hat sich das DOSTEL als ein zuverlässiges Messgerät erwiesen [Beaujean et al. 1999, Beaujean 2005].

- Neutronendosimeter:

Im Rahmen des Vorhabens wurde vom DLR ein Neutronendosimeter des Typs LB6411-Pb der Firma Berthold Technologies beschafft. Dabei handelt es sich um ein ^3He -Protonen-Rückstoß-Zählrohr mit PE Moderatorkugel und 10 mm Bleiummantelung mit einem Neutronenmessbereich bis 500 MeV und einem Dosisratenmessbereich von 30 nSv/h bis 100 mSv/h. Gegenüber einem TEPC verfügt das LB6411-Pb über eine signifikant höhere Empfindlichkeit für hochenergetische Neutronen [Schrewe 2000a, Schrewe 1999].

Im Rahmen des Vorläuferprojektes des BMVBS [BMVBS 2006] wurde von PTB, DLR und CAU das Messsystem *Navigation&Dosimetry System* (NAVIDOS) entwickelt. Grundlage für NAVIDOS ist das von der CAU und dem DLR entwickelte DOSTEL. Zusätzlich beinhaltet NAVIDOS einen hochempfindlichen GPS-Empfänger, einen Sensor zur Messung des Umgebungsluftdrucks und einen von der PTB entwickelten Miniatur-Datenlogger, der das gleichzeitige Auslesen aller Messdaten (Energiespektrum, Zählraten, Ortsdaten und Druck), und deren Abspeicherung auf einer extern zugänglichen SD-Speicherkarte sicherstellt. Durch seine kompakte Bauweise (ca. 17 cm × 17 cm × 12 cm; Masse ca. 4 kg) ist NAVIDOS erheblich leichter als das bisherige Messsystem πDOS der PTB. Das Messgerät lässt sich einfacher in Verkehrsflugzeuge einbauen und erlaubt zudem eine bessere Durchführung von einzelnen Messflügen. NAVIDOS ist so konzipiert, dass jedes Dosimeter, das über eine serielle Schnittstelle verfügt, betrieben werden kann.

Insgesamt konnten durch das Vorgängervorhaben des BMVBS [BMVBS 2006] und das aktuelle Vorhaben drei NAVIDOS-Systeme (NAVIDOS-1, NAVIDOS-2 und NAVIDOS-3) und deren Einbau und Betrieb in drei Flugzeugen Airbus A340 der DLH finanziert werden. NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 sind je mit einem DOSTEL ausgestattet, NAVIDOS-3 mit einem Liulin-Messgerät. Ein Überblick über die insgesamt im Vorhaben zur Verfügung stehenden Messgeräte ist in Tab. 1 zusammengestellt.

Zu Beginn des Vorhabens war geplant, dass das DLR das neu entwickelte TEPC-System AMIRA der Firma Saphymo beschafft und damit Messungen durchführt. Bisher wurde

Tabelle 1. Die im Rahmen des Vorhabens eingesetzten Messinstrumente. Die DOSTEL wurden von der CAU Kiel zur Verfügung gestellt. Drei Liulin Messgeräte wurden im Rahmen eines Vorgängervorhabens des BMVBS [BMVBS 2006] beschafft, wovon nur der Typ Liulin-RG für den Einbau in NAVIDOS geeignet ist. Das Referenzinstrument π DOS wurde von der PTB entwickelt.

Gerät	Status
NAVIDOS-1/DOSTEL-A	eingebaut in A340 ab 15.08.2008
NAVIDOS-2/DOSTEL-B	eingebaut in A340 ab 24.03.2009
NAVIDOS-3/Liulin-RG	eingebaut in A340 ab 15.12.2009
Liulin-6SG	Frankfurt - Kapstadt (PTB, 2009)
Liulin-6G	Messflug Frankfurt - Buenos Aires (DLR, 2010)
π DOS	Messflug Frankfurt - Kapstadt (PTB, 2009)
HAWK	Messflug Frankfurt - Buenos Aires (DLR, 2010)
LB6411-Pb	Messflug Frankfurt - Buenos Aires (DLR, 2010)

von Saphymo jedoch nur ein AMIRA gebaut und an die PTB geliefert (finanziert durch das BMVBS-Vorhaben [BMVBS 2006]). Der Grund hierfür liegt in der problematischen Entwicklung und Fabrikation des Detektormaterials, ein miniaturisierter TEPC-Block aus dem gewebe-äquivalenten Material A150. Bisher konnten mit dem einzig beschafften AMIRA nicht über einen längeren Zeitraum zuverlässig Messungen durchgeführt werden. Deshalb wurde entschieden, statt des AMIRA einen modifizierten rem-Counter, ein LB-6411-Pb der Firma Berthold Technologies, zur Messung der hochenergetischen Neutronenkomponente zu beschaffen.

2.1.2. AP 1.2 Einbau von Messinstrumenten

Der Einbau von Messinstrumenten in Verkehrsflugzeuge ist innerhalb Europas nur sehr selten durchgeführt worden, da die dafür notwendigen technischen Anforderungen und Genehmigungen teilweise sehr umfangreich sind. Für den Einbau von elektronischen Geräten innerhalb der Passagierkabine muss vorab eine Prüfung der elektromagnetischen Emissionen (EMV Prüfung) des Gerätes durchgeführt werden. Um den Prüfaufwand so gering wie möglich zu halten, wurden ausführliche Testmessungen der elektromagnetischen Emissionen zusammen mit der Abteilung 2 der PTB durchgeführt und bei Überschreitung der Grenzwerte entsprechende Maßnahmen ergriffen, um die Emissionen deutlich zu reduzieren. Die Prüfungen eines zertifizierten Prüflabors nach der Richtlinie RTCA/DO-160E[†] waren schließlich für alle drei NAVIDOS erfolgreich.

Der Einbau wurde von LHT durchgeführt. Dazu entwickelte LHT eine Halterung entsprechend den technischen Anforderungen. Ebenso erfolgte auch der Anschluss an die Stromversorgung innerhalb der Flugzeuge. Nach Einbau wurde bei einem

[†] Radio Technical Commission for Aeronautics; siehe www.rtca.org

sogenannten Rolltest geprüft, ob das Einschalten des NAVIDOS irgendein anderes Instrument des Flugzeugs beeinflusst. Nach erfolgreichem Abschluss aller Prüfungen konnte somit am 15. August 2008 NAVIDOS-1, am 24. März 2009 NAVIDOS-2 und am 15. Dezember 2009 NAVIDOS-3 in Betrieb gehen.

2.1.3. AP 1.3 Kalibrierung der Messinstrumente

Das Ansprechvermögen der Messgeräte wurde in den Referenzstrahlungsfeldern der PTB für Neutronen (0,565 keV bis 19 MeV) und hochenergetische Photonen (6,6 MeV) untersucht [Möller 2008] und durch Messungen am iTLABS (iThemba Laboratory for Accelerator Based Sciences) in Südafrika mit Neutronen bis 100 MeV vervollständigt. Die notwendigen Strahlzeiten wurden im Rahmen einer bestehenden Kollaboration zwischen PTB, iTLABS und der Universität Kapstadt 2009 und 2011 durchgeführt.

Die Rückführung der Messungen in Flughöhen auf das Primärnormal der PTB erfolgt über Vergleichsmessungen mit π DOS. Entsprechende Messungen wurden bereits zusammen von PTB, DLR und CAU im Rahmen des DLR-Projektes CARMEL [Wissmann et al. 2010a] durchgeführt. Dabei war es möglich, gleichzeitig mit verschiedenen Messgeräten (u. a. π DOS, HAWK, DOSTEL, NAVIDOS) in unterschiedlichen Höhen und geografischen Breiten zu messen.

Die Entwicklung einer alternativen Kalibriermethode ergab sich im Laufe des Vorhabens. Wie im Bericht der PTB (siehe Kapitel 3.1) detailliert beschrieben, werden die Messdaten, d.h. die mit DOSTEL gemessene absorbierte Dosis in Silizium, mittels des Programms FDOScalc [Wissmann et al. 2010] in die Messgröße Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$ umgerechnet. Bei dieser sogenannten Feldkalibrierung sind Messdaten aus 2008 (für NAVIDOS-1) bzw. aus 2009 (für NAVIDOS-2) über einen großen Bereich der vertikalen Abschneidesteifigkeit mit den berechneten Dosisraten normiert worden. Mit den daraus ermittelten Kalibrierfunktionen wurden dann alle folgenden Messdaten kalibriert. Da in FDOScalc mathematische Funktionen zur Beschreibung früherer PTB-Messungen verwendet werden, ist eine Rückführbarkeit auf die Primärnormale der PTB im Rahmen der Unsicherheiten gegeben.

Wie in [Möller 2008] beschrieben, wurden auch die von der CAU analysierten Daten mit dem Programm FDOSCalc normiert. Die entsprechende Kalibrierfunktion wurde jedoch im Rahmen der Vorgängervorhabens des BMVBS auf einem einzelnen Flug nach Bangkok ermittelt.

Eine Verifikation von FDOScalc bzw. der angewandten Kalibriermethode erfolgte auf zwei Messflügen nach Bangkok (2008) und Kapstadt (2009) (siehe Kapitel 2.1.4).

2.1.4. AP 1.4 Messflüge

Für die Durchführung von Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Dosimetern waren zwei Messflüge über den Äquator vorgesehen. Ein Messflug wurde 2009 nach Südafrika in Verbindung mit den Kalibriermessungen mit hochenergetischen Neutronen am iTLABS (siehe Bericht der PTB in Kapitel 3.1) durchgeführt. Ein weiterer Flug, organisiert vom DLR und durchgeführt mit Lufthansa Cargo, führte nach Buenos Aires,

um auch weitere Längengrade abzudecken (siehe Bericht des DLR in Kapitel 3.3). Durch die angewandte Kalibriermethode (siehe Berichte der PTB in Kapitel 3.1 und der CAU in Kapitel 3.2) war es ausreichend, das Rechenprogramm FDOScalc mittels Messungen mit dem Referenzmesssystem π DOS zu verifizieren. Dies erfolgte bereits im Rahmen des Vorgängervorhabens des BMVBS [BMVBS 2006], ein Messflug in 2008 nach Bangkok mit der LTU (heute Air Berlin), und während des aktuellen Vorhabens nach Kapstadt in 2009.

2.2. Arbeitspaket 2

2.2.1. AP 2.1 Kontinuierliche Messwerterfassung

Voraussetzung für eine kontinuierliche Messwerterfassung der Langzeitmessungen war, dass die in Flugzeugen eingebauten Messsysteme vollständig automatisiert betrieben werden können. Die NAVIDOS-Systeme sind genau dafür konzipiert worden; nur eine externe Stromversorgung durch das flugzeugeigene Bordnetz wird benötigt. Nach dem Einschalten der Geräte wird nach einer Initialisierung der Messbetrieb umgehend aufgenommen. Fällt die externe Stromversorgung aus, z. B. bei längeren Wartezeiten der Flugzeuge, so wird über einen Batteriepuffer das laufende Messintervall kontrolliert beendet und das Messsystem geht in einen Wartemodus über. Steht die externe Stromversorgung wieder zur Verfügung, wird der Messbetrieb automatisch gestartet. Problematisch bei den Dauermessungen war die Erfassung der Ortskoordinaten über GPS. In der Zusammenarbeit mit der DLH wurden dafür folgende Lösungen entwickelt:

- (i) Durch den Einbau in sogenannten MOZAIK-Flugzeugen, das sind zwei Airbus A340, die für wissenschaftliche Messungen in der Atmosphärenforschung genutzt werden [Marenco et al. 1998], stand bereits ein von Airbus zertifiziertes Erfassungssystem zur Verfügung. Die durch das bordeigene GPS erfassten Daten konnten monatlich zur Verfügung gestellt werden. Das Prozedere wurde bereits für Messungen mit dem π DOS [Wissmann 2006] verlässlich durchgeführt. Der Zeitabgleich kann dann z.B. durch die Höhenänderung der GPS-Daten und des durch die Messgeräte erfassten Kabinenluftdrucks erfolgen.
- (ii) In den NAVIDOS-Systemen ist ein hochempfindliches GPS-Empfängersystem eingebaut, mit dem auch die sehr schwachen GPS-Signale innerhalb der Passagierkabine eines Airbus erfasst werden können. Im Laufe des Vorhabens hatte sich jedoch ergeben, dass auf Grund des Einbauortes im Airbus der Empfang des GPS-Signals sehr beeinträchtigt war, da die Antenne keine direkte Sicht auf ein Außenfenster der Kabine hatte. Dadurch kam es sehr häufig zum Empfangsverlust des GPS-Signals und es konnte keine GPS-Information ermittelt werden.

Die Erfassung der Ortskoordinaten (geografische Länge, geografische Breite und barometrische Höhe) war nur für NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 möglich, die an Bord der beiden MOZAIK-Flugzeuge eingebaut waren. Für NAVIDOS-3 war dies nicht möglich. Es konnten zwar zuverlässig die Dosisraten und Energiespektren mit dem Liulin-Gerät gemessen werden, aber es standen keine Koordinaten zur Verfügung.

Allerdings konnte die barometrische Höhe über den eingebauten Luftdrucksensor bestimmt werden.

Eine kontinuierliche Messwerterfassung war bei den eingebauten Geräten über Routinekontrolle der Messgeräte und monatlichen Wechsel der Datenträger durch LHT Personal sichergestellt.

2.2.2. AP 2.2 Datenerfassung und Datenspeicherung

Die Messdaten von allen drei NAVIDOS wurden auf SD-Speicherkarten gesichert und monatlich durch LHT gewechselt. Nach Übermittlung der Dateien wurde die Vollständigkeit der Daten und der damit einhergehende Zustand des Messgerätes überprüft, um gegebenenfalls zeitnah auf einen Ausfall eines Gerätes reagieren zu können. Dieses Verfahren hatte sich schon bei der Messkampagne mit π DOS bewährt und konnte auch für NAVIDOS beibehalten werden. Die Rohdaten wurden zentral in der PTB gespeichert und den Projektpartnern CAU und DLR zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

2.3. Arbeitspaket 3

2.3.1. AP 3.1 Vergleich mit zugelassenen Rechenprogrammen

Die derzeit in Deutschland durch das LBA zugelassenen Programme zur Dosisermittlung für das fliegende Personal (EPCARD 3.34, EPCARD 5.4.3, FREE, PCAIRE) wurden bisher durch die PTB nur mit Messungen aus den Jahren 1997 bis 1999 und 2004 geprüft. Um die aktuelle Gültigkeit der Programme zu überprüfen, wurde in Absprache mit dem LBA als Aufsichtsbehörde folgendes Verfahren durchgeführt:

- Festlegung von tatsächlich geflogenen Flugrouten, für die auch Messdaten während des Vorhabens ermittelt wurden
- Berechnung der Routendosen durch die Programm-Hersteller selbst
- Berechnung der Routendosen mit dem Programm der PTB (FDOScalc)
- Vergleich aller berechneten und gemessenen Routendosen (alle Programme)
- vollständig anonymisierte Darstellung der Ergebnisse

Das Programm FDOScalc der PTB verwendet die mathematische Beschreibung der PTB Messungen aus den Jahren 1997 - 1999 und 2003 - 2006. Es sei hier noch erwähnt, dass die Messergebnisse der NAVIDOS-Geräte nicht unabhängig mit FDOScalc verglichen werden können, da FDOScalc für die Feldkalibrierung von NAVIDOS verwendet wurde.

Eine ausführliche Diskussion des Vergleichs findet sich im Bericht der PTB (siehe Kapitel 3.1). Zusammenfassend sei hier nur der Vergleich aller Rechenprogramme mit den Ergebnissen der Messungen gezeigt. Abb. 1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der relativen Differenz

$$\Delta_{\text{route}} = \frac{H^*(10)_{\text{calc}} - H^*(10)_{\text{route}}}{H^*(10)_{\text{route}}}, \quad (1)$$

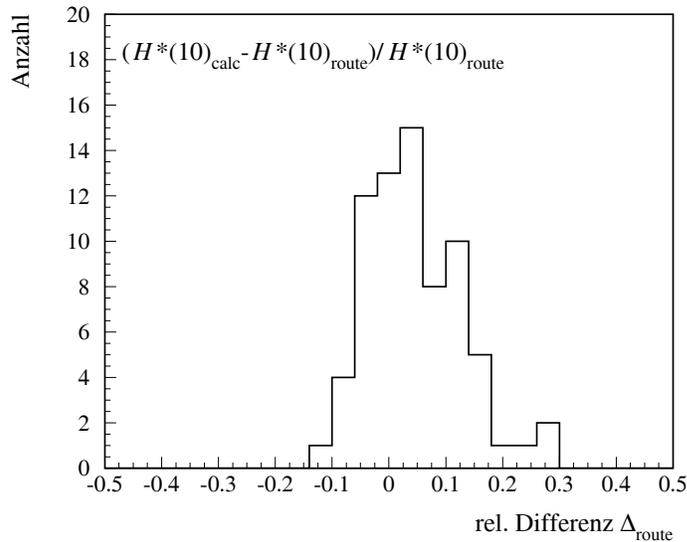


Abbildung 1. Ergebnisse des Vergleichs der Rechenprogramme.

von der berechneten Routendosis, $H^*(10)_{\text{calc}}$, und der mit NAVIDOS gemessenen Routendosis, $H^*(10)_{\text{route}}$.

Da alle Rechenprogramme sich innerhalb der zugelassenen Schwankungsbreite von $\pm 30\%$ befinden, ist eine Anpassung einzelner Programme nicht empfehlenswert.

2.3.2. AP 3.2 Berücksichtigung von SPE

Solar Particle Events (SPE) sind eine Folge der solaren Aktivität. In unregelmässigen Abständen kommt es zu intensiven Sonneneruptionen, koronalen Massenauswürfen und *solar flare* Ereignissen, die zu erheblichen Effekten auf der Erde führen können. Die bekanntesten Beispiele sind die Polarlichter und der Ausfall von Kommunikationssystemen. Werden während eines SPE Protonen mit Energien oberhalb 1 GeV emittiert, so kann es zu einem *ground level enhancement* (GLE) kommen. Dabei dringen die Protonen in die Atmosphäre ein und verursachen auf Meereshöhe eine Erhöhung der Neutronenzählrate. Ein solches Ereignis kann zu einer signifikanten Zunahme der Ortsdosisrate in Flughöhen führen. Wie groß die Zunahme sein kann, ist nicht vorhersagbar.

In Ref. [Beck et al. 2009b] sind alle Messungen zusammengefasst, die während GLE 42 (29.09.1989), GLE 43 (19.10.1989), GLE 44 (22.10.1989), GLE 45 (24.10.1989), GLE 60 (15.04.2001) und GLE 65 (28.10.2003) gewonnen wurden. Sie geben eine maximal gemessene zusätzliche Äquivalentdosis von $84 \mu\text{Sv}$ an. Dagegen kam es während des SPE am 20.01.2005 (GLE 69) und am 13.12.2006 (GLE 70) zu einer deutlichen Erhöhung der Ortsdosisrate in Flughöhen. Für das fliegende Personal wurde durch eine EURADOS Arbeitsgruppe im ungünstigsten Fall eine zusätzliche Dosis von maximal $200 \mu\text{Sv}$ [EURADOS 2005] bzw. $40 \mu\text{Sv}$ [EURADOS 2007] auf Grundlage von Berechnungen abgeschätzt. Neuere Berechnungen zeigen, dass die zusätzliche Dosis während des GLE 69 stark von der Flugroute abhängig ist.

Matthiä et al. [Matthiä et al. 2009] berechneten für einen Flug von New York nach Peking eine Gesamtdosis von 189 μSv und für einen Flug von Frankfurt nach Los Angeles 169 μSv , wobei der Beitrag der galaktischen Strahlung 80 μSv bzw. 71 μSv betrug. Für einen Flug auf der Südhalbkugel von Buenos Aires nach Auckland hingegen berechneten Bütikofer et al. [Bütikofer, Flückiger 2011] eine deutlich höhere Gesamtdosis von 474 μSv mit einem Beitrag der galaktischen Strahlung von 95 μSv . In Ref. [Lantos, Fuller 2003] wurde die Dosis bei zwei sehr intensiven GLEs auf der Route von Paris nach San Francisco auf mehrere mSv abgeschätzt (GLE 3 (25.07.1946): 2,45 mSv; GLE 5 (23.02.1956): 4,55 mSv). Bei solchen Berechnungen sind die Flughöhe, die Flugposition mit Bezug auf das Erdmagnetfeld, die Winkelverteilung und das Energiespektrum des SPE entscheidend. Deshalb ist es notwendig, die Genauigkeit der Berechnung solcher Ereignisse, insbesondere auch durch Vergleiche mit Messungen in Flughöhen, zu untersuchen.

Im Rahmen des Vorhabens soll ein Konzept zur Berücksichtigung von GLEs entwickelt werden. Dabei sind folgende Szenarien zu berücksichtigen:

- (i) Erfolgreiche Messung(en) der Ortsdosisrate in Flughöhen während eines SPE:
Dadurch ist eine Verifikation von Programmen möglich. Damit lassen sich Programme identifizieren, die für die Abschätzung der Gesamtdosis auf entsprechenden Flügen verwendet werden können.
- (ii) Keine Messungen während eines SPE:
Empfehlung für eine Handlungsanweisung zur nachträglichen Ermittlung einer Ersatzdosis. Anhand der bisher gemachten Messungen und Rechnungen lässt sich eine Abschätzung der Ersatzdosis an Hand von Kriterien bzgl. der Stärke des Ereignisses machen. Ein solches Konzept soll einfach handhabbar und nachvollziehbar sein und im Wesentlichen dem Zwecke des Strahlenschutzes dienen.

Durch die sehr lange Ruhephase der Sonne nahm die Sonnenaktivität erst zum Ende des Vorhabens wieder zu. Im Zusammenhang mit einigen wenigen *Solar Energetic Particle* (SEP) Ereignissen kam es zum Auftreten von *Coronal Mass Ejections* (CMEs). Diese führten zu einer Reduzierung der Zählrate des Oulu Neutronenmonitors um wenige Prozent. Ein dosisrelevanter Effekt auf die Strahlenexposition in Flughöhen konnte nicht gemessen werden.

Ein solares Ereignis, das zu einem GLE und einer signifikanten Erhöhung der Ortsdosisrate in Flughöhen geführt haben könnte, fand im Laufe dieses Vorhabens nicht statt und konnte deshalb nicht gemessen werden. Für den Fall eines GLE ist eine Abschätzung des Beitrags zur Routendosis zur Zeit noch immer sehr ungenau. Das Problem wird auch auf europäischer Ebene diskutiert. Im Rahmen der Vereinigung EURADOS (siehe www.eurados.org) beschäftigt sich eine Arbeitsgruppe mit der Untersuchung der Auswirkungen von SPEs und der Berechnung der zu erwartenden Ortsdosisrate in Flughöhen. Für den Fall eines GLE wird empfohlen, die Ersatzdosis in Absprache mit den in EURADOS beteiligten Institutionen zu ermitteln.

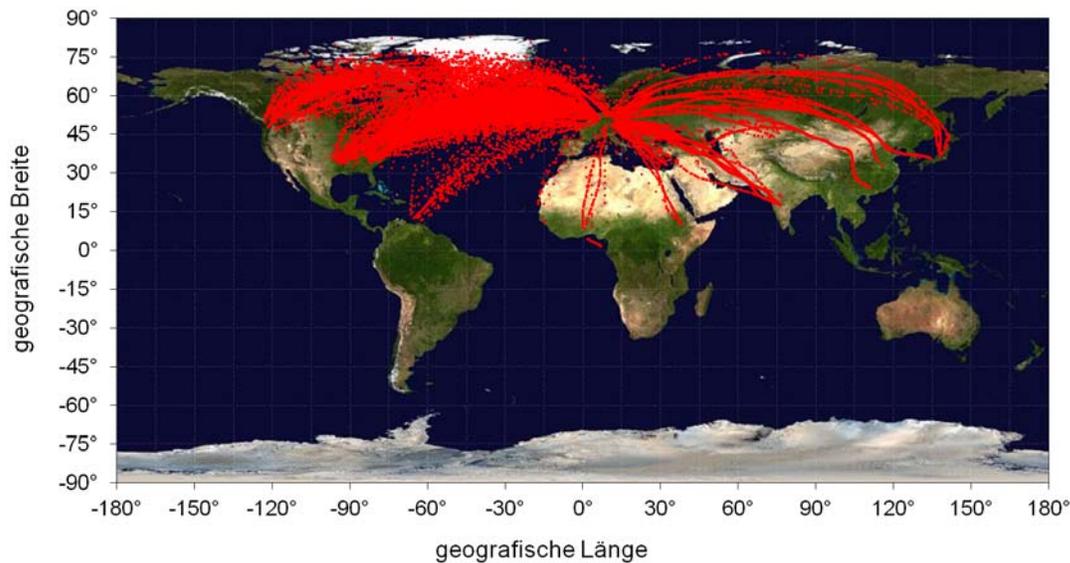


Abbildung 2. Dargestellt sind die Koordinaten auf der Weltkarte [NASA 2002] für die mit NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 im Zeitraum vom 15.08.2008 bis zum 31.12.2011 ermittelten Dosisraten.

2.4. Arbeitspaket 4

2.4.1. AP 4.1 Datenauswertung und Berichte

Die Datenauswertung der kontinuierlichen Messungen erfolgte durch CAU und PTB. Beide Gruppen verglichen die jeweiligen Ergebnisse untereinander. Die jeweiligen Ergebnisse sind in den Berichten der PTB und CAU dargestellt. Die Datenauswertung des Messfluges nach Buenos Aires wurde von DLR und CAU durchgeführt.

In Abb. 2 und Abb. 3 sind die Ergebnisse der Datenauswertung zusammengefasst. Aus allen Messungen, für die NAVIDOS-Daten und Ortskoordinaten vorhanden waren, wurden Mittelwerte für Dosisraten und Koordinaten über ein Zeitintervall von 30 Minuten und Flughöhen zwischen FL 295 und FL 410 bestimmt. Insgesamt konnten mit NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 zwischen August 2008 und Dezember 2011 36694 Messpunkte (30-Minuten-Mittelwerte) in Flughöhen zwischen FL 295 und FL 410 gemessen werden. Das entspricht 18347 h reiner Messzeit.

Die Ergebnisse von NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 in Abb. 3 zeigen auch, dass NAVIDOS-2 bei weniger als 0,5 % der Ergebnisse Werte lieferte, die nicht in das allgemeine Schema passen (sogenannte Ausreißer). Das kann an einem messtechnischen Problem liegen oder die Zuordnung der MOZAIC-Koordinaten ist nicht eindeutig. Bei NAVIDOS-1 sind keine Ausreißer vorhanden.

2.4.2. AP 4.2 Konzept zur Anpassung der Rechenprogramme

Ziel dieses Arbeitspakets war ein Konzept zu entwickeln, um die in Deutschland zugelassenen Rechenprogramme zur Dosisermittlung des fliegenden Personals einander anzupassen. Das Konzept soll folgendes berücksichtigen:

- Vergleich der Rechenprogramme aus AP 3.1 (Kapitel 2.3.1) und Vergleich mit mittleren Dosen aus allen Programmen

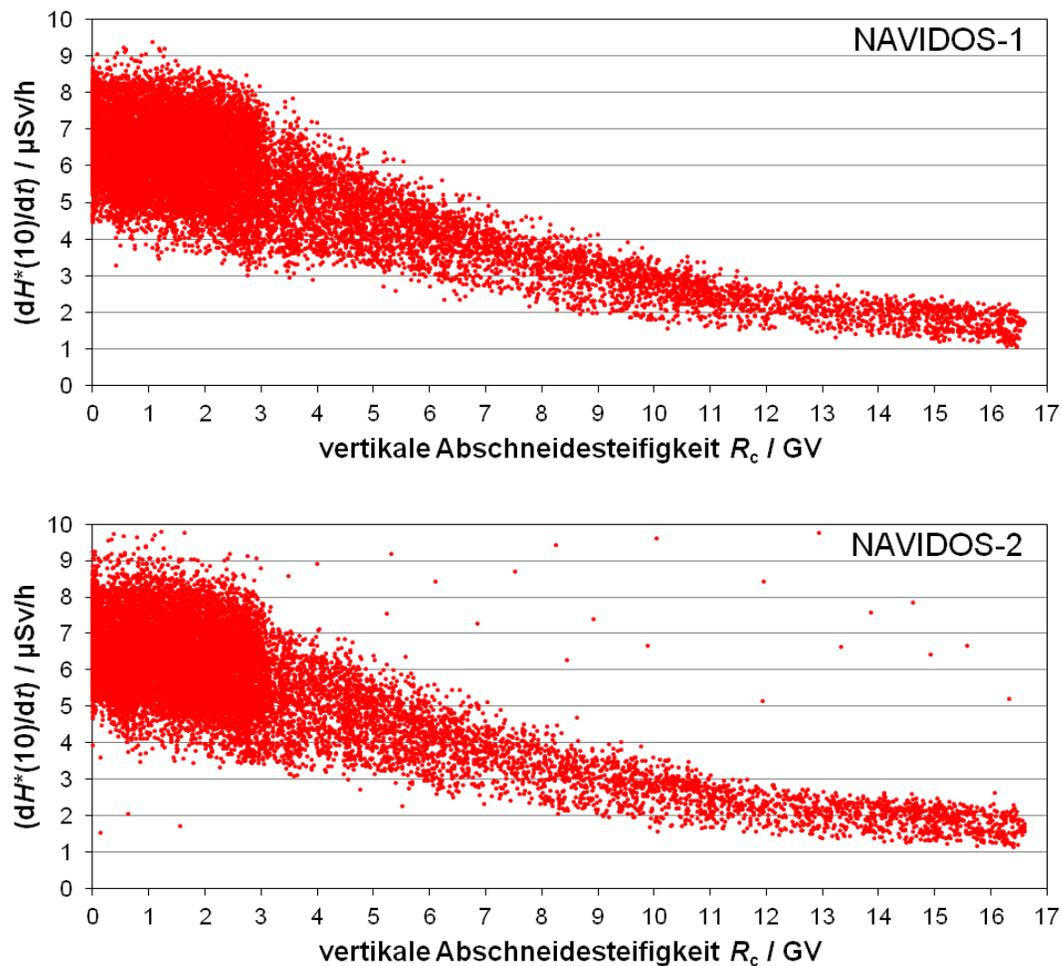


Abbildung 3. Übersicht der Ergebnisse der mit NAVIDOS-1 (oben, 18422 Datenpunkte) und NAVIDOS-2 (unten, 18272 Datenpunkte) im Zeitraum vom 15.08.2008 bis zum 31.12.2011 ermittelten Dosisraten (30-Minuten-Mittelwerte) für Flughöhen zwischen FL 295 und FL 410 als Funktion der vertikalen Abschneidesteifigkeit.

- Vorschlag von Korrekturfaktoren für einzelne Programme für Routen nach Nord- und Südamerika, Südafrika und Asien

Da die berechneten Routendosen maximal 30 % von den gemessenen Werten abweichen (siehe Kapitel 2.3.1), erfüllen alle zugelassenen Rechenprogramme die Anforderungen des LBA bzgl. der Dosisberechnungen. Eine Anpassung würde ein sehr kompliziertes Verfahren erfordern, das im Sinne des Strahlenschutzes nicht erforderlich ist. Deshalb wird empfohlen, keine Anpassung der Programme untereinander anzuwenden.

2.4.3. AP 4.3 Dosimetrische Bewertung der Ergebnisse

Am Beispiel von zwei Flügen von Frankfurt (FRA) nach Caracas (CCS) bzw. Toronto (YYZ) sei hier die im Vorhaben entwickelte Methode der Feldkalibrierung (siehe Kapitel 3.1) gezeigt. Abb. 4 zeigt die Dosisraten im Verlauf der beiden

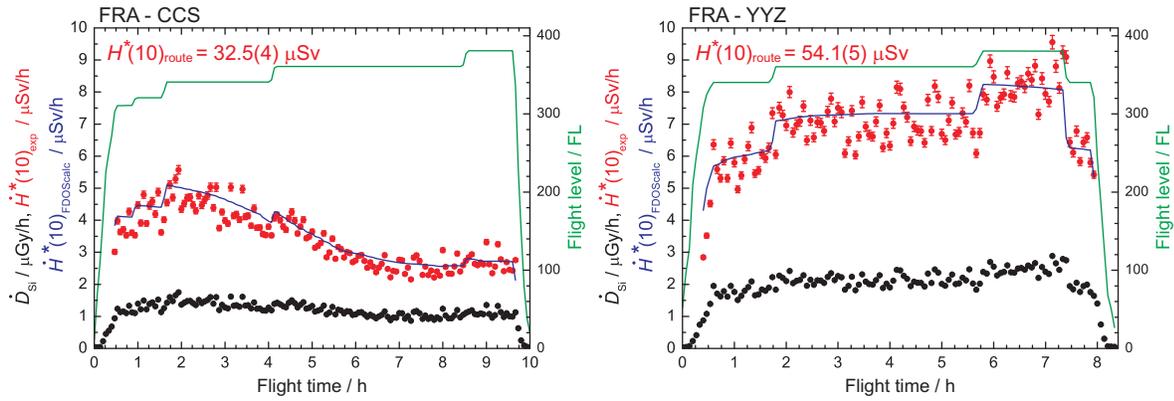


Abbildung 4. Ergebnisse der direkten Kalibrierung am Beispiel der Flüge von Frankfurt nach Caracas (FRA-CCS, links) und von Frankfurt nach Toronto (FRA-YYZ, rechts). Zum Vergleich sind auch die Berechnungen mit FDOScalc (blaue Linie) gezeigt. Die Änderungen der Flughöhe im Verlauf der Flüge ist durch die grüne Linie dargestellt.

Flüge im Vergleich mit den Berechnungen mit FDOScalc. Die Bestimmung der Routendosis erfolgte über die Integration der Umgebungs-Äquivalentdosisrate zwischen Start und Landung entsprechend Gl. (11) im Bericht der PTB (Kapitel 3.1). Für die beiden Flüge ergeben sich Routendosen von $(32,5 \pm 0,4) \mu\text{Sv}$ (FRA-CCS) bzw. $(54,1 \pm 0,5) \mu\text{Sv}$ (FRA-YYZ). Die Übereinstimmung der Messwerte mit den Berechnungen mit FDOScalc ist allerdings zu erwarten, da die Kalibrierung mittels FDOScalc erfolgte. Damit kann überprüft werden, ob das Verfahren richtig angewendet wurde.

Das Endergebnis des Vorhabens zeigt Abb. 5: die Abnahme der Ortsdosisrate in Flughöhen seit Ende 2009. Dieses Verhalten findet sich auch bei den Zählraten des Neutronenmonitors Oulu in Finnland, was sich auf die zunehmende Sonnenaktivität zurückführen läßt.

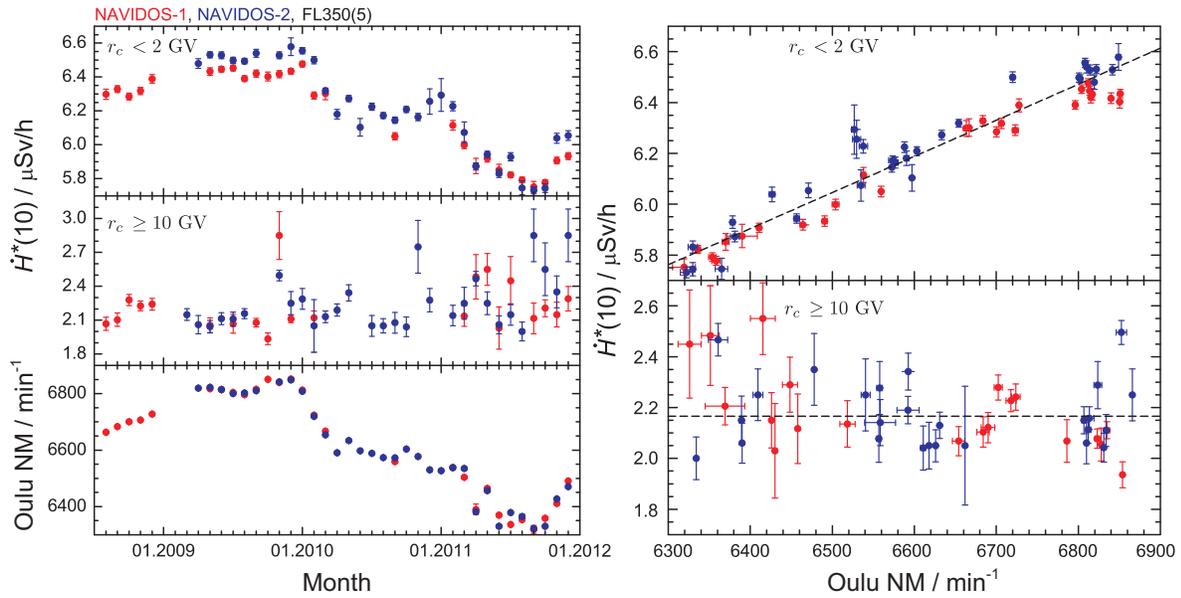


Abbildung 5. Monatsmittelwerte der Ortsdosisrate für Flughöhe FL 350 in der Polarregion ($R_c < 2$ GV) und in der Äquatorregion ($R_c \geq 10$ GV) von August 2008 bis Dezember 2011 wie mit NAVIDOS-1 (●) bzw. NAVIDOS-2 (●) gemessen. Links unten sind zum Vergleich die Monatsmittelwerte der Zählraten des Neutronenmonitors in Oulu (Finnland) dargestellt. Die unterschiedlichen Monatsmittel für die Oulu-Neutronenmonitorzählraten ergeben sich durch die unterschiedlichen Messzeiten von NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2. Die Korrelationen sind auf der rechten Seite gezeigt.

3. Berichte der Projektpartner

Im folgenden sind die Berichte der Projektpartner, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig (PTB), die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln (DLR), zusammengestellt. Für die Inhalte sind die genannten Autoren verantwortlich.

3.1. Bericht der PTB

Autoren: Oleksiy Burda, Frank Wissmann

In Rahmen der RAMONA-Kollaboration wurde das kompakte Messsystem NAVIDOS (Abb. 6) für die Langzeitmessungen der Ortsdosisrate in Flughöhen entwickelt. NAVIDOS besteht aus einem von der PTB entwickelten Datenlogger, der mittels eines Mikro-Prozessors einen Strahlungsdetektor bzw. ein Dosimeter, einen Luftdrucksensor und einen GPS-Empfänger über deren seriellen Schnittstellen ausliest und die Daten auf einer von außen zugänglichen SD-Speicherkarte speichert. Das gesamte System ist in einem Gehäuse untergebracht, das keine elektromagnetischen Abstrahlungen zulässt. Der OLED-Bildschirm ermöglicht eine direkte online-Kontrolle der Messungen von außen. Auf Grund der kompakten Bauweise (17 cm × 17 cm × 12 cm) und der geringen Masse von weniger als 4 kg (einschließlich einer Blei-Gel Batterie), ist NAVIDOS bestens geeignet, dauerhaft in einem Flugzeug betrieben zu werden.

Für NAVIDOS kann jedes beliebige Detektorsystem oder Dosimeter verwendet werden, das sich über eine serielle Schnittstelle auslesen lässt. Als Strahlungsdetektor wird in den Geräten NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 das Dosimetrie-Teleskop DOSTEL eingesetzt (siehe auch den Bericht der CAU). DOSTEL verwendet zwei Silizium-Detektoren, die in Teleskopgeometrie übereinander angeordnet sind. Die Detektoren können sowohl im Einzelmodus als auch im Koinzidenz-Modus betrieben werden. Letzterer ermöglicht die Messung eines LET-Spektrums, da durch die Koinzidenzbedingung der Öffnungswinkel des DOSTELs auf 120° begrenzt wird und dadurch die Weglängen der durchdringenden Teilchen eingeschränkt werden.

Die Hauptaufgabe der PTB war die Entwicklung einer Routine-Auswertung zum Zwecke der Qualitätssicherung des Strahlenschutzes. Die mit den beiden NAVIDOS entlang der Flugroute gemessenen Dosisraten (hier: absorbierte Dosis in Si) muss dazu in die Umgebungs-Äquivalentdosisrate $\dot{H}^*(10)$ in Abhängigkeit der vertikalen Abschneidesteifigkeit R_c umgerechnet werden. Dafür sind zwei Verfahren für die so genannte Feldkalibrierung entwickelt worden:

- (i) direkter Vergleich von gemessener und berechneter Dosis
- (ii) experimentelle Bestimmung eines mittleren Qualitätsfaktors

3.1.1. Direkte Kalibrierung

Die erste Kalibriermethode erfolgt durch den direkten Vergleich der mit einem Si-Detektor gemessenen Dosisrate und der mit dem Programm FDOScalc berechneten



Abbildung 6. Linkes Bild: Das in zwei Airbus A340 der DLH installierte NAVIDOS (Größe: 17 cm × 17 cm × 12 cm). Auf der Vorderseite sind OLED Bildschirm, Tastschalter und die Steckerbuchse für die externe Stromversorgung zu sehen. Die GPS-Antenne ist auf dem Deckel des Gehäuses angebracht. Rechtes Bild: Blick in das offene NAVIDOS mit dem DOSTEL (links hinten), dem Datenlogger und der Stromversorgung (links hinter dem OLED Bildschirm). Die Batterie für autarken Messbetrieb ist auf der rechten Seite untergebracht.

Umgebungs-Äquivalentdosisrate. Das Programm FDOScale [Wissmann et al. 2010] basiert auf einer mathematischen Beschreibung aller Messdaten der PTB in den Jahren 1997 bis 1999 und 2003 bis 2006, an die mit Methoden der Bayeschen-Statistik Funktionen angepasst wurden. Der Kalibrierfaktor ergibt sich zu

$$N_{\text{field}} = \frac{\dot{H}^*(10)_{\text{FDOScale}}}{1,2 \cdot \dot{D}_{\text{Si}}}, \quad (2)$$

wobei der Faktor 1,2 für die Umrechnung der absorbierten Dosis in Si in Wasserenergiedosis verwendet wird.

Abb. 7 demonstriert die erste Stufe der Kalibriermethode: die Mittelung der Kalibrierfaktoren innerhalb eines Intervalls der vertikalen Abschneidesteifigkeit von 1 GV, die in drei Schritten durchgeführt wird:

- Die Kalibrierfaktoren innerhalb eines festen Intervalls der vertikalen Abschneidesteifigkeit, z.B. 0 GV bis 1 GV, werden in zwei-dimensionale Histogramme einsortiert.
- Die zwei-dimensionale Verteilung der Kalibrierfaktoren wird auf die Y-Achse projiziert und man erhält dadurch symmetrische Verteilungen. Das Maximum dieser Verteilung ergibt den Erwartungswert des Kalibrierfaktors. Die Standardabweichung geteilt durch die Wurzel aus Anzahl der Datenpunkte ergibt die Standard-Unsicherheit des Kalibrierfaktors.
- Die zwei-dimensionale Verteilung wird auf die X-Achse projiziert. Die mittlere vertikale Abschneidesteifigkeit wird mit der in der Abbildung gezeigten Formel

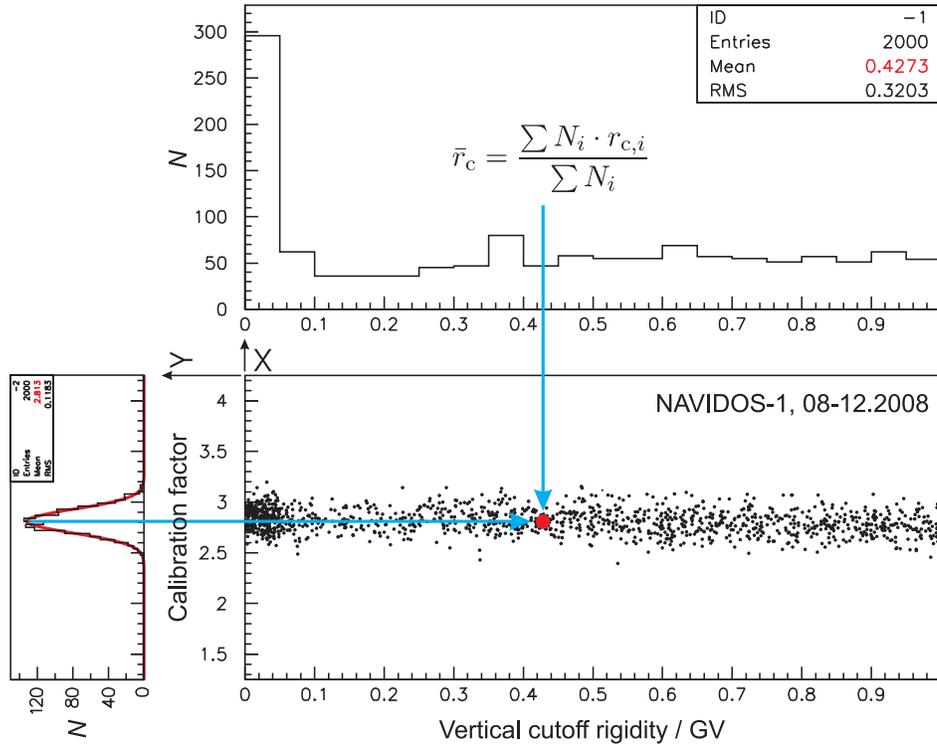


Abbildung 7. Darstellung der Kalibriermethode 1 (Beschreibung siehe Text).

Tabelle 2. Werte der Parameter aus der Anpassung von Gl. (3) an die experimentell bestimmten Kalibrierfaktoren für NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2 als Funktion der vertikalen Abschneidesteifigkeit.

	N_0	N_1	R_0/GV	R_1/GV
NAVIDOS-1	$1,94 \pm 0,03$	$0,84 \pm 0,05$	$7,1 \pm 0,3$	$2,1 \pm 0,3$
NAVIDOS-2	$1,94 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,05$	$7,2 \pm 0,3$	$1,9 \pm 0,3$

(oben) berechnet. Der rote Punkte in der Abbildung zeigt das Ergebnis für das entsprechende Intervall der vertikalen Abschneidesteifigkeit.

Das gleiche Verfahren wurde für alle Intervalle der vertikalen Abschneidesteifigkeit angewandt. Die so erhaltenen Kalibrierfaktoren zeigt Abb. 8. Die funktionale Abhängigkeit kann mittels der Funktion

$$N_{\text{fit}}(R_c) = N_0 + \frac{N_1}{1 + e^{(R_c - R_0)/R_1}} \quad (3)$$

beschrieben werden, wobei N_0 , N_1 , R_0 and R_1 freie Parameter sind, die sich aus einer Anpassung an die gemessenen Werte ergeben. Die Bestimmung der Kalibrierfunktion für NAVIDOS-1 erfolgte mittels der Messdaten aus dem Jahr 2008, für NAVIDOS-2 mittels der Messdaten aus 2009. Die durchgezogene Linie in Abb. 8 ist das Ergebnis der Anpassung, das eingezeichnete Band ist die entsprechende experimentelle Standard-Messunsicherheit. Die resultierenden Parameterwerte sind in Tab. 2 zusammengefasst.

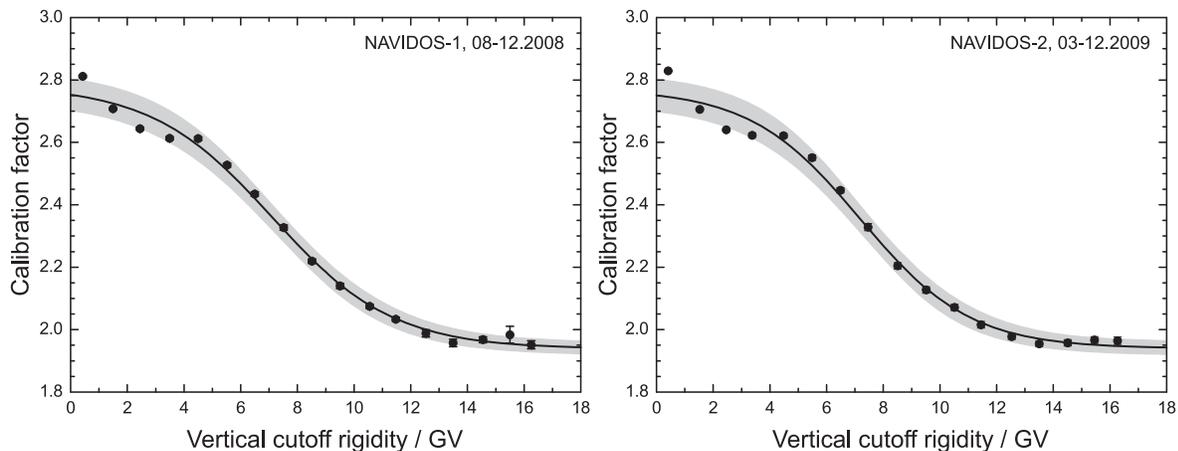


Abbildung 8. Mittelwerte der Kalibrierfaktoren als Funktion der vertikalen Abschneidesteifigkeit (links: NAVIDOS-1, rechts: NAVIDOS-2). Die durchgezogenen Linien ergeben sich aus der Funktion aus Gl. (3) mit den Parametern aus Tab. 2, zusammen mit den experimentellen 1σ Standard-Unsicherheiten (graues Band).

Mit dieser Kalibriermethode ergibt sich die Umgebungs-Äquivalentdosisrate $\dot{H}^*(10)_{\text{exp}}$ aus den gemessenen Werten der absorbierten Dosis in Si aus:

$$\dot{H}^*(10)_{\text{exp}} = N_{\text{fit}}(R_c) \cdot 1,2 \cdot \dot{D}_{\text{Si}}. \quad (4)$$

3.1.2. Kalibrierung mittels Qualitätsfaktoren

Die zweite Kalibriermethode basiert auf der experimentellen Bestimmung von mittleren Qualitätsfaktoren. Im Koinzidenz-Modus des DOSTEL ist es möglich, die in Silizium deponierte Energie pro mittlere Wegstrecke, die so genannte lineale Energie y , und damit auch angenähert die Verteilung des *Linear Energy Transfer* (LET) zu messen (Abb. 9). Das gilt für solche Teilchen, die durch beide Si-Detektoren gleichzeitig nachgewiesen werden und damit den ersten Detektor vollständig durchlaufen haben. Durch Faltung der im Si-Detektor gemessenen Verteilung der absorbierten Dosis $D(y)$ mit dem von der ICRU empfohlenen Qualitätsfaktor $Q(LET \approx y)$ [ICRP 2007] (siehe Abb. 9) ergibt sich die Äquivalentdosis H . Durch Division mit der gemessenen absorbierten Dosis D erhält man den mittleren Qualitätsfaktor \bar{Q} :

$$\bar{Q} = \frac{H}{D} = \frac{\int D(y)Q(L \approx y)dy}{\int D(y)dy}. \quad (5)$$

Der \bar{Q} -Faktor wird hauptsächlich durch hoch-LET Ereignisse mit $y > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ bestimmt. Die DOSTEL-Detektoren in NAVIDOS können aber nur eine maximale Energiedeposition von bis zu 80 MeV messen. Das entspricht einer linealen Energie in Wasser von $\sim 120 \text{ keV}/\mu\text{m}$, was geringer ist als für πDOS mit $\sim 1000 \text{ keV}/\mu\text{m}$. Deshalb sind die mit den DOSTEL bzw. NAVIDOS gemessenen \bar{Q} -Faktoren deutlich geringer als mit πDOS .

Abbildung 10 zeigt die aus allen Messungen extrahierten \bar{Q} -Faktoren als Funktion der vertikalen Abschneidesteifigkeit. Dazu wurden alle 1-Stunden-Mittelwerte der \bar{Q} -Faktoren in Intervalle der Abschneidesteifigkeiten mit einer Intervallbreite von 1 GV

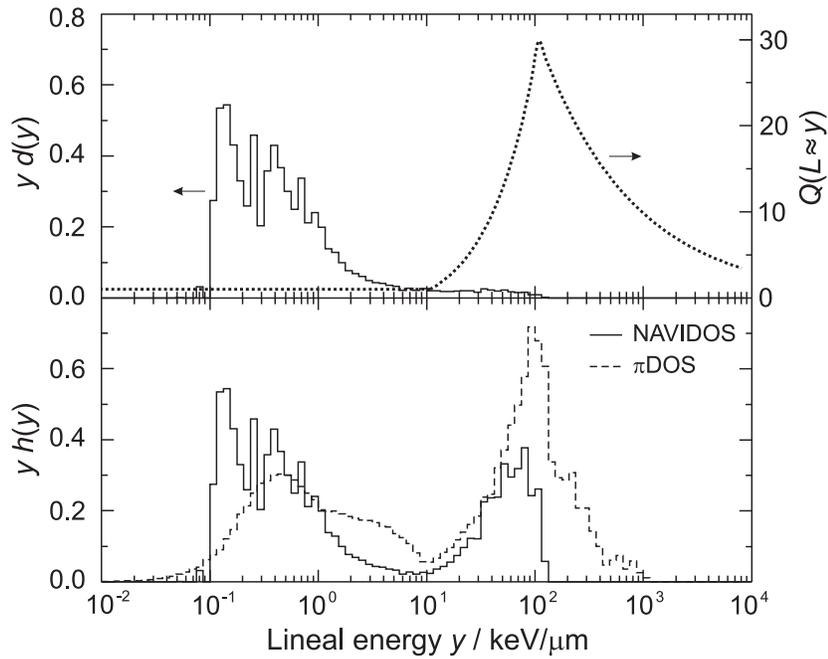


Abbildung 9. Normierte Verteilung der absorbierten Dosis $yd(y)$ (oberes Bild, durchgezogene Linie), gemessen mit NAVIDOS im Mai 2009. Darin eingezeichnet ist auch der von der ICRP [ICRP 2007] empfohlene Qualitätsfaktor $Q(L \approx y)$ (siehe Gl. (5)). Die Verteilung der Äquivalentdosis $yh(y)$ ergibt sich durch Faltung der gemessenen Verteilung der absorbierten Dosis mit $Q(L \approx y)$ (unteres Bild, durchgezogene Linie). Zum Vergleich ist auch die Äquivalentdosisverteilung eingezeichnet, die mit π DOS im Juli 2004 gemessen wurde (unteres Bild, gestrichelte Linie).

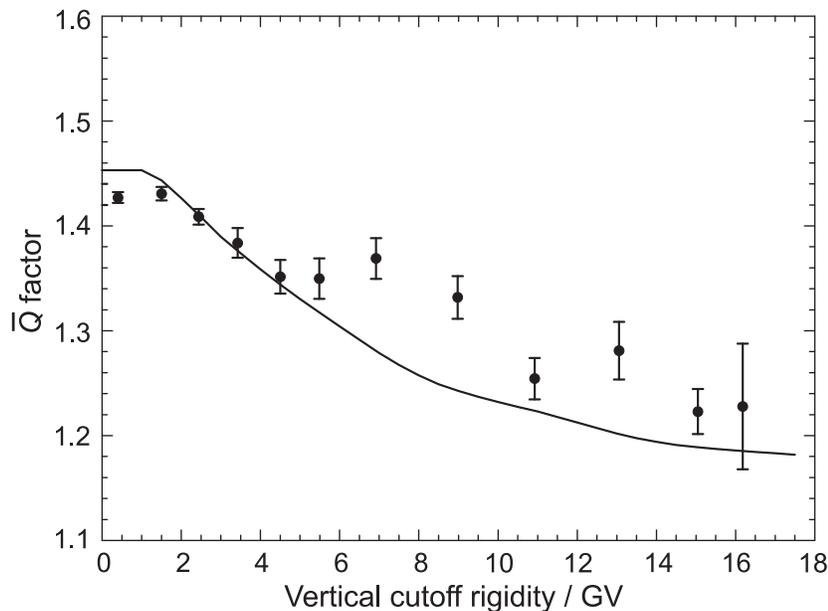


Abbildung 10. Die aus allen Messungen bestimmten \bar{Q} -Faktoren als Funktion der vertikalen Abschneidesteifigkeit. Die durchgezogene Linie ist die an die Datenpunkte angepasste Funktion aus Gl. (6).

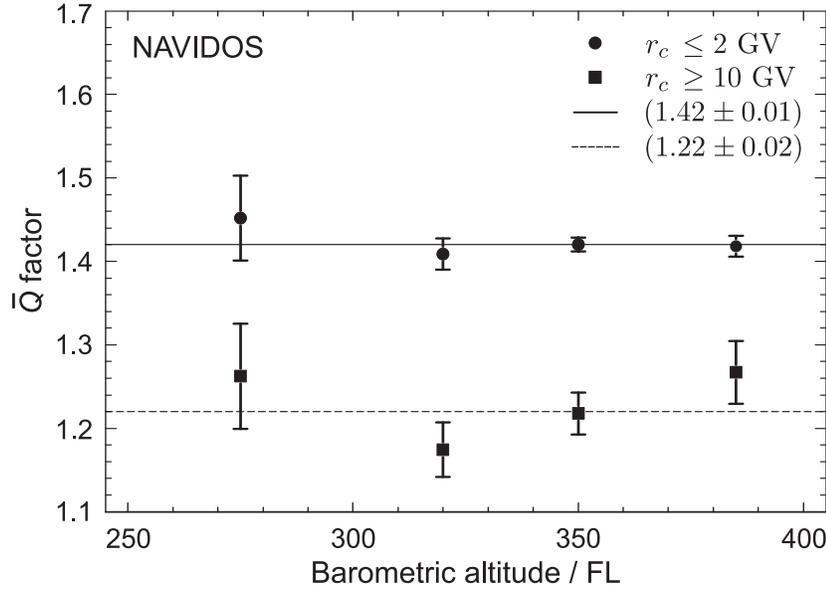


Abbildung 11. Die mit NAVIDOS bestimmten \bar{Q} -Faktoren als Funktion der barometrischen Höhe.

Tabelle 3. Die Kalibrierfaktoren N_Q für NAVIDOS-1 und NAVIDOS-2.

	NAVIDOS-1	NAVIDOS-2
N_Q	$1,86 \pm 0,13$	$1,89 \pm 0,16$

gemittelt. Es ist zu betonen, dass diese einen ähnlichen Verlauf zeigen wie die Kalibrierfaktoren (Abb. 8), weshalb auch hier eine Funktion wie in Gl. (3) verwendet wird, um die Daten zu beschreiben:

$$\bar{Q}_{\text{fit}}(R_c) = Q_0 + \frac{Q_1}{1 + e^{(R_c - R_0)/R_1}}. \quad (6)$$

Eine χ^2 -Anpassung an die Daten ergibt folgende Werte für die Parameter:

$$Q_0 = 1,184 \pm 0,011 \quad Q_1 = 0,28 \pm 0,10 \quad (7)$$

$$R_0 = (6,3 \pm 0,9) \text{ GV} \quad R_1 = (2,98 \pm 0,50) \text{ GV} \quad (8)$$

Damit ergibt sich für die Rate der Umgebungs-Äquivalentdosis $\dot{H}^*(10)_{\text{exp}}$ entlang einer Flugroute:

$$\dot{H}^*(10)_{\text{exp}} = N_Q \cdot \bar{Q}_{\text{fit}}(R_c) \cdot 1,2 \cdot \dot{D}_{\text{Si}}, \quad (9)$$

mit dem Kalibrierfaktor N_Q , der von der vertikalen Abschneidesteifigkeit unabhängig ist. Durch diese Kalibriermethode wird die Abhängigkeit von FDOScalc deutlich verringert, da nur noch ein konstanter Wert eingeht, der benötigt wird, um die Messwerte an FDOScalc anzupassen. In Tab. 3 sind die ermittelten Kalibrierfaktoren für die beiden NAVIDOS zusammengefasst.

Um zu zeigen, dass dieser Kalibrieransatz von der Flughöhe unabhängig ist, sind in Abb. 11 die \bar{Q} -Faktoren für verschiedene Höhen und unterschiedliche Bereiche der

vertikalen Abschneidesteifigkeit dargestellt. Wie ersichtlich ist, können die \bar{Q} -Faktoren im Rahmen der Unsicherheiten durch konstante Werte beschrieben werden.

3.1.3. Bestimmung von Routendosen

Die Kalibrierung der NAVIDOS-Detektoren zur Messung der Umgebungs-Äquivalentdosis (siehe Abschnitte 3.1.1 und 3.1.2) ist nur in Höhen ab FL 300 möglich. Während der Start- und Landephase muss deshalb ein anderer Ansatz gewählt werden, um die Beiträge zur Routendosis bestimmen zu können. Dazu wird angenommen, dass

- die Start- und Landephase mit konstanter Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit erfolgen;
- die Umgebungs-Äquivalentdosisrate bis FL 300 exponentiell ansteigt.

Die Dosisbeiträge durch die Startphase kann aus der Dreiecksfläche zwischen Startzeitpunkt, $(t_{\text{takeoff}}, \dot{H}^*(10)_{\text{FL0}})$, und dem Erreichen der Flughöhe FL300, $(t_{\text{cruise_start}}, \dot{H}^*(10)_{\text{FL300}})$, bestimmt werden. Gleiches gilt für die Landephase: $(t_{\text{cruise_end}}, \dot{H}^*(10)_{\text{FL300}})$ und $(t_{\text{landing}}, \dot{H}^*(10)_{\text{FL0}})$. Die Gesamtdosis $H^*(10)_{\uparrow\downarrow}$ aus der Start- (\uparrow) bzw. Landephase (\downarrow) kann dann wie folgt abgeschätzt werden:

$$H^*(10)_{\uparrow\downarrow} = (\dot{H}^*(10)_{\text{FL300}} - \dot{H}^*(10)_{\text{FL0}}) \cdot (t_{\text{cruise_start}} - t_{\text{takeoff}}) \cdot \frac{f_{\uparrow}}{2} + (\dot{H}^*(10)_{\text{FL0}} - \dot{H}^*(10)_{\text{FL300}}) \cdot (t_{\text{landing}} - t_{\text{cruise_end}}) \cdot \frac{f_{\downarrow}}{2} \quad (10)$$

mit der Umgebungs-Äquivalentdosisrate am Boden, $\dot{H}^*(10)_{\text{FL0}} = 0,06 \mu\text{Sv/h}$ und $f_{\uparrow} = 0,70$ und $f_{\downarrow} = 0,43$, den empirischen Korrekturen, welche den exponentiellen Anstieg der Dosisrate berücksichtigen. Daraus ergibt sich für die Routendosis

$$H^*(10)_{\text{route}} = H^*(10)_{\uparrow\downarrow} + H^*(10)_{\text{cruise}}, \quad (11)$$

wobei $H^*(10)_{\text{cruise}}$ entsprechend Gl. (4) berechnet wurde. Für normale Flüge beträgt die Zeit für Start- und Landephase ca. 20 min., was zu einem Beitrag zur Routendosis von maximal 1 μSv führt.

Die Bestimmung der Unsicherheiten erfolgte entsprechend den Vorgaben des *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [GUM 1995]. Folgende Einzelbeiträge gehen in die Betrachtung ein:

- der Unsicherheitsbeitrag der Kalibrierfunktion wurde mittels der Parameter und deren Unsicherheiten aus Tab. 2 ermittelt und beträgt ca. 1% bis 2%, in Abhängigkeit der vertikalen Abschneidesteifigkeit (siehe Abb. 8),
- die experimentelle Messunsicherheit der absorbierten Dosis in Si, D_{Si} , ergibt sich aus den einzelnen Zählraten,
- die Unsicherheit auf Grund der Berechnung des Dosisbeitrags aus der Start- und Landephase wurde mit 50% angenommen, was einem maximalen Unsicherheitsbeitrag von $\pm 0.7 \mu\text{Sv}$ entspricht.

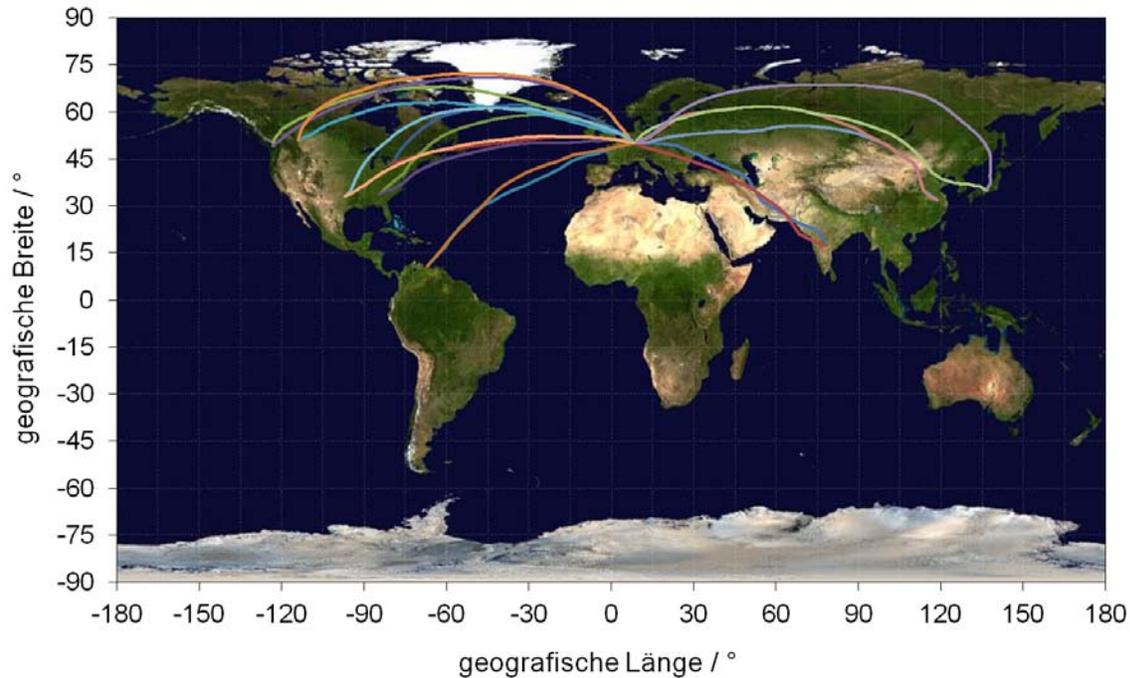


Abbildung 12. Darstellung der Weltkarte [NASA 2002] mit den Flugrouten der 18 Flüge, die für den Vergleich der Rechenprogramme verwendet wurden.

3.1.4. Vergleich von Rechenprogrammen

Der Vergleich der Rechenprogramme EPCARD 3.34, EPCARD 5.4.3, FREE und PCAIRE, die alle in Deutschland für die Dosisermittlung des fliegenden Personals zugelassen sind, erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem LBA als Aufsichtsbehörde. Mit den Programmherstellern wurde Anonymität bei der Diskussion und Darstellung der Ergebnisse vereinbart, sowie mit jedem Programmhersteller die jeweiligen Ergebnisse individuell diskutiert. Um bei der Mittelwertbildung allen Programmen das gleiche Gewicht zu geben, wurde aus den beiden EPCARD-Ergebnissen der Mittelwert verwendet. Zusätzlich zu den bereits erwähnten zugelassenen Programmen, sind die Berechnungen mit dem Programm FDOScalc der PTB in den Vergleich eingegangen. Dadurch gehen in den Vergleich insgesamt 72 Einzelwerte bzgl. der Umgebungs-Äquivalentdosis bzw. 54 Einzelwerte[‡] bzgl. der effektiven Dosis ein. Es sei hier nochmals erwähnt, dass die mit NAVIDOS gemessenen Routendosen nicht unabhängig von FDOScalc sind, da die NAVIDOS-Daten mit FDOScalc kalibriert wurden (siehe Kapitel 3.1.1).

Ausgehend von Frankfurt wurden Hin- und Rückflüge zu 9 Flugzielen ausgewählt, für die sowohl geografische Koordinaten als auch Messungen mit NAVIDOS-1 oder NAVIDOS-2 vorhanden sind (siehe Abb. 12 und Tab. 4). Alle Flugrouten überdecken Flüge nach Westen (Nord-Amerika) und Osten (Asien). Für Flüge in den Bereich geringer magnetischer Abschirmung, den Äquatorbereich, wurden Caracas

[‡] FDOScalc berechnet nur die Umgebungs-Äquivalentdosis.

Tabelle 4. Zusammenfassung der für den Vergleich verwendeten Flugrouten und der mit NAVIDOS gemessenen Routendosen $H^*(10)_{\text{route}}$ (siehe Abschnitt 3.1.3). Die Unsicherheiten sind für den Erweiterungsfaktor $k = 1$ angegeben. Die Zuordnung der verwendeten IATA-Kürzel zu den Flughäfen sind in Anhang A zusammengestellt.

Route	Monat	Flugzeit h	$H^*(10)_{\text{route}}$ μSv
FRA- HYD	09.2008	8,37	24,5±0,5
HYD - FRA	09.2008	8,95	25,7±0,5
FRA - ATL	09.2008	9,33	55,9±0,9
ATL - FRA	09.2008	8,72	49,9±0,8
FRA - CCS	11.2008	9,95	32,2±0,5
CCS - FRA	11.2008	9,35	35,2±0,6
FRA - DFW	04.2009	10,25	58,6±0,9
DFW - FRA	04.2009	9,63	57,0±0,9
FRA - KIX	12.2009	11,35	53,0±0,8
KIX - FRA	12.2009	11,70	65,8±0,9
FRA - YVR	03.2010	10,07	56,4±0,9
YVR - FRA	03.2010	9,17	47,8±0,8
FRA - YYZ	10.2010	7,95	38,5±0,7
YYZ - FRA	10.2010	6,70	40,0±0,7
FRA - YYC	10.2010	9,37	57,1±0,9
YYC - FRA	10.2010	8,67	49,0±0,8
FRA - NGK	02.2011	10,25	48,5±0,8
NKG - FRA	02.2011	11,68	64,7±0,9

und Hyderabad als Ziele ausgewählt. Das Flugdatum ergibt sich aus den Flugzielen und wurde zufällig ausgewählt. Die Flugrouten wurden durch Wegpunkte im Abstand von etwa 30 min, bzw. bei Höhenwechsel, vorgegeben und allen Programmanbietern mitgeteilt.

Für die ausgewählten Flüge wurden aus den NAVIDOS-Messungen die Routendosen bestimmt (siehe Abschnitt 3.1.3); in Tab. 4 sind alle Messwerte zusammengefasst. Die Berücksichtigung von Start- und Landephasen erfolgte über die Zeiten und Koordinaten zwischen Abheben und dem Erreichen der ersten Reiseflughöhe bzw. dem Ende der letzten Flughöhe und der Landung. Wie die einzelnen Programme die Integration der Dosiswerte von Start bis Landung durchführen, kann in einem solchen Vergleich nicht untersucht werden, da die detaillierten mathematischen Methoden nicht abgefragt wurden.

Abbildung 13 zeigt die Häufigkeitsverteilung der relativen Differenz

$$\Delta_{\text{route}} = \frac{H^*(10)_{\text{calc}} - H^*(10)_{\text{route}}}{H^*(10)_{\text{route}}}, \quad (12)$$

mit der berechneten Routendosis $H^*(10)_{\text{calc}}$, und der mit NAVIDOS gemessenen

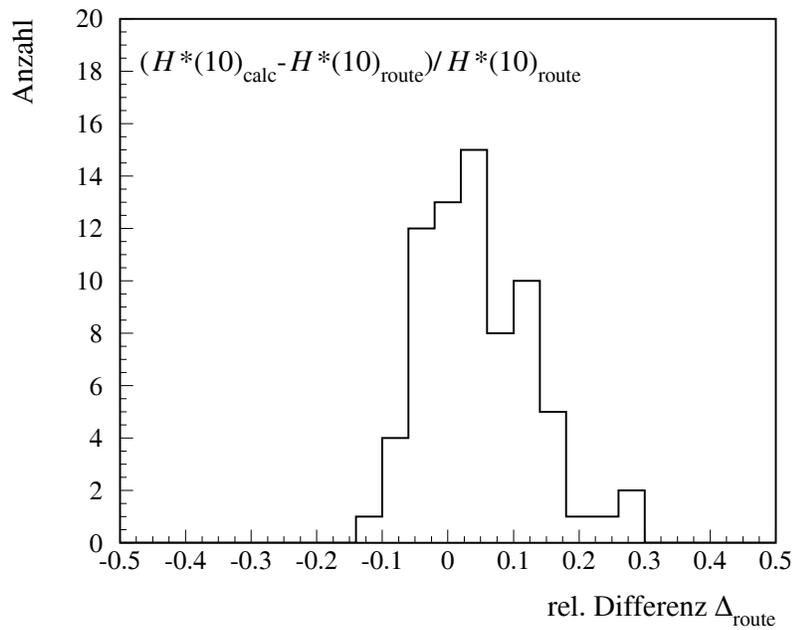


Abbildung 13. Ergebnis des Vergleichs der Rechenprogramme. Gezeigt ist die Häufigkeitsverteilung der nach Gl. (12) berechneten relativen Abweichungen der berechneten von den gemessenen Routendosen.

Routendosis $H^*(10)_{\text{route}}$ für alle vier Programme. Der Schwerpunkt der Verteilung ist um ca. +5 % verschoben, aber dennoch liegen alle Rechenergebnisse innerhalb eines Intervalls von $\pm 30\%$ um die Messwerte. Da sich die Ergebnisse aller Rechenprogramme innerhalb der zugelassenen Schwankungsbreite befinden, ist eine Anpassung einzelner Programme nicht empfehlenswert.

3.2. Bericht der CAU

Autoren: Thomas Möller, Bernd Heber, Sönke Burmeister

3.2.1. Datenauswertung

Es wurden die Messdaten vom NAVIDOS-1 für den Zeitraum vom 15.08.2008 bis zum 31.12.2011 und die Messdaten von dem NAVIDOS-2 für den Zeitraum vom 24.03.2009 bis zum 31.12.2011 ausgewertet. Für die Auswertung der Flüge wurden die Messdaten mit den Positionsdaten der einzelnen Flugzeuge synchronisiert, soweit diese vorhanden waren. Aus den Positionsdaten konnte dann zu jedem Messwert die vertikale geomagnetische Abschneidesteifigkeit R_c (Cutoff) berechnet werden. In Abbildung 14 ist die Zeitreihe der gemessenen Dosisrate für den gesamten Zeitraum für die Flugfläche FL 380 in einem Cutoff-Bereich kleiner als 1 GV dargestellt. Um die solare Aktivität während des Projektzeitraumes darzustellen, zeigt Abbildung 14 die Zählrate des Neutronenmonitors aus Oulu. Der Messzeitraum kann in zwei Phasen - eine Periode des solaren Minimums und eine Periode ansteigender Aktivität - unterteilt werden. Während der letzteren zeigen sich zwei Zeitbereiche mit nahezu konstanter Zählrate des Neutronenmonitors.

In Abbildung 15 ist die relative Änderung der Dosisrate bezogen auf den Monat November 2009 dargestellt. Dieser Monat wurde ausgewählt, weil die Zählraten des Neutronenmonitors aus Oulu maximal waren. Aufgrund der relativen Änderung der Dosisrate wurden dann die verschiedenen Perioden ausgewählt. Die Periode des solaren Minimums wurde so definiert, dass die monatlich gemittelte Dosisrate innerhalb von ± 2 % mit der im November 2009 übereinstimmt. Diese 2 % wurden unter Berücksichtigung der Unsicherheit der gemessenen Dosisrate auf einer Flugfläche von FL 380 beim niedrigsten Cutoff (< 1 GV) gewählt. Der Zeitraum des solaren Minimums erstreckt sich vom September 2008 bis Dezember 2009. Ab Januar 2010 beginnt die Phase der ansteigenden solaren Aktivität. Innerhalb dieser Phase wurden zwei Zeiträume näher betrachtet: Juli - Dezember 2010 (Aktivitätsphase A) und März - Juli 2011 (Aktivitätsphase B), wobei in der Aktivitätsphase B der Juni nicht mit einbezogen wurde. Für die Phase zunehmender Aktivität konnten auf diese Weise für 2010 nur die Daten von NAVIDOS-2 ausgewertet werden, da keine Positionsdaten vorlagen. Obwohl die DOSTEL Unit A, welches in NAVIDOS-1 eingebaut ist, einwandfrei funktionierte, konnte die vertikale geomagnetische Cutoff-Steifigkeit nicht bestimmt werden. Die Positionsdaten werden aber benötigt, um den vertikalen geomagnetischen Cutoff zu bestimmen.

3.2.2. Dosisraten im solaren Minimum

Die Messdaten des gesamten Zeitraumes wurden dann in Intervalle der vertikalen geomagnetischen Abschneidesteifigkeit R_c eingeteilt. Als Intervallbreite wurde 1 GV gewählt. Innerhalb eines Intervalls wurden die Daten den einzelnen Flugflächen zugeordnet und für jede Flugfläche ein Mittelwert mit der dazu gehörigen

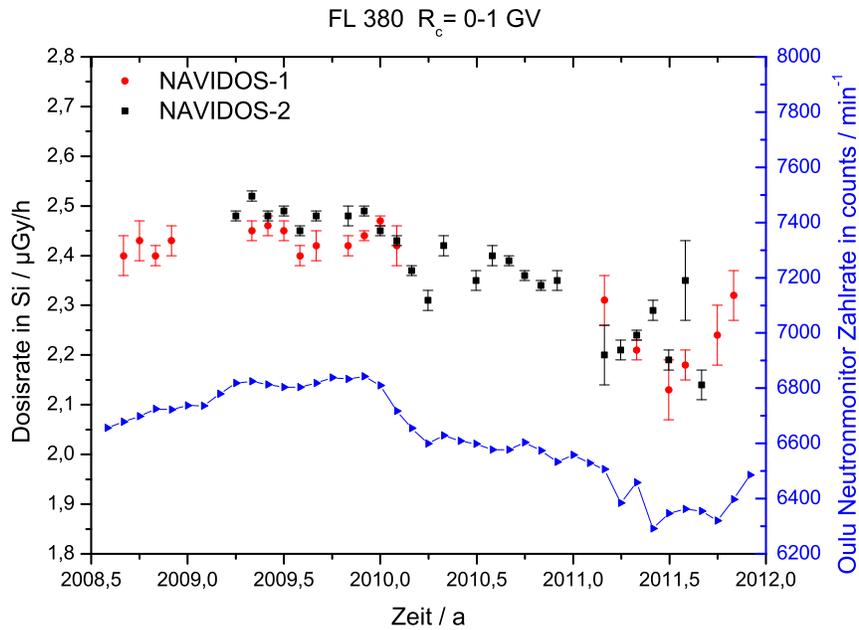


Abbildung 14. Monatsmittel des Oulu Neutronenmonitors (blaue Kurve) und der Dosisrate für die Flughöhe FL 380 bei Abschneidesteifigkeiten < 1 GV.

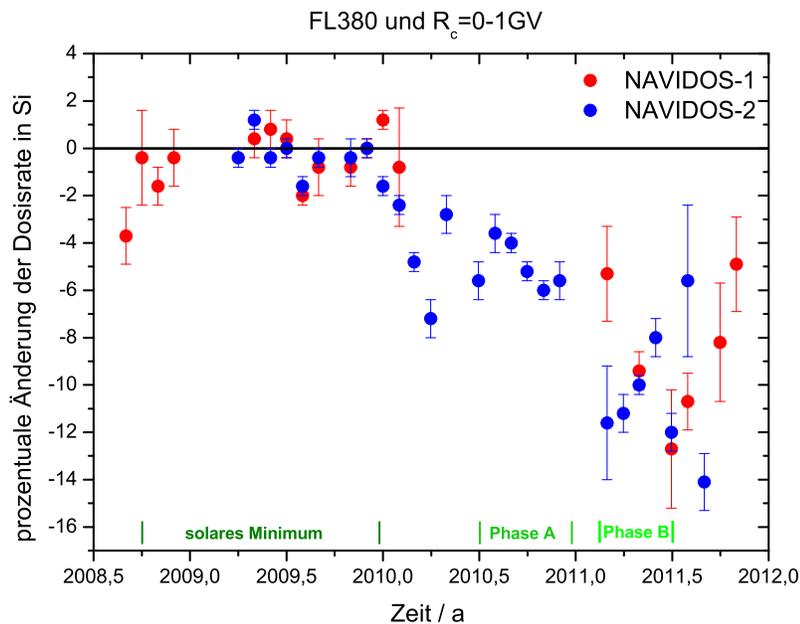


Abbildung 15. Relative Änderung der Dosisrate in Bezug auf den Monat November 2009. Deutlich zu erkennen sind die drei Zeitbereiche September 2008 - Dezember 2010 (solares Minimum), Juli - Dezember 2010 (Aktivitätsphase A) und März - Juli 2011 (Aktivitätsphase B).

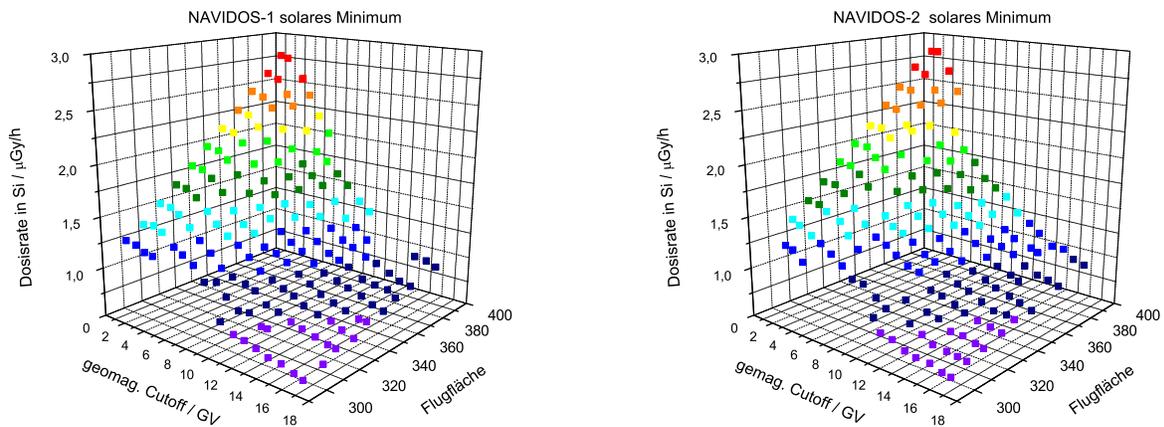


Abbildung 16. Messwerte des NAVIDOS-1 im Zeitraum 01.09.08 bis 01.01.10 (rechts) und Messwerte des NAVIDOS-2 im Zeitraum 24.03.09 bis 01.01.10 (links).

Standardunsicherheit bestimmt. Das Ergebnis der Auswertung ist in Abbildung 16 für NAVIDOS-1 auf der linken Seite und für NAVIDOS-2 auf der rechten Seite dargestellt. In Abbildung 17 ist die Abhängigkeit der Dosisrate vom geomagnetischen Cutoff für die Flugflächen FL 380 (oberer Datensatz) und FL 350 (unterer Datensatz) für NAVIDOS-1 (blaue Symbole) und NAVIDOS-2 (rote Symbole) zusammengefasst. Bei niedrigen magnetischen Cutoff-Steifigkeiten ($R_c < 2$ GV) wird eine relativ hohe konstante und für R_c größer als die atmosphärische Cutoff Steifigkeit eine abnehmende Dosisrate gemessen. Man erkennt, dass beide NAVIDOS Einheiten übereinstimmende Messwerte liefern und dass die Messergebnisse den erwarteten Verlauf zeigen.

Zusätzlich wurde für jedes R_c -Intervall die Höhenabhängigkeit der Strahlenexposition untersucht. In Abbildung 18 ist für drei verschiedene R_c -Intervalle ($R_c = 0 - 1$ GV, $R_c = 8 - 9$ GV, $R_c = 16 - 17$ GV) die gemessene Höhenabhängigkeit der beiden NAVIDOS-Einheiten (NAVIDOS-1 blau und NAVIDOS-2 rot) dargestellt und miteinander verglichen. Man erkennt eine gute Übereinstimmung beider Instrumente. Ein wesentliches Resultat der hier beschriebenen Analyse ist, dass beide NAVIDOS Einheiten die gleiche Responsefunktion besitzen. Dadurch ist es möglich, die Kalibrierfunktion $C(R_c)$ für das solare Minimum, die mit NAVIDOS-2 durch Vergleichsflüge mit dem PTB-Flugkoffer gewonnen wurde, für beide NAVIDOS Einheiten anzuwenden [Möller 2008]. Die Kalibrierfunktion ermöglicht, die gemessene Dosisrate in Silizium in eine Umgebungs-Äquivalentdosisrate umzurechnen. Das Ergebnis ist in Abbildung 19 für NAVIDOS-1 dargestellt.

Die folgende Kalibrierfunktion wurde hierfür verwendet [Möller 2008],

$$C(R_c) = N_0 + \frac{N_1}{1 + e^{(R_c - r_1)/r_0}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} N_0 &= 2,39 \pm 0,02 & N_1 &= 1,00 \pm 0,07 \\ r_1 &= (7,17 \pm 0,30) \text{ GV} & r_0 &= (1,88 \pm 0,25) \text{ GV} \end{aligned}$$

wobei R_c die geomagnetische Abschneidesteifigkeit ist. Durch Multiplikation der

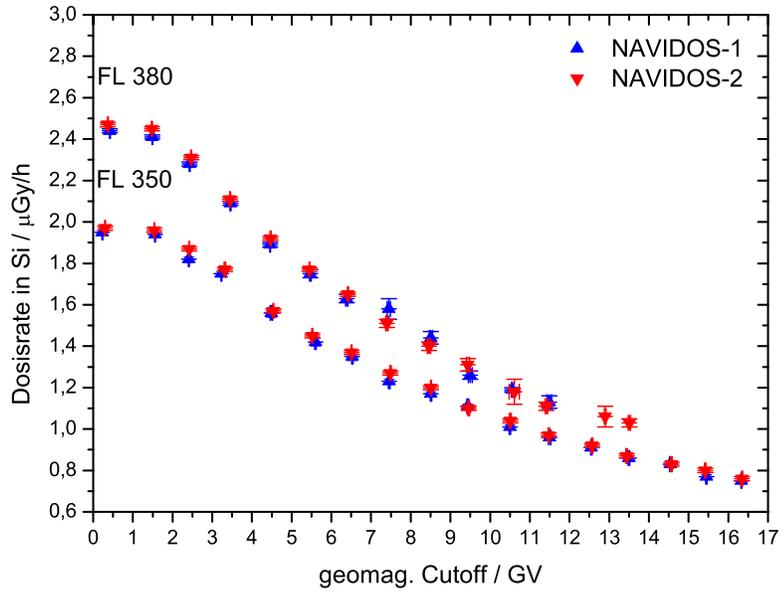


Abbildung 17. Abhängigkeit der Dosisrate in Silizium vom geomagnetischen Cutoff und Vergleich der Messwerte von NAVIDOS-1 und 2

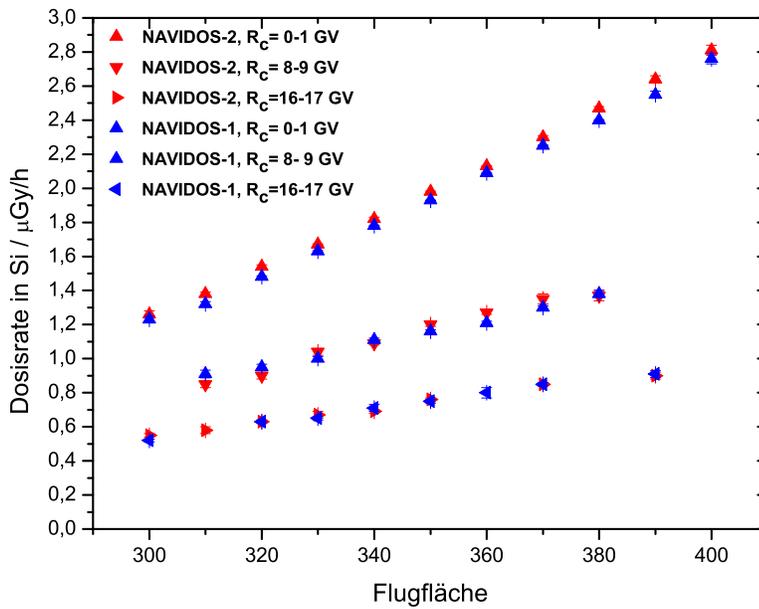


Abbildung 18. Höhenabhängigkeit der Dosisrate in Silizium und Vergleich der Messwerte von NAVIDOS-1 und 2

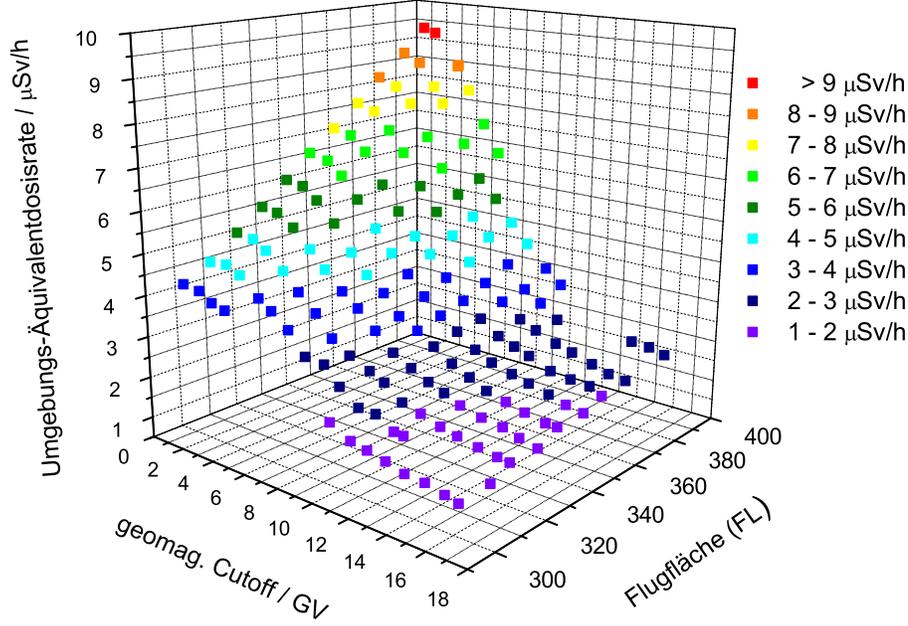


Abbildung 19. Die von NAVIDOS-1 berechnete Umgebungs-Äquivalentdosisrate aus den gemessenen Dosisraten in Silizium.

Kalibrierfunktion $C(R_c)$ mit der gemessenen Dosisrate \dot{D}_{Si} in Silizium erhält man dann im solaren Minimum die Umgebungs-Äquivalentdosisrate $\dot{H}^*(10)$:

$$\dot{H}^*(10) = C(R_c) \cdot \dot{D}_{Si} \quad (14)$$

Aus den gemessenen Energieverlustspektren des NAVIDOS ist es möglich, den Linearen Energie Transfer (LET) zu bestimmen und diesen dann in ein LET in Wasser zu konvertieren. Abbildung 20 zeigt ein solches LET Spektrum des NAVIDOS-1 in einem Cutoff-Intervall von 0 GV bis 1 GV. Durch Faltung des LETs in Wasser mit der ICRP 60 Funktion (schwarze Kurve in Abb. 20) ist es möglich, einen mittleren Qualitätsfaktor \bar{Q} zu bestimmen:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_i (D_{\text{Wasser}})_i \cdot Q_i}{\sum_i (D_{\text{Wasser}})_i} \quad (15)$$

Wobei $(D_{\text{Wasser}})_i$ die in Wasser konvertierte Kanaldosis aus dem Spektrum und Q_i der zu dem Kanal gehörige Qualitätsfaktor ist. Der mittlere Qualitätsfaktor beschreibt die biologische Wirksamkeit des jeweiligen Strahlungsfeldes.

Im folgenden werden die Energieverlustspektren im Zeitraum des solaren Minimums in R_c -Intervalle von 1 GV zusammengefasst und aus dem gesamten Spektrum ein mittlerer Qualitätsfaktor für das jeweilige Cutoff-Intervall bestimmt. Die Abbildung 21 zeigt das Ergebnis. Man erkennt, dass der mittlere Qualitätsfaktor in den Bereichen der Abschneidesteifigkeit von 0 GV bis 8 GV und 12 GV bis 17 GV konstant ist. Für

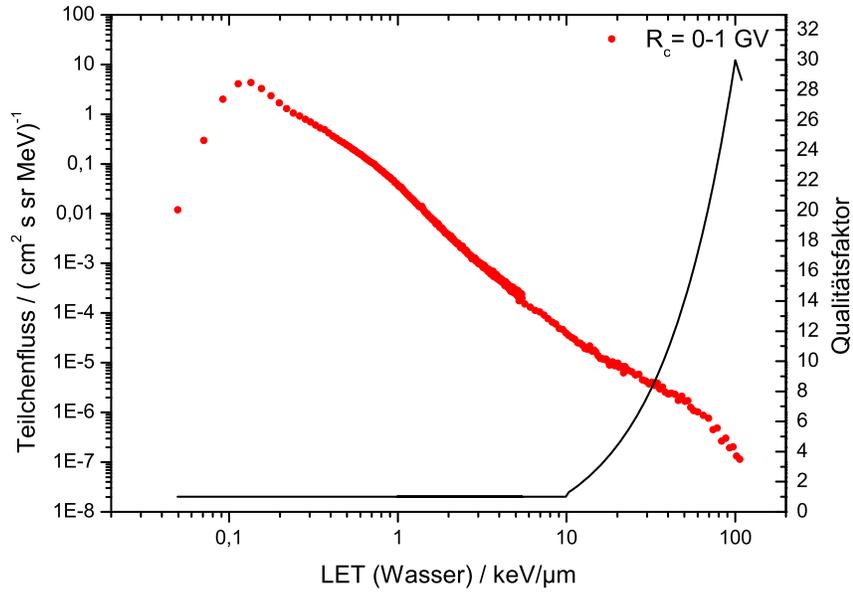


Abbildung 20. Gemessenes LET-Spektrum (Rot), das in Wasser konvertiert wurde mit der dazugehörigen ICRP 60 Funktion (Schwarz).

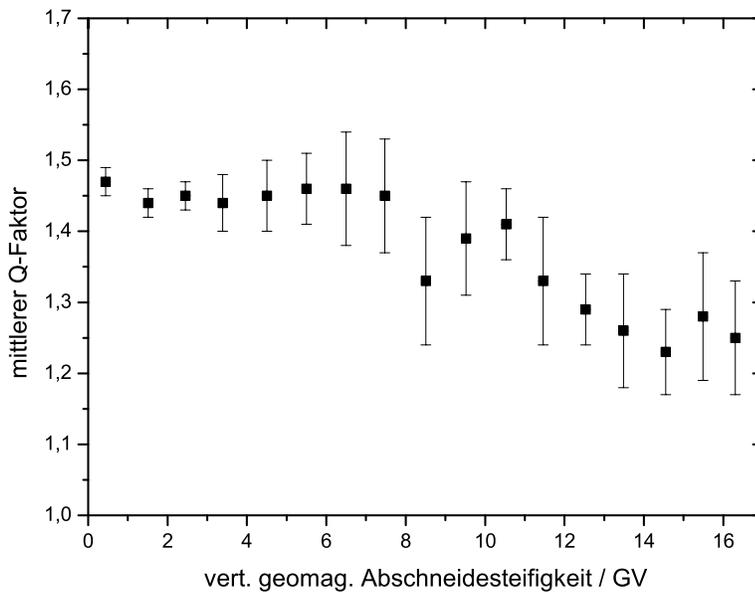


Abbildung 21. Abhängigkeit des mittleren Qualitätsfaktors von der vertikalen geomagnetischen Abschneidesteifigkeit.

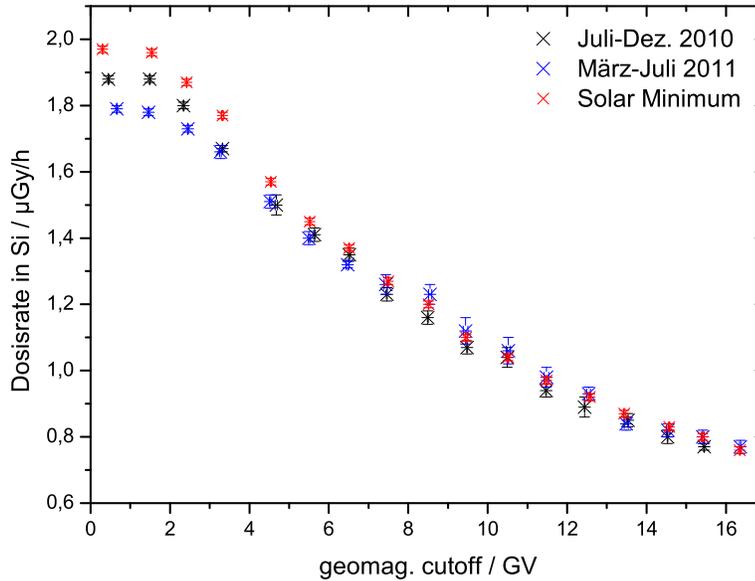


Abbildung 22. Auswirkung des solaren Zyklus auf die Dosisrate in Abhängigkeit vom der geomagnetischen Abschneidesteifigkeit gemessen mit NAVIDOS-2 für die Flugfläche 350.

den Cutoff-Bereich von 0 GV bis 8 GV ergibt sich für den mittleren Qualitätsfaktor ein Mittelwert von $1,45 \pm 0,08$ und für den Bereich von 12 GV bis 17 GV ein Wert von $1,26 \pm 0,10$. Die Wirksamkeit des Strahlungsfeldes auf biologisches Gewebe ist also in höheren magnetischen Breiten größer als in der Nähe des geomagnetischen Äquators.

3.2.3. Abhängigkeit der Dosisraten vom Solarzyklus

Die Dosisrate nimmt mit ansteigender solarer Aktivität ab. Um dies genauer zu untersuchen, wurden, wie oben beschrieben, drei Zeiträume ausgewählt um die Veränderung der Dosisrate in Abhängigkeit von der geomagnetischen Abschneidesteifigkeit und der Höhe zu untersuchen. Abbildung 22 zeigt die Veränderung der Dosisrate mit dem Solarzyklus exemplarisch für die Flugfläche FL 350. Die Datenpunkte im solaren Minimum entsprechen denen in Abbildung 17. Der Abbildung 22 entnimmt man, dass sich die Dosisrate oberhalb einer geomagnetischen Abschneidesteifigkeit von 5 GV nicht mehr signifikant ändert. Dagegen erkennt man eine deutliche Abnahme der Dosisrate unterhalb von 5 GV. Zur Verdeutlichung, um welche Bereiche sich es handelt, ist in Abbildung 23 eine Weltkarte gezeigt auf der die globale Verteilung der geomagnetischen Abschneidesteifigkeiten farblich codiert ist. Somit unterliegen die Dosisraten nur Veränderungen in den violett-blauen eingefärbten Regionen.

In Abbildung 24 ist die Höhenabhängigkeit der Dosisrate für drei verschiedene geomagnetische Abschneidesteifigkeitsbereiche ($R_c = 0 - 1$ GV, $R_c = 7 - 8$ GV, $R_c = 15 - 16$ GV) dargestellt. Im Cutoff-Bereich von $0 - 1$ GV sieht man ab einer Flugfläche

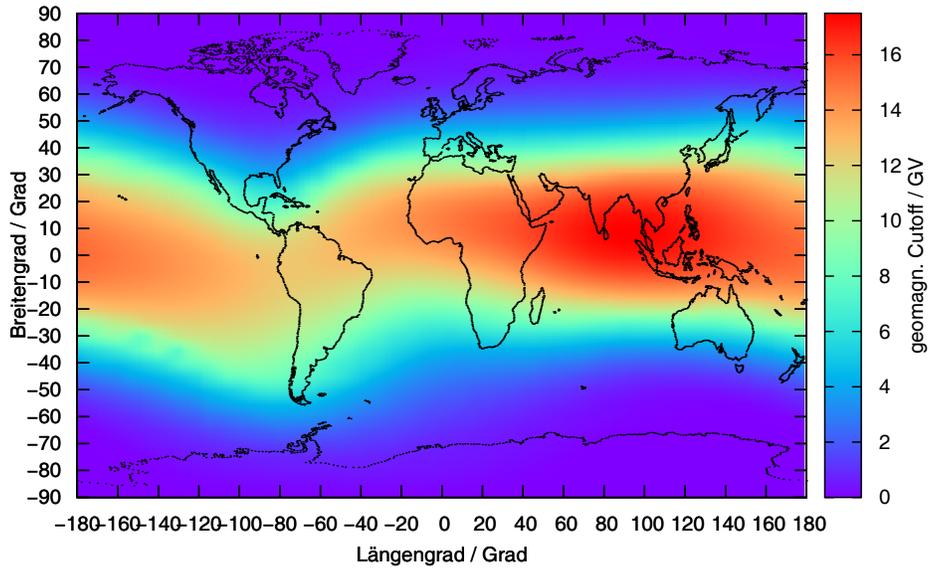


Abbildung 23. Globale Verteilung der geomagnetischen Abschneidesteifigkeiten (Cutoff).

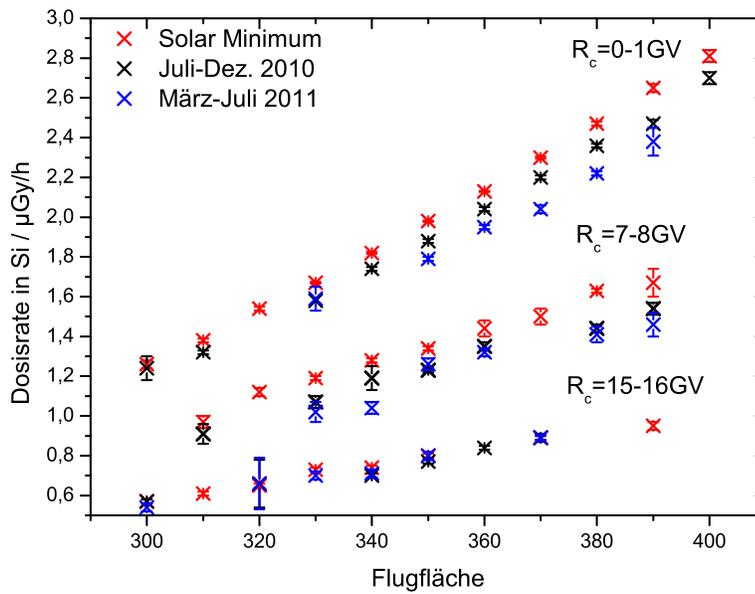


Abbildung 24. Höhenabhängigkeit der Dosisrate während des solaren Minimums (rote Symbole), Phase A (schwarze Symbole) und Phase B (blaue Symbole) gemessen mit NAVIDOS-2.

von FL 340 eine signifikante Änderung mit dem aktuellen solaren Zyklus. Wegen der geringen Statistik in den Flugflächen FL 300-330 sowie bei Cutoff-Steifigkeiten zwischen 7 GV und 8 GV (mittlere Datensätze in Abb. 24) können hier keine quantitativen Aussagen getroffen werden. Im hohen Cutoff-Bereich ($R_c = 15 - 16$ GV) ist in keiner der vermessenen Flughöhen eine signifikante Abhängigkeit der Dosisrate vom solaren Zyklus erkennbar. Qualitativ erkennt man aber, dass die Veränderung der Dosisrate mit dem solaren Zyklus nicht so stark ausgeprägt ist, wie in dem Bereich der niedrigen Abschneidesteifigkeit und dass eine signifikante Veränderung der Dosisrate erst ab einer Flugfläche von FL 340-350 zu erkennen ist.

3.3. Bericht des DLR

Autoren: Daniel Matthiä, Nicole Santen, Matthias Meier, Michael Wirtz, Günther Reitz

3.3.1. Simulationsrechnungen für Teilchenflüsse und LET-Spektrum

Mit Hilfe der GEANT4 Monte-Carlo Software wurden Simulationsrechnungen für die Teilchenflüsse und LET-Spektren in Flughöhe durchgeführt. Die Simulationsrechnungen wurden für primäre Protonen und Alphateilchen der galaktischen Strahlung im Energiebereich zwischen 50 MeV und 1000 GeV durchgeführt. Zusätzlich wurden Kerne der galaktischen Strahlung mit Kernladungszahl $Z > 2$ berücksichtigt. Hierbei wird ein Primärteilchen durch eine der Massenzahl des Kerns entsprechende Zahl von Protonen simuliert. Die Teilchenflüsse zu einer bestimmten Zeit an einer gegebenen Position, die durch die Flughöhe (Flightlevel FL) und die geographischen Koordinaten gegeben ist, wurden in folgender Weise bestimmt:

- Berücksichtigung der solaren Modulation im Primärspektrum auf Grundlage der Oulu Neutronenmonitorzählraten. Die monatlichen Mittelwerte dieser Zählrate lagen zwischen Anfang 2008 und Ende 2011 im Bereich von ungefähr 6300 min^{-1} und 6800 min^{-1} . Das Maximum, das gleichzeitig mit der maximalen Strahlenexposition zusammenfällt, wurde hierbei gegen Ende 2009 erreicht, das Minimum (minimale Strahlenexposition) gegen Ende 2011. In den Jahren 2012 und 2013 ist aufgrund des Verlaufes des solaren Zyklus mit einer weiteren Abnahme der Zählraten und damit auch der Strahlenexposition zu rechnen. Die Wahrscheinlichkeit für solare Strahlungsausbrüche, die die Strahlenexposition in Flughöhe signifikant erhöhen können, nimmt hingegen zu.
- Berücksichtigung der magnetischen Abschirmung durch das Erdmagnetfeld. Hierzu wurden die geographischen Koordinaten in den MOZAIC Daten in die effektive vertikale Abschneidesteifigkeit (effective vertical Cut-off Rigidity RC) umgerechnet und Primärteilchen unterhalb dieses ortsabhängigen Schwellwertes nicht berücksichtigt.
- Berechnung der sekundären Teilchenflüsse und der entsprechenden LET-Spektren auf der durch die Position gegebenen Höhe.

3.3.2. Vergleich des berechneten LET-Spektrums mit DOSTEL Daten

Das LET-Spektrum in Wasser wurde für eine Höhe von 11,3 km (FL 370, 220 g/cm^2) und einen geomagnetischen *Cut-off* von 0 GV berechnet und mit den Ergebnissen des DOSTEL verglichen. Hierbei zeigte sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Rechnungen mit den gemessenen Daten in weiten Bereichen (Abbildung 25). Zur Berechnung des LET-Spektrums wurden die Sekundärteilchenspektren in der oben angegebenen Höhe mit einem Einfallswinkel $< 60^\circ$ berechnet, um den Öffnungswinkel des DOSTEL Teleskops zu berücksichtigen. Die sich daraus ergebenden mittleren

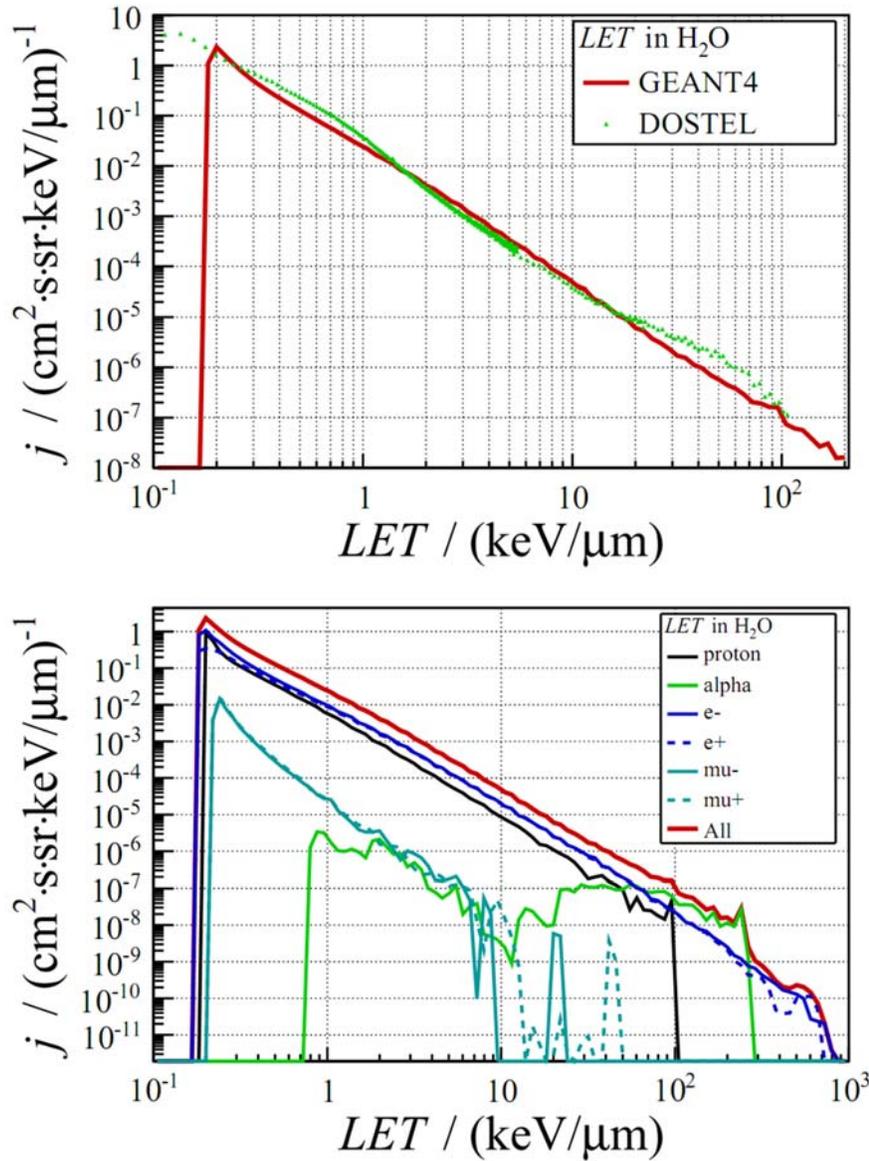


Abbildung 25. Oben: Vergleich des mit GEANT4 berechneten LET-Spektrums in Wasser mit den Ergebnissen der DOSTEL Messungen. Unten: Beiträge der verschiedenen Komponenten des Sekundärstrahlungsfeldes zum Gesamtspektrum.

Energiespektren wurden dann mit Hilfe einer Energie LET-Beziehung in LET-Spektren umgerechnet. In den experimentellen Daten sind alle Messungen in Flughöhen zwischen FL 300 und FL 400 bei $R_c < 1 \text{ GV}$ enthalten.

3.3.3. Evaluation und Kauf eines Neutronendosimeters

Zur Bestimmung der Neutronendosis auf den vorgesehenen Messflügen im Rahmen des Projektes wurde ein geeignetes Neutronendosimeter ermittelt und bestellt. Die Eignung der Neutronendosisleistungssonde LB6411-Pb der Firma Berthold Technologies GmbH & Co. KG in Verbindung mit dem zugehörigen LB123 Grundgerät wurden vom Hersteller für die Bestimmung der Neutronendosis in Flughöhe durch Messungen

am CERN Reference Field (CERF) belegt [Klett et al. 2006]. Bei dem LB6411-Pb handelt es sich um ein ^3He -Protonen-Rückstoß-Zählrohr mit PE Moderatorkugel und 10 mm Bleiummantelung mit einem Neutronenmessbereich bis 500 MeV und einem Dosisratenmessbereich von 30 nSv/h bis 100 mSv/h. Gegenüber einem *Tissue Equivalent Proportional Counter* (TEPC) verfügt das LB6411-Pb über eine signifikant höhere Empfindlichkeit [Schrewe 2000a, Schrewe 1999]. Weiterhin wurde verglichen mit dem Vorgängermodell durch Hinzufügen einer Bleiummantelung das Ansprechvermögen des Detektors im Hochenergiebereich deutlich verbessert, was insbesondere für Messungen des Strahlungsfeldes auf Reiseflughöhen von großer Relevanz ist. Ein Angebot der Berthold Technologies GmbH & Co. KG umfasst ein LB6411-Pb (7030 €), ein LB123 (1610 €) und Zubehör (280 €). Diese Geräte wurden erworben und auf dem Messflug nach Buenos Aires eingesetzt.

3.3.4. Messflug nach Buenos Aires im September 2010

Im Rahmen des Projektes wurde seitens DLR und Deutsche Lufthansa AG (LH) im September 2010 ein Messflug von Frankfurt (FRA) nach Buenos Aires (EZE) über Dakar (DKR) und Sao Paulo (VCP) geplant und in Kooperation mit der Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU) durchgeführt. Die PTB nahm entgegen der ursprünglichen Projektplanung nicht an dem Umlauf teil.

Der Umlauf wurde in Zusammenarbeit mit der Lufthansa Cargo AG realisiert und umfasste insgesamt fünf Flüge: FRA-DKR, DKR-VCP, VCP-EZE, EZE-DKR und DKR-FRA. Während der Flüge wurde die Exposition durch kosmische Strahlung ermittelt. Dazu wurden die während der Messflüge von verschiedenen Messinstrumenten akquirierten Daten (z.B. integrale Flugdosis als Umgebungsäquivalentdosis) auf ihre Abhängigkeiten von Flughöhe, lokaler Abschirmwirkung des Erdmagnetfelds und solarem Zyklus hin untersucht. Der Umlauf nach Buenos Aires wurde gewählt, um insbesondere weitere Daten zur experimentellen Untersuchung des Breitengradeffektes der Dosisrate akquirieren zu können. Bei den für die nachfolgenden Angaben verwendeten Messinstrumenten handelte es sich um einen gewebeäquivalenten Proportionalzähler (Hawk 2) zur Bestimmung der Energiedosis in Gewebe sowie der Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$ und zwei Halbleiterdetektoren (Liulin 6G MDU-1 und MDU-2) zur Bestimmung der Energiedosis in Silizium mit nachfolgender Konversion in eine Umgebungsäquivalentdosis. Zur Messung der Neutronendosis wurden ein REM-Counter (LB6411-Pb) sowie Blasendetektoren (BDs) verwendet. Weltraumwetterereignisse mit dosimetrischer Relevanz wie beispielsweise solare Teilchenereignisse wurden während des Umlaufs nicht beobachtet.

In Abbildung 26 ist die zeitaufgelöste Dosisrate des Hawk 2 beispielhaft für die Flugroute DKR-FRA dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass die teilweise deutlichen Variationen in der statistischen Natur der biologisch gewichteten elementaren Prozesse der Energiedeposition durch ionisierende Strahlung im sensitiven Volumen liegen und somit als unauffällig betrachtet werden können.

Um die Abhängigkeit der Umgebungsäquivalentdosisrate von der Abschneidesteifigkeit

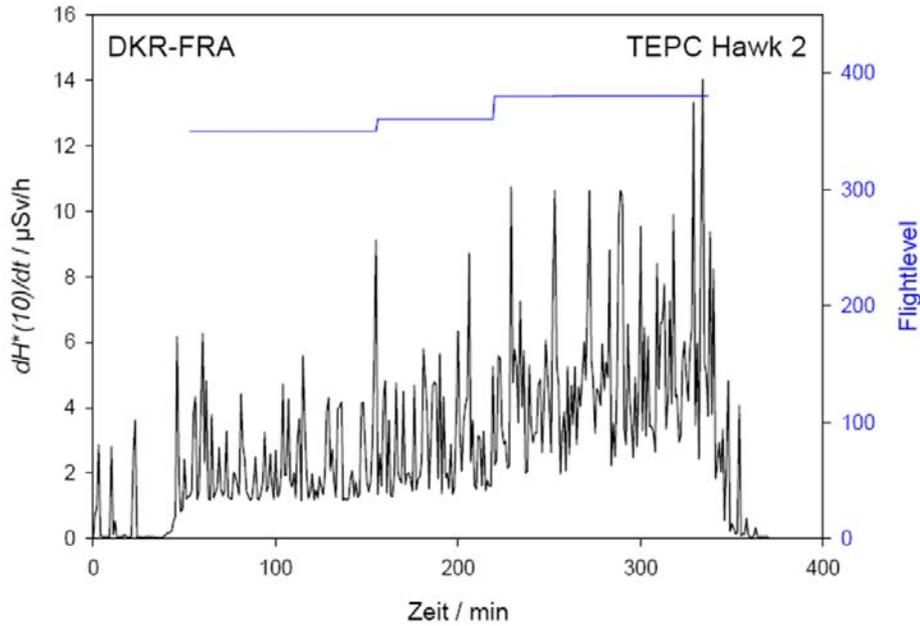


Abbildung 26. Umgebungsäquivalentdosisrate gemessen mit dem TEPC während des Fluges DKR-FRA (schwarz). In blau ist die Flughöhe dargestellt.

R_c zu untersuchen, wurden die auf allen Flügen des Buenos Aires Umlaufs in zwei Höhenbereichen (FL 320-FL 340 und FL 370-FL 390) gesammelten Daten in Intervalle der Abschneidesteifigkeit von $\Delta R_c = 1$ GV eingeteilt. Abbildung 27 zeigt oben die mit dem Hawk 2 gemessenen Umgebungsäquivalentdosisraten in den beiden Höhenbereichen über den abgedeckten Bereich der Abschneidesteifigkeit zwischen $R_c \approx 4$ GV (Frankfurt) und $R_c \approx 14$ GV (Dakar). Der untere Teil der Abbildung zeigt den mit dem REM-Counter gemessenen Beitrag der Neutronen zur Umgebungsäquivalentdosisrate für die gleichen Höhen- und Abschneidesteifigkeitsbereiche. Die Ergebnisse der gemessenen Gesamtflugdosis sind in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Insgesamt entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen einer Strahlenexposition durch die galaktische kosmische Strahlung ohne zusätzliche Beiträge durch Strahlungsausbrüche auf der Sonne.

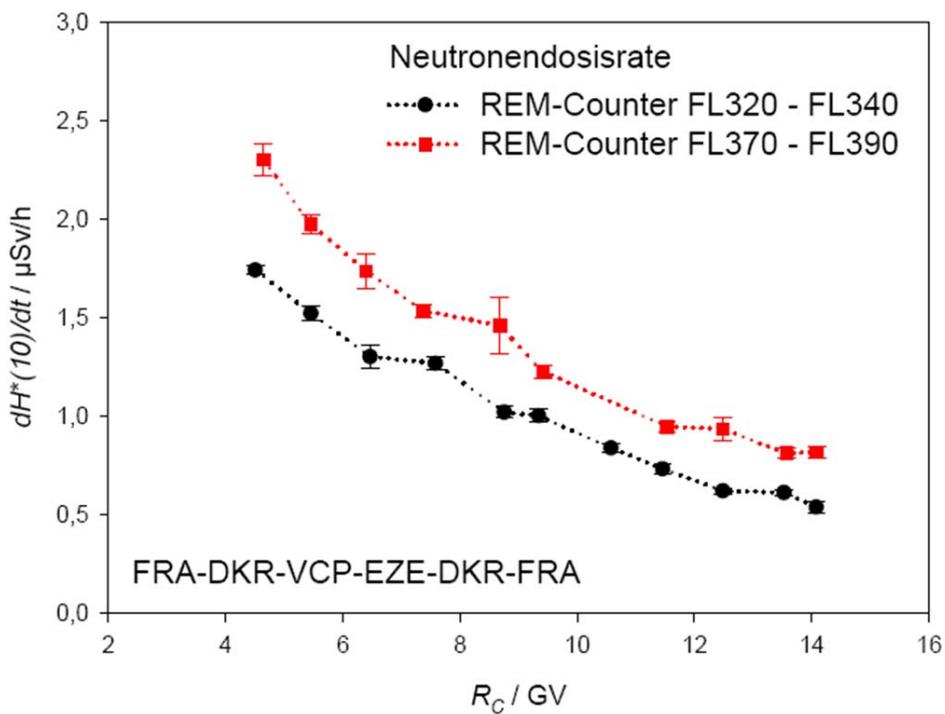
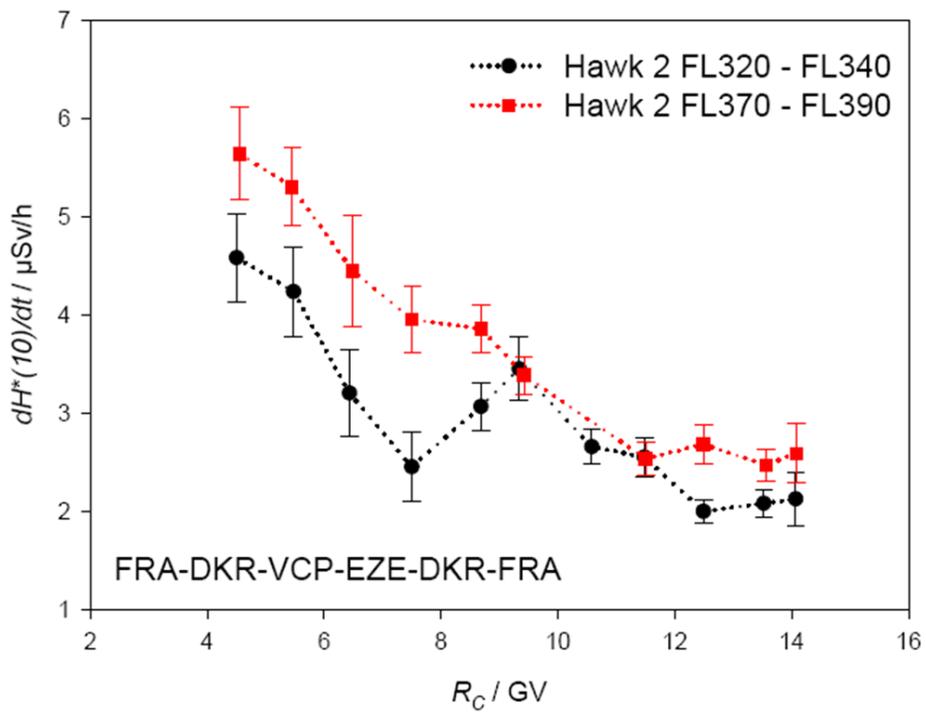


Abbildung 27. Oben: Umgebungsäquivalentdosisrate gegen R_c gemessen mit dem TEPC Hawk2 in zwei Höhenbereichen während des Umlaufs von Frankfurt nach Buenos Aires. Unten: Neutronenbeitrag zu $dH^*(10)/dt$ gemessen mit dem REM-Counter.

Tabelle 5. Umgebungsäquivalentdosis $H^*(10)$ in μSv .

Flugroute	Hawk 2	Liulin 6G MDU-1	Liulin 6G MDU-2
FRA-DKR	$13,9 \pm 0,6$	$14,6 \pm 0,8$	$14,1 \pm 0,8$
DKR-VCP	$12,6 \pm 0,5$	$13,2 \pm 0,7$	$13,1 \pm 0,7$
VCP-EZE	$7,4 \pm 0,4$	$7,2 \pm 0,6$	$7,2 \pm 0,6$
EZE-DKR	$21,9 \pm 0,6$	$21,9 \pm 0,8$	$22,3 \pm 0,8$
DKR-FRA	$17,9 \pm 0,7$	–	$17,9 \pm 0,9$

Tabelle 6. Neutronendosis $H^*(10)_{\text{neut}}$ in μSv .

Flugroute	Bubble Detectors	REM- Counter
FRA-DKR	$3,7 \pm 0,6$	$4,7 \pm 0,3$
DKR-VCP	$2,8 \pm 0,5$	$3,6 \pm 0,2$
VCP-EZE	$1,5 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,2$
EZE-DKR	$5,7 \pm 0,8$	$7,1 \pm 0,2$
DKR-FRA	$6,4 \pm 0,8$	$6,5 \pm 0,5$

Literaturverzeichnis

- [Bartlett et al. 2002] Bartlett, D., Beck, P., Heinrich, W., Pelliccioni, M., Roos, H., Schraube, H., Silari, M., Spurný, F. and d'Enrico, F. *Investigation of radiation doses at aircraft altitudes during a complete solar cycle*. Proceedings of the Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference, 24-29 September 2001, Vico Equense, Italy. ESA SP-477, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-749-6, 525-528 (2002)
- [Bartlett 2004] D. T. Bartlett *Radiation Protection Aspects of the Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew*. Radiation Protection Dosimetry **109**, 349-355 (2004)
- [Beaujean et al. 1999] R. Beaujean, J. Kopp and G. Reitz *Radiation exposure in Civil Aircraft*. Radiat. Prot. Dosimetry **85**, 287-290 (1999)
- [Beaujean 2005] R. Beaujean, S. Burmeister, F. Petersen and G. Reitz *Radiation Exposure Onboard Civil Aircraft*. Radiat. Prot. Dosimetry **116**, 312-315 (2005)
- [Beck et al. 2005] P. Beck, M. Latocha, S. Rollet, G. Stehno *TEPC reference measurements at aircraft altitudes during a solar storm*. Advances in Space Research **36**, 1627-1633 (2005)
- [Beck et al. 1999] Beck, P., Ambrosi, P., Schrewe, U. and O'Brien, K. *ACREM, aircrew radiation exposure monitoring*. OEFZS Report OEFZS-G-0008 (ARC Seibersdorf Research) (1999)
- [Beck et al. 2009] P. Beck, J.-Bottollier, G. Reitz, W. Rühm and F. Wissmann *Cosmic Radiation and Aircrew Exposure*. Konferenzbeiträge zum EURADOS Workshop auf der Jahrestagung 2009 in Braunschweig. Radiat. Prot. Dosimetry **136**, 231-328 (2009)
- [Beck 2009a] P. Beck *Overview of Research on Aircraft Crew Dosimetry During the Last Solar Cycle*. Radiat. Prot. Dosimetry **136**, 244-250 (2009)
- [Beck et al. 2009b] P. Beck, C. Dyer, N. Fuller, A. Hands, M. Latocha, S. Rollet and F. Spurný *Overview of On-Board Measurements During Solar Storm Periods*. Radiat. Prot. Dosimetry **136**, 297-303 (2009)
- [BMVBS 2006] Forschungsvorhaben L-4/2006-50.0320/2006 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Vorhabensdauer 15.11.2006 - 30.06.2009
- [Bütikofer, Flückiger 2011] R. Bütikofer and E. O. Flückiger *Radiation doses along selected flight profiles during two extreme solar cosmic ray events*. Astrophys. Space Sci. Trans. **7**, 105-109 (2011)
- [Dachev et al. 1989] Dachev, Ts. P., Yu. N. Matviichuk, J. V. Semkova, R. T. Koleva, B. Boichev, P. Baynov, N. A. Kanchev, P. Lakov, Ya. J. Ivanov, P. T. Tomov, V. M. Petrov, V. I. Redko, V. I. Kojarinov, R. Tykva *Space radiation dosimetry with active detections for the scientific program of the second Bulgarian cosmonaut on board the Mir space station*. Adv. Space Res. **9**, 247-251 (1989)
- [EC 2003] European Commission, *Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew*; Radiation Protection 140; erhältlich bei der EU unter http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/140.pdf
- [EURADOS 2005] ERSS-EURADOS Newsletter **16**, Reports *Notification of Ground Level Event: January 20, 2005 (2005-02-11)*

- [EURADOS 2007] ERSS-EURADOS Newsletter **20**, Reports *Notification of Ground Level Event: December 13th, 2006 (2007-02-06)*
- [Gerdung et al. 1995] S. Gerdung, P. Pihet, J. E. Grindborg, H. Roos, U. J. Schrewe and H. Schuhmacher *Operation and Application of Tissue-Equivalent Proportional Counters*. Radiat. Prot. Dosimetry **61**, 381 (1995)
- [Green et al. 2005] A. R. Green, L. G. I. Bennett, B. J. Lewis, F. Kitching, M. J. McCall, M. Desormeaux and A. Butler *An empirical approach to the measurement of the cosmic radiation field at jet aircraft altitudes*. Adv. Space Res. **36**, 1618-1626 (2005)
- [GUM 1995] International Organization for Standardization (ISO) *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. Geneva (1995)
- [ICRP 2007] *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP **37** (2007)
- [Klett et al. 2006] Klett et al., Radiation Measurements **41** S279-S282 (2006)
- [Lantos, Fuller 2003] P. Lantos and N. Fuller *History of the Solar Particle Event Radiation Doses On-board Aeroplanes Using a Semi-Empirical Model and Concorde measurements*. Radiat. Prot. Dosimetry **104**, 199-210 (2003)
- [Lewis et al. 2002] B. J. Lewis, L. G. I. Bennett, A. R. Green, M. J. McCall, B. Ellaschuk, A. Butler and M. Pierre *Galactic and Solar Radiation Exposure to Aircrew During a Solar Cycle* Radiat. Prot. Dosimetry **102**, 207-227 (2002)
- [Malusšek et al. 2011] A. Malusšek, O. Ploc, I. Kovář, K. Brabcová and F. Spurný *Routine Individual Monitoring of Aircraft Crew Exposure; Czech Experience and Results 1998-2008*. Radiat. Prot. Dosimetry **144**, 684-687 (2011)
- [Matthiä et al. 2009] D. Matthiä, B. Heber, G. Reitz, M. Meier, L. Sihiver, T. Berger and K. Herbst *Temporal and spatial evolution of the solar energetic particle event on 20 January 2005 and resulting radiation doses in aviation*. J. Geophys. Res. **114**, A08104 (2009)
- [Marenco et al. 1998] A. Marenco, V. Thouret, P. Nédélec, H. Smit, M. Helten, D. Kley, F. Karcher, P. Simon, K. Law, J. Pyle, G. Poschmann, R. von Wrede, C. Hume and T. Cook *Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZAIC airborne program, An overview*. J. Geophys. Res. **103**, 25,631-25, 642 (1998)
- [Meier, Hubiak 2010] M. M. Meier and M. Hubiak *Measurements of the radiation quality factor Q at aviation altitudes during solar minimum (2006-2008)*. Adv. Space Res. **45**, 1178-1181 (2010)
- [Möller 2008] T. Möller *Charakterisierung eines Dosimeters zur Messung der Ortsdosisleistung in Flughöhen*. Diplomarbeit, Universität Kiel (2008)
- [Ploc et al. 2011] O. Ploc, K. Pachnerová Brabcová, Spurný, A. Malusšek, and T. Dachtev *Use of Energy Deposition Spectrometer Liulin for Individual Monitoring of Aircrew*. Radiat. Prot. Dosimetry **144**, 611-614 (2011)
- [NASA 2002] Bildquelle: NASA; erhältlich über <http://visibleearth.nasa.gov>

- [Niita et al. 2010] K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L. Sihver *PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23* JAEA-Data/Code 2010-022 (2010)
- [Reitz et al. 2005] G. Reitz, R. Beaujean, E. Benton, S. Burmeister, Ts. Dachev, S. Deme, M. Luszik-Bhadra, and P. Olko *Space Radiation Measurements Onboard ISS - The Dosmap Experiment*, Radiat. Prot. Dosimetry **116**, 374-379 (2005)
- [Rossi, Zaider 1996] H. H. Rossi and M. Zaider, *Microdosimetry and its application*. Springer, Berlin, Heidelberg, (1996)
- [Sáez Vergara, Dominguez-Mompell 2009] J. C. Sáez Vergara, R. Dominguez-Mompell Román, *The implementation of cosmic radiation monitoring in routine flight operation of IBERIA airline of Spain: 1 y of experience of in-flight permanent monitoring*. Radiat. Prot. Dosimetry **136**, 291-296 (2009)
- [Schrewe 1999] Ulrich J. Schrewe *ACREM Air Crew Radiation Exposure Monitoring*. Laborbericht PTB-6.31-99-2, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig (1999)
- [Schrewe 2000] U. J. Schrewe *Global Measurements of the Radiation Exposure of Civil Air Crew from 1997 to 1999*. Radiat. Prot. Dosimetry **91**, 347-364 (2000)
- [Schrewe 2000a] U. Schrewe *Strahlenexposition im Flugzeug*. StrahlenschutzPraxis **1** 37-43 (2000)
- [Spurný, Dachev 2001] Spurný, F. and Dachev, Ts. *Measurements in an aircraft during an intense solar flare, ground level event 60, on the 15th April 2001*. Radiat. Prot. Dosimetry **95**, 273-275 (2001)
- [Spurný 2002] F. Spurný and Ts. Dachev *Aircrew onboard Dosimetry with a Semiconductor Spectrometer*. Radiat. Prot. Dosimetry **100**, 525-528 (2002)
- [Spurný 2003] Spurný, F., Dachev, Ts. *Long-Term Monitoring of the Onboard Aircraft Exposure Level with a Si-Diode Based Spectrometer*. Adv. Space Res. **32**, 53-58 (2003). Weitere Informationen zu Liulin unter <http://www.stilrad.stil.bas.bg>
- [SRIM] J. F. Ziegler and J. Biersack *SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter*. The program SRIM can be obtained via www.srim.org
- [Waker 1995] A. J. Waker *Principles of Experimental Microdosimetry*. Radiat. Prot. Dosimetry **61**, 297-308 (1995)
- [Wissmann et al. 2004] F. Wissmann, F. Langner, J. Roth and U. Schrewe *A Mobile TEPC-Based System to Measure the Contributions to $\dot{H}^*(10)$ at Flight Altitudes*. Radiat. Prot. Dosimetry **110**, 347-349 (2004)
- [Wissmann 2006] F. Wissmann *Long-term Measurements of $\dot{H}^*(10)$ at Aviation Altitudes in the Northern Hemisphere*. Radiat. Prot. Dosimetry **121**, 347-357 (2006)
- [Wissmann 2007] F. Wissmann, A. Rupp and U. Stöhlker *Characterization of dose rate instruments for environmental radiation monitoring*. Kerntechnik **72**, 192-198 (2007)

[Wissmann et al. 2010] F. Wissmann, M. Reginatto and T. Möller *Ambient Dose Equivalent at Flight Altitudes: A Fit to a Large Set of Data using a Bayesian Approach*. J. Radiol. Prot. **30**, 513-524 2010

[Wissmann et al. 2010a] F. Wissmann, S. Burmeister, E. Dönsdorf, B. Heber, M. Hubiak, T. Klages, F. Langner, T. Möller and M. Meier *Field calibration of dosimeters used for routine measurements at flight altitudes*. Radiat. Prot. Dosimetry **140**, 319-325 (2010)

A. Zusammenstellung der Flughäfen und deren IATA-Code

Für den Vergleich von Rechenprogrammen ausgewählten Flugziele ausgehend von Frankfurt.

Bezeichnung	Ort	Land
ATL	Atlanta	USA
CCS	Caracas	Venezuela
DFW	Dallas/Fort Worth	USA
FRA	Frankfurt	Deutschland
HYD	Hyderabad	Indien
KIX	Osaka	Japan
NKG	Nanjing	China
YVR	Vancouver	Kanada
YYC	Calgary	Kanada
YYZ	Toronto	Kanada

B. Abkürzungen

DOSTEL	Dosimetrie-Teleskop
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CAU	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
CME	<i>Coronal Mass Ejections</i>
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin
DLH	Deutsche Lufthansa AG, Frankfurt
FDOScale	Programm der PTB, basierend auf Messungen zwischen 1997 und 2006, zur Berechnung der Umgebungs-Äquivalentdosis in Flughöhen
FL	Flight Level: barometrische Flughöhe in der Einheit ft geteilt durch 100 ft
GLE	<i>Ground Level Enhancement</i>
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
LHT	Lufthansa Technik AG, Frankfurt
NAVIDOS	<i>Navigation & Dosimetry System</i>
π DOS	<i>PTB Dosimetry System</i> ; Dosis-Referenzmessgerät der PTB
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
RAMONA	Mitglieder der Kooperation RAMONA (<i>Radiation Monitoring Onboard Aircraft</i>): CAU, DLH, DLR, PTB, Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik der TU Braunschweig, Lufttransportunternehmen LTU
Routendosis	die über einen gesamten Flug von Start bis Landung akkumulierte Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)_{\text{route}}$, bzw. effektive Dosis E_{route}
SEP	<i>Solar Energetic Particle event</i>
SPE	<i>Solar Particle Event</i>

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz