

DI Michael Autischer MBA

Simulation von Kosmischer Strahlung und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften
Technische Physik



Graz University of Technology

Technische Universität Graz

Betreuer:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Kindl

Institut für Materialphysik

In Kooperation mit dem

AIT - Austrian Institute of Technology

Graz, August 2010

Kurzfassung

Der Mensch ist ständig ionisierender Strahlung ausgesetzt. Auch wenn man die künstliche Strahlenbelastung durch kerntechnische Anlagen oder durch die Medizin außer Acht lässt, gibt es natürliche Strahlungsquellen, vor denen man sich kaum schützen kann. Hierzu zählt zum einen die Terrestrische Strahlung, zum anderen die Kosmische Strahlung. Diese Arbeit zeigt ein Konzept, wie mit Hilfe von Monte Carlo Simulationen diese Kosmische Strahlung berechnet werden kann.

Am Beginn der Arbeit wird ein kurzer historischer Überblick über die Erforschung der Kosmischen Strahlung gegeben und die aktuelle gesetzliche Lage in Österreich beschrieben. Ein Teil der Arbeit stellt Messungen mit den zur Verfügung stehenden Messgeräten in Referenzstrahlungsfeldern vor, die in späterer Folge zur Validierung der erstellten Simulationsgeometrien verwendet wurden. Ein weiteres Kapitel beschäftigt sich mit Messungen unter Tage, an der Erdoberfläche und in Flugzeugen. Den Hauptteil der Arbeit stellt die Beschreibung der verwendeten Simulationsgeometrien und Modelle mit den dazugehörigen Ergebnissen dar. Die Simulationsergebnisse werden abschließend noch mit den zuvor beschriebenen Messungen verglichen und diskutiert.

Die zahlreichen Vergleiche der Messungen mit den Simulationsergebnissen zeigen zum Großteil eine sehr gute Übereinstimmung. Daraus lässt sich vermuten, dass die vorgenommene Modellierung gut gelungen ist und sich auch für weiterführende Aufgaben, bei der Ermittlung von Strahlenexponierungen durch Kosmische Strahlung, hervorragend eignet.



Abstract

Mankind is exposed to ionising radiation. The source of the natural radiation can be distinguished in two groups. One is the terrestrial radiation, coming out of the ground. The second one is cosmic radiation, which comes from the universe.

In this treatise a concept is shown how to simulate this cosmic radiation with a Monte Carlo based simulation code. In the introduction a short retrospection of the historical research on cosmic radiation is given and the current situation in Austrian law is briefly explained. The first part describes measurements in different reference fields, which were later used for validation of the built simulation geometries. Another chapter deals with measurements below and on the surface of the earth. Further measurements on board airplanes have been carried out. The main part of the treatise is used to describe the used models and simulation geometries. Finally the measurements and the results of the simulations are compared and discussed.

The comparisons between measurements and the simulations show a very good agreement in almost all constellations. This lets us assume that the used models describe the situations well and that the developed system could be used for cosmic radiation dosimetry.



© Michael Autischer

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	1
II	Liste der Abkürzungen	3
1	Motivation	4
1.1	Allgemeine Betrachtungen	4
1.2	Historische Erforschung	4
1.3	Gesetzliche Regelung in Österreich	5
2	Kosmische Strahlung	9
2.1	Entstehung	9
2.1.1	Solare Komponente	9
2.1.2	Galaktische Komponente	9
2.2	Zusammensetzung	10
2.3	Wechselwirkung mit der Atmosphäre	11
2.3.1	Effekte in der Atmosphäre und Cascade Showers	11
2.4	Variation der Kosmischen Strahlung	13
2.4.1	Einfluss der Sonnenaktivität	13
2.4.2	Solar Deceleration Potential	13
2.4.3	Ablenkung im Erdmagnetfeld	15
2.4.4	Änderung des Erdmagnetfeldes	16
3	Größen	17
3.1	Energiedosis (Absorbed Dose)	17
3.2	Äquivalentdosis (Dose Equivalent)	17
3.3	Äquivalentdosis (Equivalent Dose)	17
3.4	Umgebungsäquivalentdosis (Ambient Dose Equivalent)	18
3.5	Effektive Dosis (Effective Dose)	18
3.6	Lineare Energieübertragung (LET Linear Energy Transfer)	19
3.7	Qualitätsfaktor	19
3.8	Lineale Energie	20
3.9	Fluenz	20
3.10	Mean Chord Length	21
3.11	Mikrodosimetrisches Spektrum	22
3.12	Flugfläche	24
4	Verwendete Messgeräte	25
4.1	Tissue Equivalent Proportional Counter	25
4.1.1	Allgemein	25
4.1.2	HAWK-TEPC	26
4.1.3	Mean Chord Length	28
4.2	HAWK-SEPC	28
4.2.1	Aufbau / Materialien	28
4.2.2	Mean Chord Length	30
4.3	LiuLin	30
4.3.1	Aufbau / Materialien	30
4.3.2	Mean Chord Length	31
5	Kalibriermessungen	32
5.1	Einleitung	32
5.2	Photonen	32
5.3	Neutronen	33
5.3.1	Hochenergetische Neutronen mit 100MeV und 200MeV	34
6	Messungen in gemischten Strahlenfeldern	42
6.1	Leerwertmessung unter der Erdoberfläche	42
6.2	Bergmessungen	44

6.2.1	Obergurgl.....	44
6.2.2	Wurmkogel.....	47
6.3	Messungen in Luftfahrzeugen des ÖBH	50
6.3.1	Messbedingungen	50
6.3.2	Messverläufe	51
6.3.3	Dosisleistungsvergleiche	52
6.4	Zusammenfassung der Messungen in gemischten Strahlenfeldern	55
7	Monte Carlo Simulationen	57
7.1	Monte Carlo Codes.....	57
7.1.1	Allgemein	57
7.1.2	Fluka	57
7.2	Simulationsgeometrien.....	58
7.2.1	HAWK-TEPC	58
7.2.2	HAWK-SEPC	59
7.2.3	LiuLin A4.....	59
7.3	Simulation von Referenzfeldern.....	60
7.3.1	Simulationsquellen	60
7.3.2	Photonen Simulationen	63
7.3.3	Neutronen Simulationen	74
7.4	Simulation der Kosmischen Strahlung	81
7.4.1	Beschreibung des verwendeten Modells.....	81
7.4.2	Simulationen	88
8	Vergleich von Simulationen und Messungen.....	118
8.1	Photonen.....	118
8.1.1	662 keV (¹³⁷ Cs).....	118
8.1.2	1,2 MeV (⁶⁰ Co).....	120
8.1.3	Winkelabhängigkeit	122
8.2	Neutronen	124
8.2.1	0,5MeV	124
8.2.2	1,2MeV	125
8.2.3	2,5MeV	125
8.2.4	5MeV	126
8.2.5	8MeV	126
8.2.6	14,8MeV	127
8.2.7	61MeV	127
8.2.8	100MeV	128
8.2.9	200MeV	128
8.3	Vergleich von Simulation und Messung kosmischer Strahlung.....	129
8.3.1	Flugmessung mit dem ÖBH	129
8.3.2	Messflug über Aalborg.....	133
8.3.3	Messflug über Rom	135
9	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	137
9.1	Ergebnisse.....	137
9.2	Ausblick	141
10	Anhang.....	142
10.1	Abbildungsverzeichnis	142
10.2	Tabellenverzeichnis	152
10.3	Formelverzeichnis.....	154
10.4	Literaturverzeichnis	155



II Liste der Abkürzungen

A	Austria, Österreich
AIT	Austrian Institute of Technology
BMLV	Bundesministerium für Landesverteidigung
DK	Dänemark
FIP-StrSchV	Strahlenschutzverordnung für fliegendes Personal
FL	Flugfläche
FLUKA	FLUktuierende KAskade
GLE	Ground Level Event
H.E.S.S	High Energy Stereoscopic System
I	Italien
LET	Lineare Energieübertragung
LIS	Local Interstellar Spectrum
MC	Monte Carlo
MCA	Multi Chanel Analyser
MCL	Mean Chord Length
MCNP	Monte Carlo N Particle
ÖBH	Österreichisches Bundesheer
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt in Braunschweig
SEP	Solar Energetic Particles
SEPC	Silicon Equivalent Proportional Counter
SDP	Solar Deceleration Potential
StrSchG	Strahlenschutzgesetz
TEPC	Tissue Equivalent Proportional Counter
UCL	Université catholique de Louvain (Belgien)



1 Motivation

1.1 Allgemeine Betrachtungen

Alle Lebewesen auf unserem Planeten sind ionisierender Strahlung ausgesetzt. Die Strahlung setzt sich dabei aus einem kosmischen Teil und einem terrestrischen Teil zusammen. In dieser Arbeit wird auf die Problematik der kosmischen Strahlung näher eingegangen. Speziell befasst sich diese Arbeit mit der Möglichkeit des Messens dieser Strahlung. Dafür stehen mehrere Instrumente zur Verfügung. Einerseits gibt es passive Dosimeter, andererseits aktive Messgeräte.

Das Feld der kosmischen Strahlung ist sehr komplex, daher ist es notwendig, die Eigenschaften der Messgeräte mit denen man messen will, sehr genau zu kennen. Einige dieser Eigenschaften können durch Messungen in Referenzstrahlungsfeldern bestimmt werden, jedoch zeigt sich, dass die Charakterisierung der Messgeräte für gemischte und hochenergetische Teilchen nicht möglich ist, da keine entsprechenden Referenzstrahlungsfelder vorhanden sind. Daher bietet es sich an, das Messgerät mit einer virtuellen Messgeometrie in einer Simulation zu ersetzen. In der Simulation ist es ohne weiteres möglich, den Einfluss einzelner Parameter auf das Messergebnis genau zu untersuchen. Um die Daten der Simulationen als vertrauenswürdig einstufen zu können, müssen vor Beginn solcher Simulationen die Ergebnisse von Simulation und Messung unter vergleichbaren Bedingungen verglichen werden. Erst wenn diese Vergleiche nur geringe Abweichungen zeigen, kann daraus geschlossen werden, dass die virtuelle Simulationsgeometrie der realen Messgeometrie gut entspricht. Genau diese Vergleiche und Charakterisierungen werden in der Arbeit durchgeführt und genauer betrachtet.

Eine weitere komplexe Aufgabe, die in dieser Arbeit beschrieben wird, ist die Simulation der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre. Dabei wird von der kosmischen Hintergrundstrahlung ausgegangen und diese durch die gesamte Erdatmosphäre transportiert. Dabei gibt es in den unterschiedlich dichten Luftschichten unterschiedlich häufige Reaktionen. Dadurch hat unsere Atmosphäre eine abschirmende Wirkung. Speziell dieser Einfluss kann mittels Simulation wiedergegeben werden. Damit kann auch die Variation der Strahlung in Abhängigkeit der Höhe für unterschiedliche Positionen auf der Erde wiedergegeben werden. Um all diese variierenden Parameter mittels Messungen zu erfassen wäre ein extremer technischer und zeitlicher Aufwand nötig. Diese Arbeit zeigt dabei die Möglichkeiten auf, die solche Simulationen bieten und auch die Qualität der Ergebnisse der Simulationen wird detailliert diskutiert.

1.2 Historische Erforschung

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung geht zurück auf das Jahr 1912. In diesem Jahr entdeckte der Österreicher Viktor Franz Hess, dass die Zählraten bei Ballonexperimenten bis zu einer bestimmten Höhe abnahm, dann aber mit steigender Höhe wieder merklich zunahm. Daraus schloss er, dass die Strahlung aus dem Weltall kommt. Und obwohl es noch einige Jahre dauerte, bis die Idee der kosmischen Strahlung allgemein anerkannt war, gilt das Jahr 1912 seitdem als ihr Entdeckungsjahr. Hess erhielt 1936 für seine Arbeiten zur kosmischen Strahlung zusammen mit C. D. Anderson den Nobelpreis für Physik.

Durch den Ausbruch des ersten Weltkrieges wurde die Forschung auf diesem Gebiet stark gehemmt. Das Thema wurde 1921 von W. Nernst wieder aufgegriffen, indem er eine Theorie verbreitete, in der er die Entstehung der kosmischen Strahlung auf den Zerfall von Sternen zurückführte. 1926 postulierte R. A. Milikan, dass diese Strahlung aus dem All gleichmäßig von allen Seiten auf die Erde trifft [Mili1926]. Ein Jahr darauf gelang ihm erstmals die Aufnahme einer Teilchenspur eines kosmischen Teilchens. Damit war auch die Teilchennatur dieser Strahlung bestätigt. 1932 entdeckte C. D. Anderson das Positron bei Nebelkammerexperimenten. Dies war der Beginn der modernen Teilchenphysik. Zu dieser Thematik gab es bis zum Zweiten Weltkrieg viele theoretische und auch experimentelle Arbeiten. So berechneten Mitte der 1930er Jahre östliche und westliche Forscher unabhängig voneinander die Existenz weiterer bis dahin unbekannter Elementarteilchen, die später als Myonen und Pionen bekannt wurden und experimentell nachgewiesen werden konnten. [Seki1985] Für diese Arbeiten war die Erfindung von Teilchenbeschleunigern in den 30er Jahren eine wichtige Grundlage. Die Verbesserung dieser Geräte führte dazu, dass in den 50er Jahren und auch danach viele neue Teilchen entdeckt wurden. Zu dieser Zeit wurde auch angenommen, dass die Strahlung aus dem Weltall sehr viel höhere Energien aufweist, als man sie auf der Erde mit den Beschleunigern herstellen konnte. Durch diese Erkenntnis angeregt, wurden mehrere Theorien über so genannte „kosmische Beschleuniger“ entwickelt. Dabei war die Weiterentwicklung der klassischen Teilchen- und Hochenergiephysik für diese Erkenntnisse sehr hilfreich.

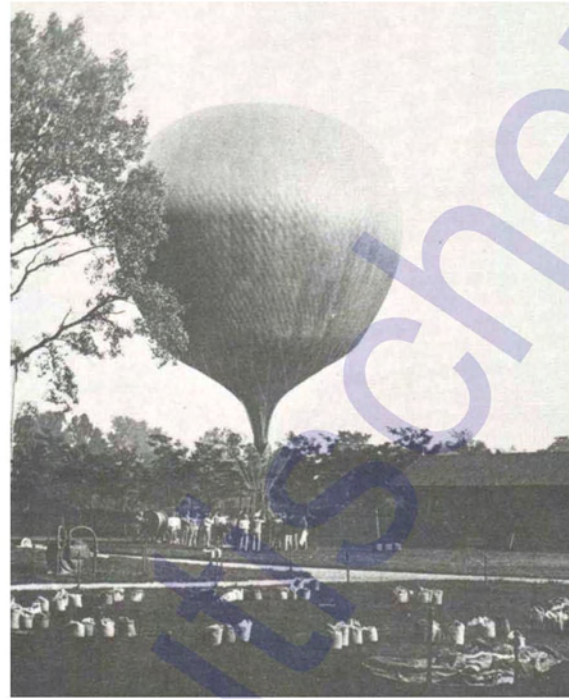


Abbildung 1-1: Ballonaufstieg des Victor Hess um 1912 [Seki1985].

1.3 Gesetzliche Regelung in Österreich

1996 wurde mit der Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996 (Richtlinie zur Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen) der erste Vermerk getätigt, dass die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union Vorkehrungen zur Ermittlung der Strahlenexposition von fliegendem Personal zu treffen haben. In Artikel 42 dieser Richtlinie ist dies wie folgt definiert.



Richtlinie 96/29/Euratom Artikel 42: [Euro1996]

Schutz des fliegenden Personals

(1) Die Mitgliedstaaten treffen die erforderlichen Vorkehrungen, damit Unternehmen, die Flugzeuge betreiben, die Exposition des fliegenden Personals durch kosmische Strahlen berücksichtigen, wenn diese voraussichtlich mehr als 1 mSv jährlich beträgt. Die Unternehmen ergreifen geeignete Maßnahmen, um insbesondere

- die Exposition des betreffenden Personals zu ermitteln;
- bei der Aufstellung der Arbeitspläne der ermittelten Exposition im Hinblick auf eine Verringerung der Dosen für stark exponiertes fliegendes Personal Rechnung zu tragen;
- die betreffenden Arbeitnehmer über die gesundheitlichen Gefahren ihrer Arbeit zu unterrichten;
- Artikel 10 auf weibliche Mitglieder des fliegenden Personals anzuwenden.

Lange Zeit gab es in Österreich keine Regelung für die der kosmischen Strahlung exponierten Personen in der zivilen Luftfahrt. Der erste Vermerk einer Gefahr durch kosmische Strahlung ist im Strahlenschutzgesetz vom Dezember 2004 in § 36k vermerkt.

StrSchG §36k: [Öste2004]

(1) Unternehmer und sonstige Arbeitgeber haben die Exposition des fliegenden Personals durch kosmische Strahlen zu berücksichtigen, soweit diese den Dosisgrenzwert für Einzelpersonen der Bevölkerung im Kalenderjahr überschreiten kann. Sie haben geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um insbesondere

1. die Exposition des fliegenden Personals zu ermitteln,
2. bei der Aufstellung der Arbeitspläne der ermittelten Exposition im Hinblick auf eine Verringerung der Dosen für stark exponiertes Personal Rechnung zu tragen,
3. das betreffende Personal über die gesundheitlichen Gefahren zu informieren,
4. den Schutz analog § 30 Abs. 3 und 4 für weibliche Mitglieder des fliegenden Personals zu gewährleisten.

Die Ermittlungsergebnisse müssen spätestens sechs Monate nach dem Einsatz vorliegen.

(2) Der Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft legt im Einvernehmen mit dem Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesminister für Landesverteidigung durch Verordnung fest, welche Schutzmaßnahmen zu ergreifen sind, die Grundzüge, nach welchen Verfahren die Exposition des fliegenden Personals zu ermitteln ist, ob und unter welchen Voraussetzungen ärztliche Untersuchungen durchzuführen sind und wie und in welcher Form die Meldungen über die ermittelte Exposition an das Zentrale Dosisregister weiterzuleiten sind.

(3) Die Ermittlung der Exposition des fliegenden Personals gemäß Abs. 1 Z 1 hat durch für die Dosisermittlung des fliegenden Personals akkreditierte Stellen oder durch vom Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft im Einvernehmen mit dem Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesminister für Landesverteidigung zugelassenen Stellen zu erfolgen. Der Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft hat im Einvernehmen mit dem Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie und allenfalls dem Bundesminister für Landesverteidigung durch Verordnung die Kriterien für diese Zulassung festzulegen.

(4) Dem Ansuchen um Zulassung zur Durchführung der Expositionsermittlung des fliegenden Personals ist ein umfassender Nachweis über das Vorhandensein der notwendigen personellen und technischen Ausstattung der ansuchenden Stelle anzuschließen.



Erst 2006 wurde von der Republik Österreich eine eigene zum Gesetz zugehörige Strahlenschutzverordnung für fliegendes Personal (FIP-StrSchV) beschlossen, welche fliegendes Personal unter bestimmten Voraussetzungen als beruflich strahlenexponierte Personen wie folgt definiert.

FIP-StrSchV §2: [Öste2006]

- (1) Einzelpersonen des fliegenden Personals, die im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit in 12 aufeinander folgenden Monaten eine effektive Dosis von über 1 Millisievert erhalten können, gelten als beruflich strahlenexponierte Personen. [Öste2006]
- (2) Im Rahmen dieser Verordnung wird zwischen zwei Kategorien von beruflich strahlenexponierten Personen unterschieden:
1. Kategorie A: beruflich strahlenexponierte Personen, die im Rahmen ihrer beruflichen Tätigkeit über einen Zeitraum von 12 aufeinander folgenden Monaten eine effektive Dosis von mehr als 6 Millisievert erhalten können;
 2. Kategorie B: beruflich strahlenexponierte Personen, die nicht der Kategorie A angehören.

Die höchstzulässige Dosis für fliegendes Personal ist in dieser Verordnung in §3 folgendermaßen definiert.

FIP-StrSchV §3: [Öste2006]

- (1) Die durch kosmische Strahlung verursachte effektive Dosis darf bei Einzelpersonen des fliegenden Personals in 12 aufeinanderfolgenden Monaten grundsätzlich nicht mehr als 20 Millisievert betragen.
- (2) In begründeten Ausnahmefällen ist ein Überschreiten der effektiven Dosis gemäß Abs. 1 zulässig, sofern in einzelnen Jahren eine effektive Dosis von 50 Millisievert und in 60 aufeinanderfolgenden Monaten eine effektive Dosis von 100 Millisievert nicht überschritten wird.
- (3) Im Falle einer Schwangerschaft darf die effektive Dosis für das ungeborene Kind vom Zeitpunkt der Mitteilung über die Schwangerschaft bis zu deren Ende 1 Millisievert nicht überschreiten.

Auch die Grundpflichten von Luftfahrzeugbetreibern wurden in §4 der Verordnung festgelegt.

FIP-StrSchV §4: [Öste2006]

- (1) Luftfahrzeugbetreiber im Sinne dieser Verordnung sind Unternehmer oder sonstige Arbeitgeber, die zur Durchführung ihrer Flüge einer Genehmigung auf Grund des Luftfahrtgesetzes, BGBl. Nr. 253/1957, bedürfen oder Personen als fliegendes Personal sonst einsetzen.
- (2) Luftfahrzeugbetreiber haben unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls Maßnahmen zu treffen, um die Strahlenexposition der bei ihnen als fliegendes Personal eingesetzten Personen so niedrig zu halten, wie dies nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Faktoren möglich und vertretbar ist.
- (3) Der Pflicht zur Dosisminimierung nach Abs. 2 ist insbesondere bei der Erstellung der Arbeitspläne und bei der Festlegung der Flugrouten und -profile Rechnung zu tragen.
- (4) Luftfahrzeugbetreiber haben mindestens alle fünf Jahre, bei relevanten Änderungen der für die Dosis maßgeblichen Parameter jedoch unverzüglich, für die bei ihnen als fliegendes Personal eingesetzten Personen anhand der in **Anlage 1** festgelegten oder gleichwertiger Kriterien eine Abschätzung der individuell zu erwartenden effektiven Dosis aus kosmischer Strahlung durchzuführen. Die Luftfahrzeugbetreiber haben die Grundlagen und Ergebnisse dieser Abschätzung schriftlich zu dokumentieren. Diese Dokumentation ist sieben Jahre aufzubewahren und der zuständigen Behörde auf Verlangen vorzulegen.
- (5) Für Personen, für die die Dosisabschätzung gemäß Abs. 4 eine effektive Dosis von über 1 Millisievert im Jahr ergibt, hat der Luftfahrzeugbetreiber die

Strahlenexposition auf monatlicher Basis durch Auswertestellen gemäß § 5 ermitteln zu lassen. Er hat der zuständigen Behörde und der zur Wahrnehmung des Arbeitnehmerschutzes berufenen Behörde unverzüglich mitzuteilen, welche Auswertestelle mit der physikalischen Kontrolle beauftragt wurde.

(6) Für Personen, die bei mehreren Luftfahrzeugbetreibern als fliegendes Personal eingesetzt werden, haben diese Betreiber die Dosisabschätzung gemäß Abs. 4 und die allenfalls erforderliche Dosisermittlung gemäß Abs. 5 entsprechend zu koordinieren.

(7) Sofern für die Dosisermittlung Dosismessungen in Flugzeugen erforderlich sind, sind diese durch den Luftfahrzeugbetreiber zu ermöglichen. Gleiches gilt für den Fall, dass der Auswertestelle als Voraussetzung für die Zulassung oder Akkreditierung im Rahmen des Qualitätsmanagements die Durchführung von Dosismessungen in Flugzeugen vorgeschrieben wurde; in diesem Fall hat die Auswertestelle die anfallenden Kosten zu tragen.

Da diese Regelungen im direkten Zusammenhang mit dem Arbeitnehmerschutz stehen, sollten diese wenn möglich auch in einem entsprechenden integrierten Managementsystem eingebettet werden [Haus2007] [Auti2007b].



© Michael Autischer

2 Kosmische Strahlung

2.1 Entstehung

Die Entstehung der Kosmischen Strahlung ist bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht endgültig geklärt. Sicher ist, dass diese Teilchen der Kosmischen Strahlung nicht nur in unserer Sonne entstehen (Solare Komponente), sondern auch aus dem Universum außerhalb unseres Sonnensystems kommen (Galaktische Komponente). [Alkhofer75]

2.1.1 Solare Komponente

Die Solare Komponente der Kosmischen Strahlung besteht aus dem kontinuierlichen Sonnenwind und den sporadischen Sonneneruptionen. Ein mögliches Szenario ist die Emission von hochenergetischen Teilchen (SEP Solar Energetic Particles) von der Sonne. Diese werden von dem Magnetfeld der Sonne abgelenkt und entfernen sich spiralförmig um die Feldlinien des Magnetfelds von der Sonne. Dadurch kann die Erde von solchen Teilchen nur getroffen werden, wenn die Teilchen von der westlichen Sonnenhemisphäre emittiert werden [Hein2002]. Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Weglängen erreichen hochenergetische Protonen ($> 100\text{MeV}$) die Erde typischerweise zirka eine Stunde nach der Emission von Röntgenstrahlung aus der Region der Sonne. Niedriger energetische Teilchen (ca. 20MeV) benötigen für diese Wege Zeiten im Bereich von einigen Stunden. Dadurch ergibt sich eine auffällige zeitliche Veränderung des Energiespektrums dieser Teilchen. Dabei ist in der Anfangsphase das Spektrum härter als nach einigen Stunden in einer späteren Phasen.

Eine weitere Möglichkeit von Emission ist bei einer koronalen Masseneruption gegeben [Hein2002]. Dabei werden eher niederenergetische Teilchen von der Sonne emittiert. Solche Teilchen kommen von zentralen Regionen der Sonne und benötigen unterschiedlich lange bis sie die Erde erreichen. Diese Zeiten liegen im Bereich von einigen Tagen bis hin zu einigen Wochen [Allk1975].

2.1.2 Galaktische Komponente

Die galaktische Komponente der kosmischen Strahlung entsteht im Allgemeinen außerhalb unseres Sonnensystems und trifft isotrop auf die Atmosphäre der Erde [Allk1975].

Eine vorhergesagte Quelle sind hierbei Supernovae Explosionen. Beobachtungen zeigten, dass solche Ereignisse in unserer Galaxie etwa alle 30 bis 50 Jahre vorkommen. Dabei werden pro Ereignis Energien von 10^{43} bis 10^{44} Joule frei [Allk1975]. Erstmals wurde diese Quelle der kosmischen Strahlung von H.E.S.S. – Forschungsteam nachgewiesen [Ahar2004]. Im H.E.S.S. Experiment wird ein System von abbildenden Cherenkov-Teleskopen verwendet um die kosmische Gammastrahlung im Bereich von 100 GeV bis zu einigen 10 TeV zu untersuchen [Hoff1997], [Ahar2006], [Acci2009]. In diesem Zusammenhang gelang es auch zu zeigen, dass hochenergetische Teilchen auch in der Hülle einer übergebliebenen Supernova beschleunigt werden können [Ahar2004].

Eine weitere Quelle von Kosmischer Strahlung können Pulsare darstellen. Diese Objekte besitzen starke magnetische und elektrische Felder, welche die Teilchen der Kosmischen Strahlung beschleunigen. [Allk1975]

Da die Vermutung nahe liegt, dass Kosmische Strahlung nicht nur in unserer Galaxie entsteht, nimmt man an, dass Kosmische Strahlung ein Phänomen ist, das nicht nur auf unsere Galaxie beschränkt ist. Als weitere Quellen von Kosmischer Strahlung werden in der Literatur auch noch Weiße Zwerge, das Zentrum von Galaxien angegeben. [Allk1975]

Abbildung 2-1 zeigt ein interstellares Spektrum Energiespektrum im Weltraum zusammen mit Ballonmessungen.

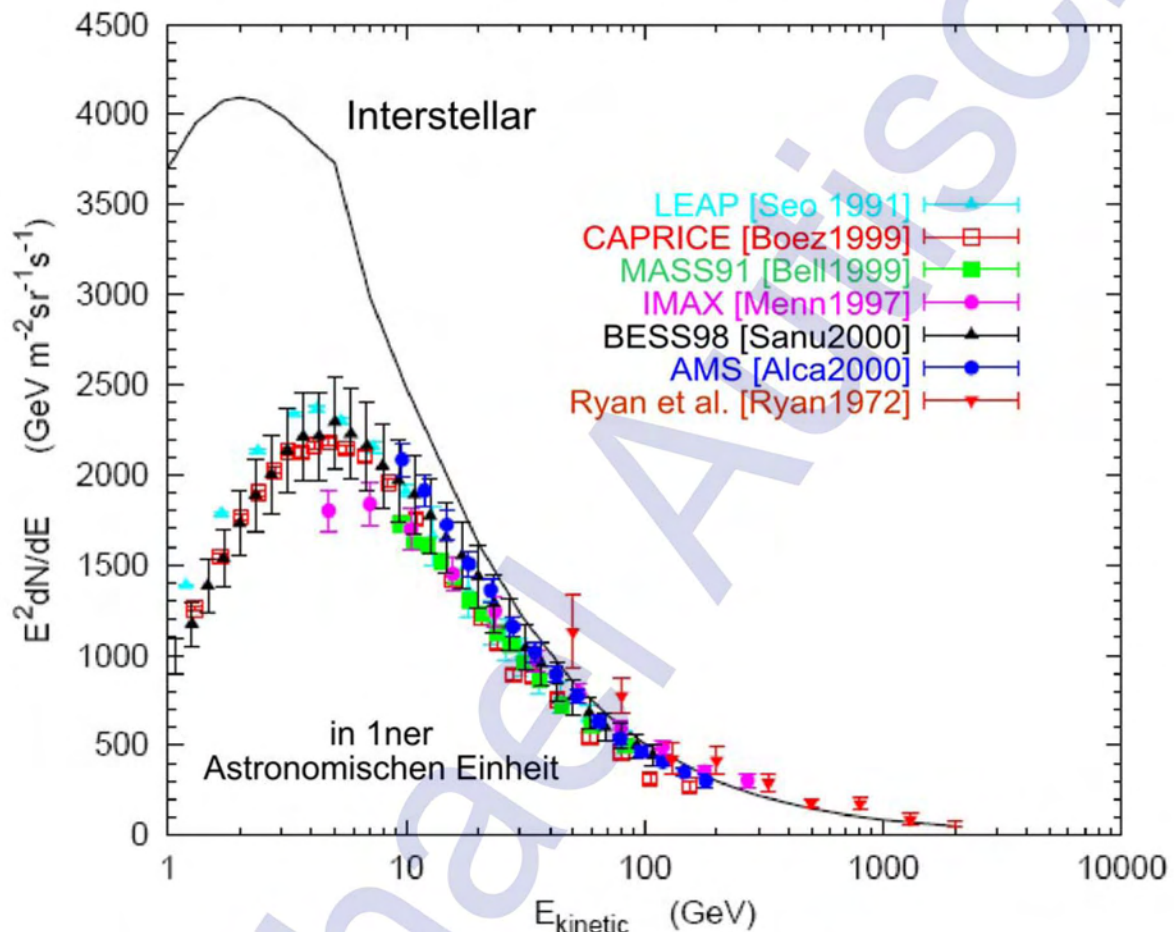


Abbildung 2-1: Zusammenfassung von gemessenen Protonenspektren im Weltraum und Ballonmessungen unterschiedlicher Experimente [Gais2000].

2.2 Zusammensetzung

Die kosmische Strahlung besteht zu 98% aus Baryonen und zu 2% aus Elektronen. Wobei sich die Baryonen aus 87% Protonen, 12% Heliumkerne und 1% schwerer Kerne zusammensetzt. Die Energieverteilung ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Wobei die Strahlung über 10^{12}eV zum größten Teil aus Protonen besteht. Dabei kommen ca. 1% von Elektronen und Positronen. Schwere Teilchen haben Energien bis ungefähr 10^8eV . [Allk1975] [Hein2002]

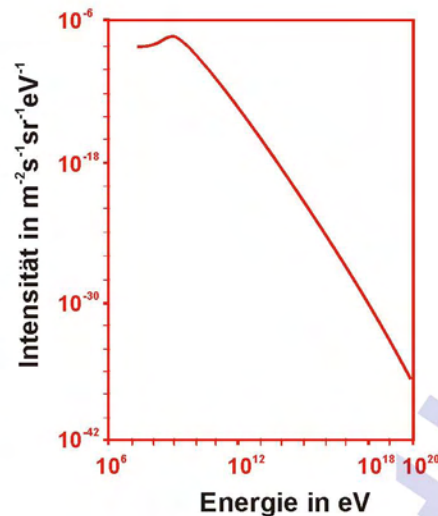


Abbildung 2-2: Differentielles Energiespektrum der kosmischen Strahlung [Allk1975].

2.3 Wechselwirkung mit der Atmosphäre

Die Teilchen der primären kosmischen Strahlung (Solare und Galaktische Komponente) stoßen in der Atmosphäre mit Stickstoff- und Sauerstoffatomen zusammen. Dabei entstehen hauptsächlich Neutronen, Protonen, sowie geladene und neutrale Pionen. Diese Sekundärteilchen verursachen weitere Kernreaktionen. Dadurch entstehen „Teilchenschauer“ von Sekundärteilchen. [Allk1975]

2.3.1 Effekte in der Atmosphäre und Cascade Showers

Die Primärstrahlung löst beim Auftreffen auf die Atmosphäre besonders in Stickstoff- und Sauerstoffkernen weitere Reaktionen aus. Es entstehen bei diesen Reaktionen hauptsächlich Elektronen, Neutronen, Mesonen, Myonen und sekundäre Protonen [Allk1984]. Diese energiereichen Partikel können wiederum ihrerseits neue nukleare Reaktionen auslösen. Speziell in den in dieser Arbeit betrachteten Reiseflughöhen ergibt sich die Strahlenbelastung zum größten Teil durch die in den Kaskaden entstandene Sekundärstrahlung.

Die Strahlenbelastung nimmt vorerst mit der Eindringtiefe zu, erreicht in einer Höhe von ca. 20km einen Maximalwert (Pfozter Maximum) und nimmt dann aufgrund der Absorption stark ab. Der Verlauf der Zählrate eines Zählrohres in Abhängigkeit der Höhe ist in Abbildung 2-3 dargestellt [Allk1975].



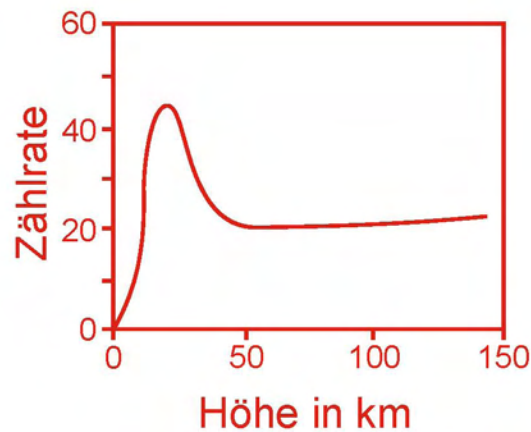


Abbildung 2-3: Änderung der Zählrate in Abhängigkeit der Höhe. Das Maximum der Kurve bei zirka 20km Höhe wird Pfotzer Maximum genannt. [Allk1975].

Die wichtigsten Teilchen bei der Wechselwirkung in der Atmosphäre sind die sekundären Protonen, die Neutronen und die Pionen. Neutronen mit weniger Energie als 10MeV entstehen durch spontanen Zerfall von hochangeregten Atomkernen, Neutronen von höheren Energien entstehen bei der Reaktion von hochenergetischen Teilchen mit dem Atomkern. Dabei erhält das ausgesendete Neutron annähernd die Richtung des auslösenden Teilchens. Geladene Pionen haben eine sehr kurze durchschnittliche Lebensdauer und zerfallen dann weiter in Myonen und Neutrinos oder in Elektronen und Neutrinos. Neutrale Pionen zerfallen weiter in Gammaquanten oder bei höheren Energien in Elektronen-Positronen-Paare. Abbildung 2-4 zeigt beispielhaft eine mögliche Kaskade.

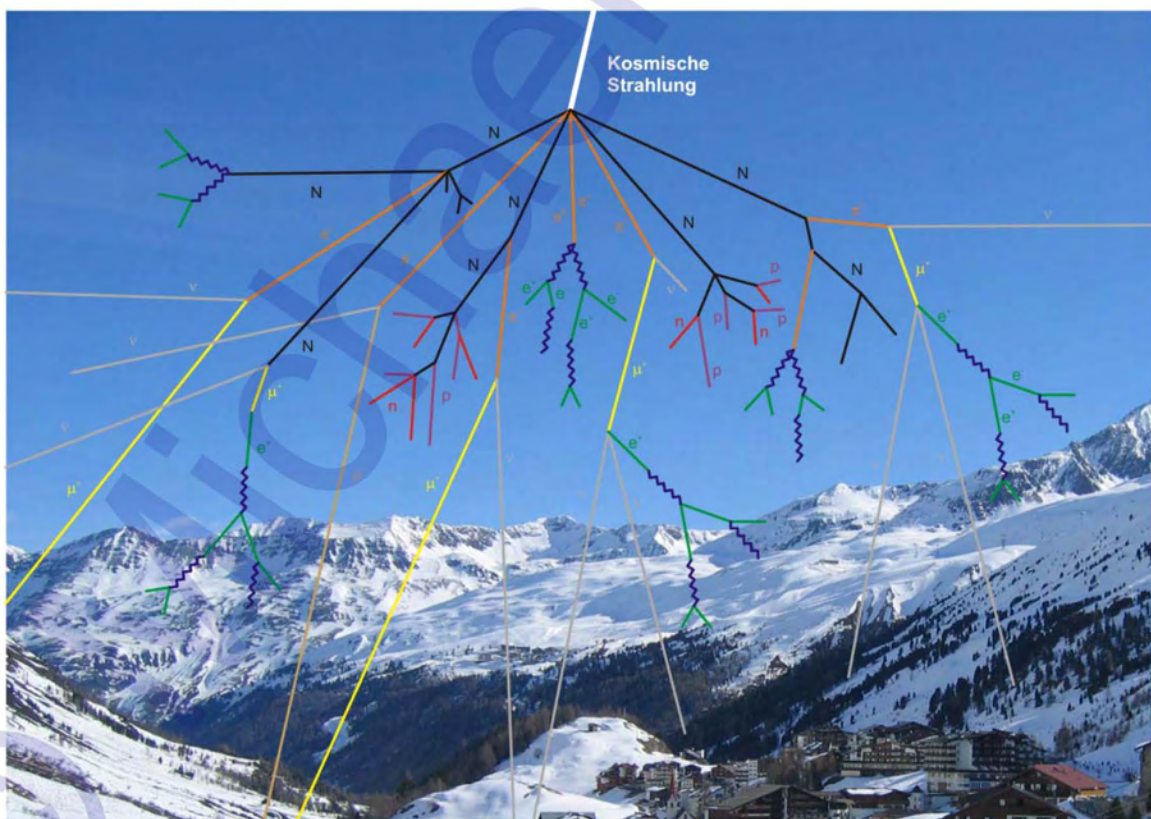


Abbildung 2-4: Beispiel eines Kaskadenschauers in der Erdatmosphäre. Der Hintergrund zeigt das innere Ötztal um den Ort Obergurgl.

2.4 Variation der Kosmischen Strahlung

2.4.1 Einfluss der Sonnenaktivität

Die Aktivität der Sonne schwankt in einem Rhythmus von zirka elf Jahren. In dieser Zeit wechseln auf der Sonne auch der magnetische Nord- und Südpol die Plätze [Alkhofer1975]. Während der Aktivitäts-Maxima steigen die Emissionen von Protonen auf der Sonne und die Zahl der Sonnenflecken erheblich an. Der Verlauf der Sonnenaktivität ist in Abbildung 2-5 dargestellt. [More1988] [Usus2005]

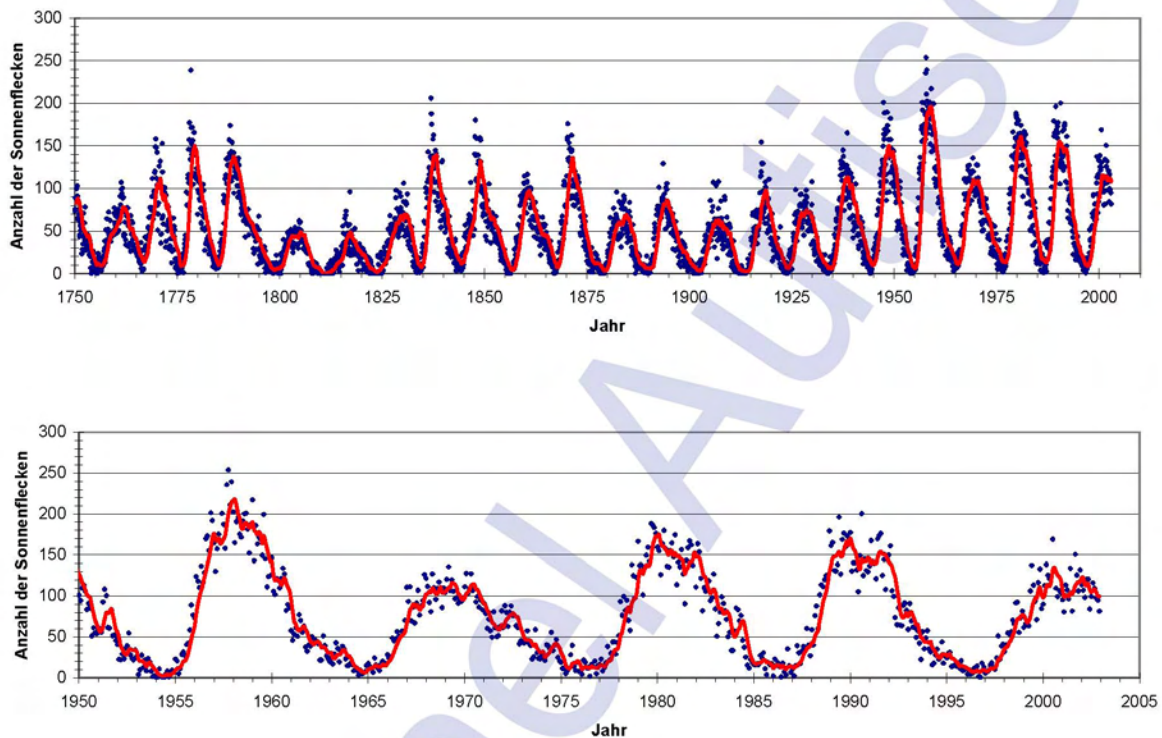


Abbildung 2-5: Zeitliche Variation der Sonnenflecken [More1988] [Usus2005].

2.4.2 Solar Deceleration Potential

Das Modell des kosmischen Strahlungsspektrums kann mit einem lokalen interstellaren Spektrum (LIS Local Interstellar Spektrum) beschrieben werden. Dieses Spektrum gibt den Teilchenfluss in unserem Sonnensystem wieder, jedoch ohne Einfluss der Sonne. Der Einfluss der Sonne bewirkt eine Abschirmung und Abbremsung dieser kosmischen Teilchen. Dieser Effekt kann durch ein negatives elektrisches Potential beschrieben werden [Lind2004]. Eben dieses Potential wird mit dem Solar Deceleration Potential Φ bezeichnet [Badh1997].

Für ein Modell des kosmischen Strahlungsspektrums benötigt man also das LIS und das SDP. Das LIS ist bekannt und in Abbildung 2-1 dargestellt. Zur Berechnung des SDP wurde ein Modell entwickelt, mit dem man aus den Zählraten von Zählrohren installiert in Satelliten (IMP-8) und von Neutronenmonitoren auf der Erdoberfläche (CLIMAX) dieses Potenzial berechnen kann [Badh1997]. Die Untersuchungen hierbei haben gezeigt, dass der Fluss der kosmischen Teilchen von der Richtung des

Sonnenmagnetfeldes abhängt, welches sich bei jedem Sonnenzyklus umdreht. Genauere Untersuchungen [Badh1993] haben ergeben, dass die CLIMAX Neutronenmonitorzählrate gemittelt über 28 Tage eine starke Korrelation mit dem SDP zeigt, wenn die CLIMAX der Daten 95 Tage vor diesem Zeitpunkt zum Vergleich hergenommen werden [Roes2002]. Dadurch kann gezeigt werden, dass dieser Neutronenmonitor auf Teilchen mit einer Cutoff Rigidity von über 3GV anspricht und diese auch mehr als 3 Monate im Voraus vorherberechnet werden können.

Bei dem Modell ist zu beachten, dass dieses keine kurzzeitigen Fluktuationen der Sonnenaktivität wiedergeben kann.

Um die Aussagekraft des Modells und der Modulation zu untersuchen wurden Vergleiche mit Messungen von Spektren durchgeführt. Diese Vergleiche ergaben Unsicherheiten im Bereich von 20 bis 30 Prozent. [Roes2002]

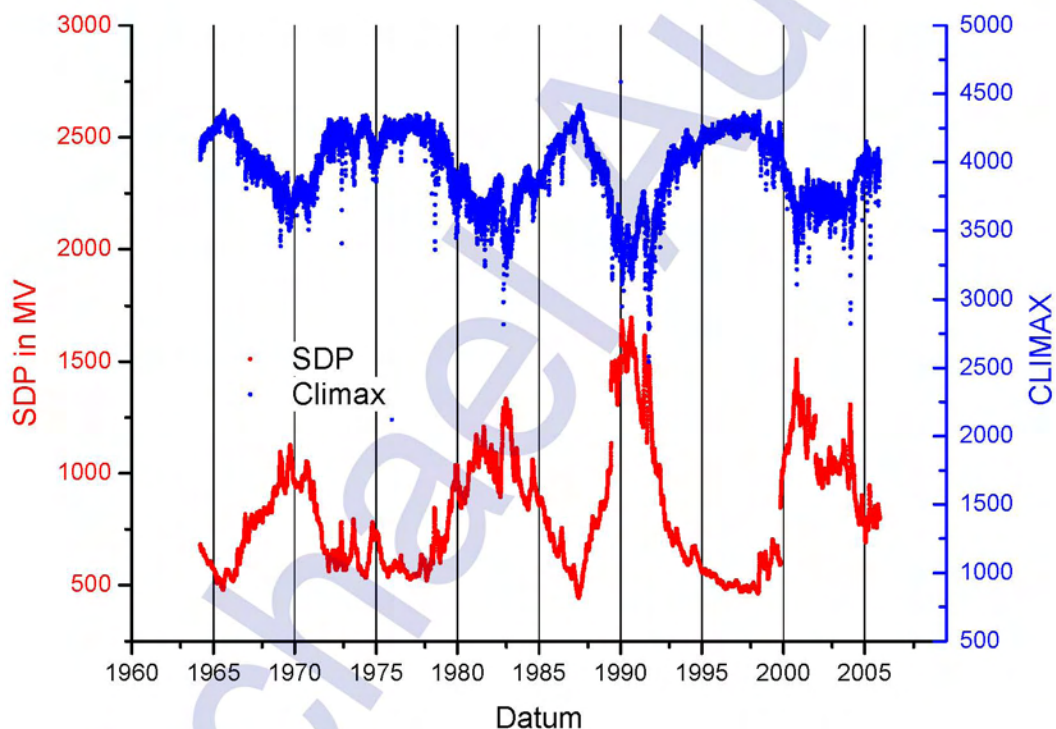


Abbildung 2-6: Verlauf der CLIMAX Daten sowie SDP von 1964 bis 2005 [nach Roes2002].

2.4.3 Ablenkung im Erdmagnetfeld

Geladene Teilchen werden in Magnetfeldern auf Helixbahnen mit konstanter Steigung abgelenkt. Der Radius dieser Kreisbahnen ist der so genannte Gyroradius ρ . Dieser Radius kann mittels Gleichung 2-1 berechnet werden. Wobei p der Impuls und Ze die Ladung des Teilchens im Magnetfeld B ist [Chen1984]. Die Einheit des Gyroradius ist das Meter m.

$$\rho = \frac{p \cdot c}{Z \cdot e \cdot B}$$

Gleichung 2-1: Definition des Gyroradius [Chen1984].

Aus der Gleichung für den Gyroradius wird nun die so genannte magnetische Steifigkeit R definiert. Sie ist ein Maß für die Fähigkeit des Teilchens, in Magnetfeldern nicht die Richtung zu verlieren. Als Einheit wird für die magnetische Steifigkeit das Gigavolt GV verwendet.

$$R = \frac{p \cdot c}{Z \cdot e}$$

Gleichung 2-2: Magnetische Steifigkeit eines Teilchens [Cook1991].

Betrachtet man die Teilchen der kosmischen Strahlung im Erdmagnetfeld, so kann man eine minimale Steifigkeit für Teilchen angeben.

Die allgemeine Gleichung, mit der man diese minimale Steifigkeit eines Teilchens berechnen kann, das einen Punkt bei einem Radius r auf einem magnetischen Breitengrad λ aus einer durch (θ, ϕ) gegebenen Richtung erreichen soll, ist in Gleichung 2-3 angegeben. Wobei r_E der Erdradius ist und $R_S^* = 59,6$ GV entspricht. Die minimale Steifigkeit wird in der Literatur als „vertical cosmic ray cutoff rigidity“ und in diesem Dokument im Weiteren verkürzt als Cutoff Rigidity bezeichnet [Bhat1997]. Als Einheit wird für die vertical cosmic ray cutoff rigidity das Gigavolt GV verwendet.

$$R_S(r, \lambda, \theta, \phi) = R_S^* \frac{r_E^2}{r^2} \frac{\cos^4(\lambda)}{\left(1 + \sqrt{1 - \cos^3(\lambda) \sin(\theta) \sin(\phi)}\right)^2}$$

Gleichung 2-3: Vertical cosmic ray cutoff rigidity eines Teilchens [Stan2004].

In Gleichung 2-3 wurde die Annahme getroffen, dass das Erdmagnetfeld ein ideales Dipolfeld ist. Diese Näherung entspricht aber nicht exakt der Realität, bei der es auch noch Inhomogenitäten und Unregelmäßigkeiten des Erdmagnetfeldes gibt. Gemessene Werte der Cutoff Rigidity zeigen Werte von 0 GV in den Polregionen und bis zu 17,6 GV in den Äquatorregionen. Somit benötigen Teilchen am Äquator eine wesentlich höhere Energie um in die Atmosphäre eindringen zu können, als an den Polen [Lind2004]. Eine geografische Zuordnung der Cutoff Rigidity ist in Abbildung 2-7 dargestellt.



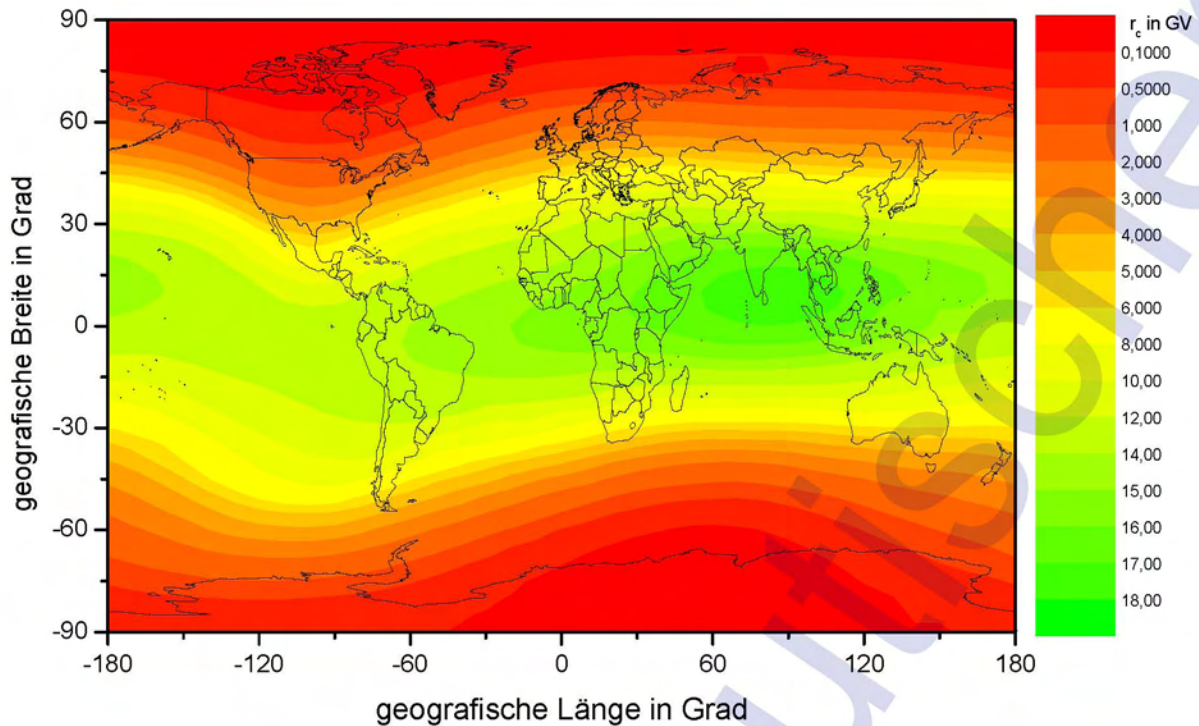


Abbildung 2-7: Weltweite geografische Verteilung der Cutoff Rigidity r_c [Auti2003].

Die Verwendung der Cutoff Rigidity als Parameter hat auch den großen Vorteil beim Vergleichen von Daten, da die Anzahl der Parameter der Positionsangabe von zwei (geografische Länge und Breite) auf nur einen Parameter (Cutoff Rigidity) reduziert werden können.

2.4.4 Änderung des Erdmagnetfeldes

Auch das Erdmagnetfeld selbst ändert sich mit der Zeit.

Langzeitstudien über die Änderung der Cutoff Rigidity zeigen für die unterschiedlichen Regionen der Erde starke Veränderungen mit der Zeit [Shea2003].

Tabelle 2-1: Veränderung der Cutoff Rigidity vom 16. bis 20. Jahrhundert [Shea2003].

geografische Breite in °	geografische Länge in °	Cutoff Rigidity in GV					Kontinent
		20. Jhdt	19. Jhdt	18. Jhdt	17. Jhdt	16. Jhdt	
55	30	2,3	2,8	2,3	1,5	1,3	Europa
50	0	3,4	2,9	2,0	1,3	1,8	Europa
50	15	3,5	3,8	2,9	1,7	1,8	Europa
40	15	7,2	7,6	5,9	4,0	4,0	Europa
45	-75	1,5	1,2	1,5	2,4	4,1	Nord Amerika
40	-105	2,6	3,2	4,1	4,9	5,9	Nord Amerika
20	-105	8,7	12,0	14,1	15,1	16,9	Nord Amerika
20	-60	10,0	7,4	9,2	12,3	15,4	Nord Amerika
50	105	4,3	4,7	5,1	5,8	8,6	Asien
40	120	9,3	9,5	10,2	11,3	13,9	Asien
35	135	11,8	11,7	12,4	13,1	14,4	Japan
-25	150	8,6	9,8	10,4	11,5	11,4	Australien
-35	15	4,4	5,9	8,4	11,3	12,2	Afrika
-35	-60	8,9	12,1	13,1	10,8	8,1	Süd Amerika

3 Größen

3.1 Energiedosis (Absorbed Dose)

Energiedosis D : pro Masseneinheit absorbierte Energie:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

Gleichung 3-1: Definition der Energiedosis [Euro1996].

Dabei ist $d\bar{\varepsilon}$ die mittlere Energie, die durch ionisierende Strahlung auf die Materie in einem Volumenelement übertragen wird und dm die Masse der Materie in diesem Volumenelement.

Die Einheit der Energiedosis ist Joule pro Kilogramm [J/kg]. Als Spezialname wurde dafür das Gray [Gy] eingeführt. [ICRP1996]

Die zeitliche Ableitung der Energiedosis ist die Energiedosisleistung \dot{D}

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Gleichung 3-2: Definition der Energiedosisleistung [ICRP1991].

3.2 Äquivalentdosis (Dose Equivalent)

Die Äquivalentdosis ist die Energiedosis multipliziert mit dem jeweiligen Qualitätsfaktor

$$H = Q \cdot D$$

Gleichung 3-3: Definition der Äquivalentdosis [ICRP1996].

3.3 Äquivalentdosis (Equivalent Dose)

Äquivalentdosis ist Energiedosis im Gewebe oder Organ T , gewichtet nach Art und Qualität der Strahlung R . Sie wird ausgedrückt durch

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

Gleichung 3-4: Definition der Äquivalentdosis [Öste2006].

Dabei ist $D_{T,R}$ die über ein Gewebe oder ein Organ T gemittelte Energiedosis durch die Strahlung R und w_R der Strahlungs-Wichtungsfaktor (siehe Tabelle 3-1). für die zugehörige Strahlung R . Besteht das Strahlungsfeld aus Arten und Energien mit unterschiedlichen Werten von w_R so gilt für die gesamte Äquivalentdosis H_T

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Gleichung 3-5: Definition der Äquivalentdosis in einem gemischten Strahlenfeld [Öste2006].

Die entsprechenden Werte für w_R sind in Tabelle 3-1 angegeben. Die Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv) [Öste2006]

Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R

Die Werte des Strahlungs-Wichtungsfaktors w_R richten sich nach der Art und Qualität des externen Strahlungsfeldes oder nach der Art und Qualität der von einem intern abgelagerten Radionuklid emittierten Strahlung. [Öste2006]

Setzt sich das Strahlungsfeld aus Arten und Energien mit unterschiedlichen Werten von w_R zusammen, so ist die Energiedosis in Gruppen, jeweils mit eigenem Wert für w_R , zu unterteilen und zur gesamten Äquivalentdosis zu addieren. Alternativ kann eine stetige Energieverteilung angenommen werden, wobei jedes Element der Energiedosis zwischen E und $E+dE$ mit dem w_R -Wert aus der entsprechenden Zeile in nachstehender Tabelle multipliziert wird. [Öste2006]

Tabelle 3-1: Strahlungs-Wichtungsfaktoren [Öste2006].

Typ und Energie		Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R
Photonen, alle Energien		1
Elektronen und Myonen, alle Energien		1
Neutronen	kleiner 10keV	5
	10keV – 100keV	10
	100keV – 2MeV	20
	2MeV – 20MeV	10
	größer 20MeV	5
Protonen, außer Energie >2 MeV	Rückstoßprotonen	5
Alphateilchen, schwere Kerne	Spaltfragmente und	20

3.4 Umgebungsäquivalentdosis (Ambient Dose Equivalent)

Die Umgebungsäquivalentdosis $H^*(d)$ an einem Punkt in einem Strahlungsfeld ist die Äquivalentdosis erzeugt durch ein entsprechendes, ausgerichtetes und aufgeweitetes Feld in der ICRU-Kugel in einer Tiefe d am Radius gegenüberliegend der Richtung des ausgerichteten Feldes. [Duft2001]

Als Einheit der Umgebungsäquivalentdosis ist Joule pro Kilogramm [J/kg]. Als Spezialname wurde dafür das Sievert [Sv] eingeführt. [ICRP1996]

3.5 Effektive Dosis (Effective Dose)

Die Effektive Dosis ist die Summe der gewichteten Äquivalentdosen in allen in Tabelle 3-2 angegebenen Geweben und Organen des Körpers aus interner und externer Strahlenexposition. Sie wird definiert durch die Gleichung [Öste2006]

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

Gleichung 3-6: Definition der effektiven Dosis [Euro1996].

Dabei ist $D_{T,R}$ die über ein Gewebe oder ein Organ T gemittelte Energiedosis aus der Strahlung R , w_R der Strahlungs-Wichtungsfaktor und w_T der Gewebe-Wichtungsfaktor für das Gewebe oder Organ T . Die entsprechenden Werte für w_R sind in Tabelle 3-1 und für w_T in Tabelle 3-2 angegeben. Die Einheit der effektiven Dosis ist das Sievert (Sv) [Öste2006].

Wobei H_T die Äquivalentdosis im Gewebe und w_T der Gewebe-Wichtungsfaktor für das entsprechende Gewebe oder Organ T ist. Diese Gewebe-Wichtungsfaktoren sind in Tabelle 3-2 notiert.

Die Effektive Dosis kann auch ausgedrückt werden als die Summe doppelt gewichtete Energiedosis in allen Geweben und Organen eines Körpers.

Tabelle 3-2: Gewebe-Wichtungsfaktoren [Öste2006].

Gewebe / Organ	Gewebe-Wichtungsfaktor w_T
Keimdrüsen	0,20
Rotes Knochenmark	0,12
Dickdarm	0,12
Lunge	0,12
Magen	0,12
Blase	0,05
Brust	0,05
Leber	0,05
Speiseröhre	0,05
Schilddrüse	0,05
Haut	0,01
Knochenoberfläche	0,01
... Rest	0,05
$\sum w_T = 1$	

3.6 Lineare Energieübertragung (LET Linear Energy Transfer)

Dabei ist dE die von einem Teilchen der Energie E beim Zurücklegen einer Entfernung dl in Wasser abgegebene mittlere Energie [Öste2006]

$$L = \frac{dE}{dl}$$

Gleichung 3-7: Definition der linearen Energieübertragung [Öste2006].

Die lineare Energieübertragung wird in zwei Teilen unterschieden. Einerseits gibt es den LowLET Bereich, der sich bis zu einem LET von $10\text{keV}/\mu\text{m}$ erstreckt. Der Bereich darüber wird HighLET genannt.

3.7 Qualitätsfaktor

Der Qualitätsfaktor ist eine Funktion Q von der linearen Energieübertragung L in Wasser. Die Werte dieser Funktion $Q(L)$ sind folgendermaßen gegeben:

Tabelle 3-3: Qualitätsfaktor $Q(L)$ in Abhängigkeit der linearen Energieübertragung L [Öste2006].

Qualitätsfaktor $Q(L)$	Gültigkeitsbereich für L in $\text{keV}/\mu\text{m}$
$Q(L) = 1$	$L < 10$
$Q(L) = 0,32 \cdot L - 2,2$	$10 \leq L \leq 100$
$Q(L) = \frac{300}{\sqrt{L}}$	$L > 100$

Grafisch ist die Funktion des Qualitätsfaktors in Abbildung 3-1 dargestellt.

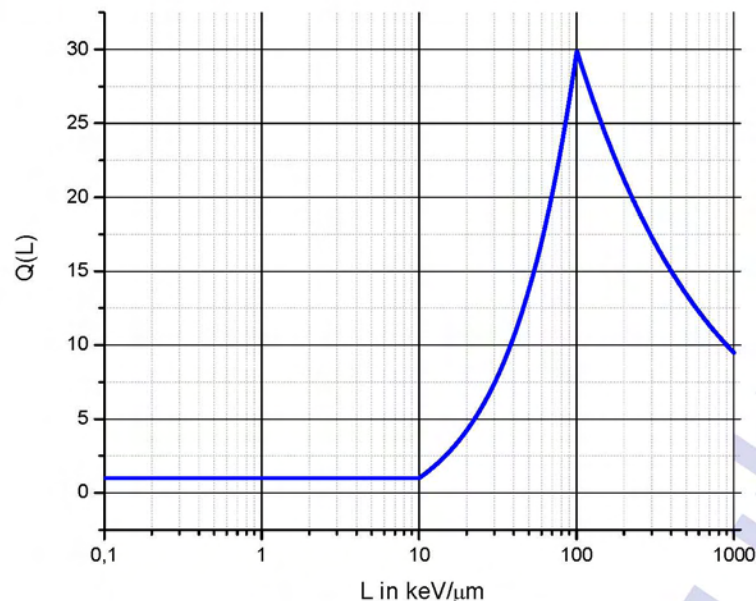


Abbildung 3-1: Qualitätsfaktor $Q(L)$ in Abhängigkeit der linearen Energieübertragung L [Öste2006].

3.8 Lineale Energie

Die Lineale Energie ist als Quotient von ε und \bar{l} definiert.

$$y = \frac{\varepsilon}{\bar{l}},$$

Gleichung 3-8: Definition von Lineal Energie [ICRP1991].

Wobei ε die auf die Materie im interessierenden Volumen durch ein Energiedepositions-Ereignis übertragene Energie ist und \bar{l} die mittlere Sehnenlänge in diesem Volumen ist. Da die mittlere Lineale Energie diskrete Energiedepositionen repräsentiert, ist sie als physikalische Größe für die Angabe der Strahlenqualität im Prinzip aussagefähiger als das lineare Energieübertragungsvermögen. Obgleich die Lineale Energie direkt messbar ist, wurde L für die meisten im praktischen Strahlenschutz existierenden Berechnungen verwendet. Daher wird $Q(L)$ hier als Funktion von L angegeben, wenngleich von der Europäischen Kommission anerkannt wird, dass auch die Anwendung der Linealen Energie möglich ist. [ICRP1991]

3.9 Fluenz

Die Fluenz Φ ist der Quotient von dN und da . Wobei dN die Anzahl der Teilchen ist, die auf eine Kugelquerschnittsfläche da treffen.

$$\Phi = \frac{dN}{da},$$

Gleichung 3-9: Definition von Fluenz [ICRP1996].

3.10 Mean Chord Length

Die Mean Chord Length MCL gibt die mittlere Weglänge innerhalb eines Volumens wieder. Bei Messinstrumenten entspricht dies der Detektorregion. Für geometrisch einfache Körper wie Kugel und Zylinder kann die MCL nach den Gleichung 3-10 und Gleichung 3-11 berechnet werden [Brad2000].

$$MCL = \frac{2d}{3}$$

$d...$ Kugeldurchmesser

Gleichung 3-10: MCL einer Kugel [Brad2000].

$$MCL = \frac{2rh}{r+h}$$

$r...$ Radius des Zylinders
 $h...$ Höhe des Zylinders

Gleichung 3-11: MCL eines Zylinders [Brad2000].

Für eckige Körper ergibt sich die MCL , für einen Würfel nach Gleichung 3-12. Bei der Berechnung der MCL für einen Quader muss man nach Gleichung 3-13 vorgehen [Brad2000].

$$MCL = \frac{2a}{3}$$

$a...$ Kantenlänge des Würfels

Gleichung 3-12: MCL eines Würfels [Brad2000].

$$MCL = \frac{2abc}{ab+ac+bc}$$

$a,b,c...$ Kantenlängen des Quaders

Gleichung 3-13: MCL eines Quaders [Brad2000].

Allgemeiner gilt für alle konvexen Körper, dass sich die MCL als Quotient von dem 4 fachen Volumen und der Oberfläche ergibt [Brad2000].

$$MCL = \frac{4V}{O}$$

$V...$ Volumen des Körpers
 $O...$ Oberfläche des Körpers

Gleichung 3-14: MCL für einen allgemeinen konvexen Körper [Brad2000].

Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei dünnen Scheiben die Verwendung der MCL nur als Näherung angesehen werden darf, da dabei die Verteilung der wahren Chord Length sehr breit gestreut ist. Nämlich von der dünnsten Stelle der Scheibe (zB einige μm) bis hin zum längsten geraden Weg durch die Scheibe (zB einige cm).

3.11 Mikrodosimetrisches Spektrum

Bei Spektren der Linealen Energie ergeben sich Werte die sich über mehrere Größenordnungen strecken (siehe Abbildung 3-2). Für die grafische Darstellung wählt man daher eine Darstellung, in der die Daten in logarithmischen Intervallen zusammengefasst werden. [ICRU1983] (siehe Abbildung 3-3).

Dabei wird jede Dekade in eine bestimmte Anzahl von logarithmischen Intervallen unterteilt. Die logarithmischen Intervallbreiten berechnen sich nach Gleichung 3-15.

$$y = y_0 \cdot 10^{\frac{n}{B}}$$

$y \dots$ Ende des n -ten Intervalls
 $y_0 \dots$ Beginn des kleinsten Intervalls
 $B \dots$ Anzahl der Intervalle pro Dekade

Gleichung 3-15: Logarithmische Intervallbreite [ICRU1983].

Die Anzahl der Ereignisse in den logarithmischen Intervallen werden mit dem geometrischen Mittel des jeweiligen Intervalls multipliziert. Auf diese Weise erhält man die Verteilung der absorbierten Energie im gewebeäquivalenten Gas (siehe Abbildung 3-4). Üblicherweise erfolgt die Darstellung in normierter Form unter Verwendung von Gleichung 3-16. Es ist zu beachten, dass die Normierungssumme von der Anzahl der gewählten Intervalle abhängt. [ICRU1983]

$$\frac{\ln(10)}{B} \sum_{i=0}^{\infty} y_i \cdot d(y_i) = 1$$

$B \dots$ Anzahl der logarithmischen Intervalle pro Dekade
 $y_i \dots$ geometrisches Mittel des i -ten Intervalls
 $d(y_i) \dots$ Counts im i -ten Intervall

Gleichung 3-16: Normierungsfunktion für mikrodosimetrische Spektren [ICRU1983].

Ein solches normiertes Spektrum wird auch mikrodosimetrisches Spektrum genannt und ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Faltet man nun dieses mikrodosimetrische Spektrum mit dem Qualitätsfaktor $Q(L)$, so erhält man die Verteilung der Äquivalentdosis. Ein solches gefaltetes Spektrum ist in Abbildung 3-6 dargestellt. [Wake1995]

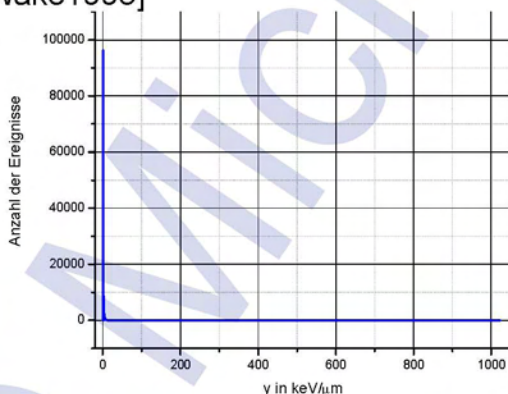


Abbildung 3-2: Anzahl der Ereignisse in Abhängigkeit der Linealen Energie einer Flugmessung.

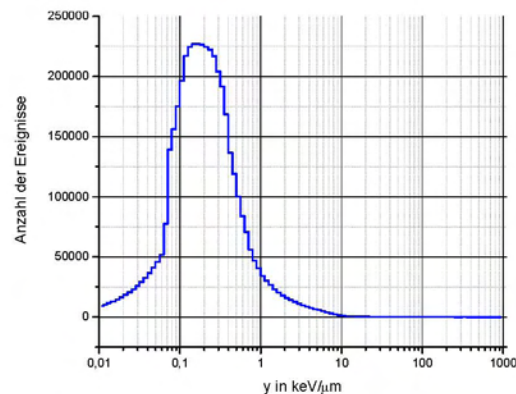


Abbildung 3-3: Anzahl der Ereignisse in logarithmischen Intervallen in Abhängigkeit der Linealen Energie einer Flugmessung nach Gleichung 3-15.

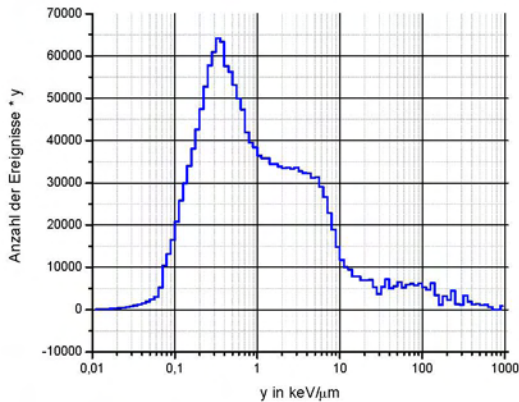


Abbildung 3-4: Anzahl der Ereignisse in logarithmischen Intervallen multipliziert mit der mittleren Linealen Energie in Abhängigkeit der Linealen Energie bei einer Flugmessung.

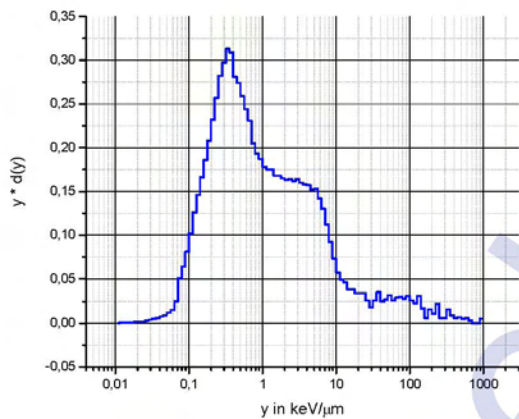


Abbildung 3-5: Normiertes mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ einer Flugmessung.

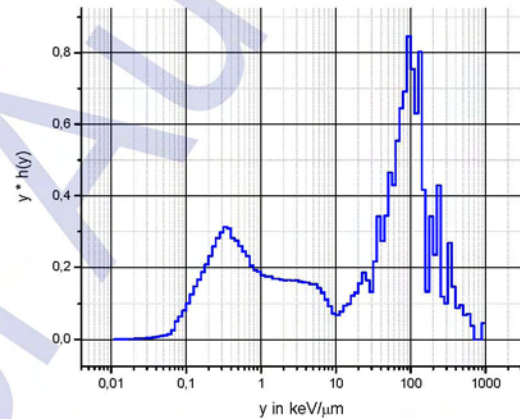


Abbildung 3-6: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot h(y)$ ergibt sich aus der Faltung des mikrodosimetrischen Spektrum $y \cdot d(y)$ mit dem Qualitätsfaktor $Q(L)$.

Da sich die oben verwendete Histogrammdarstellung nicht eignet um mehrere mikrodosimetrischen Spektren in einer Abbildung darzustellen, wird durch die einzelnen Histogrammmittelpunkte eine Linie gelegt. Diese Linie wird im Weiteren geglättet, indem jeweils fünf dieser Datenpunkte zusammengefasst werden. Der Vergleich des geglätteten Spektrums mit dem ursprünglichen ist in Abbildung 3-7 für ein mikrodosimetrische Spektrum dargestellt.



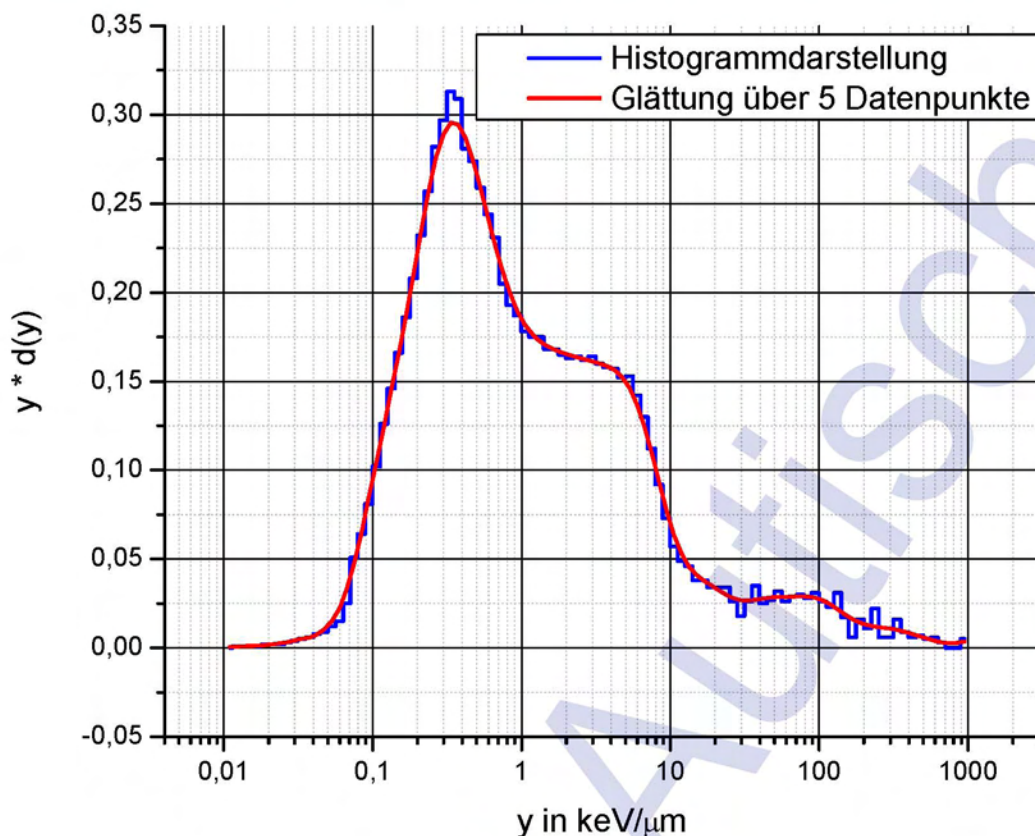


Abbildung 3-7: Normiertes mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ einer Flugmessung: Vergleich der Histogrammdarstellung und der über 5 Datenpunkte geglätteten Linie.

In Abbildung 3-7 gibt die geglättete Linie den Verlauf des histogrammatischen Spektrums sehr gut wieder. Auch werden statistische Schwankungen die durch eine geringe Anzahl an Ereignissen, vorrangig im höherenergetischen Teil über $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$, damit ausgeglichen. Aus diesem statistischen Grund und auch aus Gründen der Darstellbarkeit mehrerer Spektren in einer Abbildung wird für alle weiteren mikrodosimetrischen Spektren in dieser Arbeit diese Darstellungsform gewählt, sofern dies in der jeweiligen Abbildungsbeschriftung nicht explizit anders definiert ist.

3.12 Flugfläche

Flugflächen sind Flächen konstanten Luftdruckes, die auf den Druckwert 1013,2 Hektopascal (hPa) bezogen und durch bestimmte Druckabstände voneinander getrennt sind. (Anm.: Die Flugflächen werden in der Luftfahrt zur vertikalen Staffelung des Flugverkehrs verwendet. Sie werden in Hektokuß angegeben, z.B. FL330 entspricht bei Standardluftdruck von 1013,25 hPa einer Flughöhe von 33.000 ft oder $\sim 10.060 \text{ m}$.) [Öste2006]

4 Verwendete Messgeräte

4.1 Tissue Equivalent Proportional Counter

4.1.1 Allgemein

Der Tissue Equivalent Proportional Counter (TEPC) wird von einigen Instituten zum Messen der kosmischen Strahlung in Luftfahrzeugen verwendet [Lind2004], [Tayl2002], [Schr2000], [Beck2000].

Der TEPC ist ein gewebeäquivalenter Proportionalzähler. Er misst den Energieverlust von Teilchen in einer mit gewebeäquivalentem Gas gefüllten gewebeäquivalenten Messkammer (z.B. A150 Plastik). Man geht dabei von der Annahme aus, dass die räumliche Verteilung der Energiedeposition in dem gasgefüllten Hohlraum sich nicht unterscheidet von jener im Wandmaterial, wenn sich ihre geometrischen Dimensionen indirekt zur Dichte verhalten [Plan1901].

Ist dies nicht gewährleistet so kommt es zum Auftreten so genannter Wandeffekte. Wandeffekte können durch die Verwendung von wandlosen Detektoren prinzipiell vermieden werden [Ross1994]. Wandlose Detektorstrukturen werden dadurch realisiert, indem man innerhalb eines Volumens, welches selbstverständlich von einer Wand begrenzt wird, ein definiertes Volumen als eigentliches Detektorvolumen heranzieht. Hierbei ist es wichtig, dass dieses Volumen eine genau definierte Form und Größe besitzt. Die beiden populärsten Möglichkeiten um dies zu bewerkstelligen ist einerseits die Verwendung von Elektroden oder von dünnen Materialgittern. Bei der Verwendung von Elektroden wird mittels statischer elektrischer Felder das Detektorvolumen definiert. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der Detektor nun wirklich ohne Wand ausgeführt wird. Die Verwendung von Elektroden erweist sich jedoch als schwierig, da das Volumen nur ungenau definiert werden kann und leicht von äußeren Einflüssen gestört wird. Viel häufiger werden Materialgitter zur Definition des Volumens verwendet. Diese sind so konstruiert, dass sie für die einfallende Strahlung möglichst transparent sind.

Eine weitere, konstruktiv um einiges einfachere Möglichkeit besteht darin, den Detektor nicht wandlos auszuführen, sondern für Wand und Detektor die gleichen Materialien zu verwenden. Diese Variante wurde bei den in dieser Arbeit beschriebenen Detektoren versucht zu verwirklichen [FarW2000].

Ein weiterer Aspekt dieser Konstruktion ist, dass ein solches Design der Definition der Linearen Energieübertragung (LET) in der Mikrodosimetrie nahe kommt. Die Wand mit der sehr viel größeren Dichte spielt dabei die Rolle des ausgedehnten Mediums und das unter sehr geringem Druck stehende Gas die Rolle des sehr kleinen Volumens innerhalb eben dieses Mediums.

Bei den Formen der Detektoren gibt es zwei weit verbreitete Arten. Einerseits gibt es TEPCs mit kugelförmigen Messkammern, andererseits finden auch Zylinderdetektoren Verwendung in den Messgeräten.



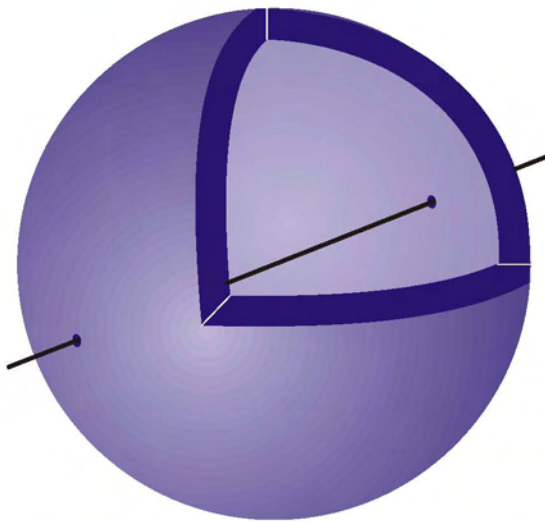


Abbildung 4-1: Aufbau eines kugelförmigen TEPC.

4.1.2 HAWK-TEPC

Das Messgerät mit der Modellbezeichnung „Hawk“ des Herstellers Far West Technology Inc. ist ein integrierter TEPC. Dabei sind der Detektor und auch die Auswerte- und Speichereinheit in einem Gerät integriert.

Der Detektor des hier verwendeten Messgeräts besteht aus einer Hohlkugel aus A150 Plastik mit einem Durchmesser von 12,55 cm. Diese Kugel ist mit Propan unter einem sehr geringen Druck von 8 Torr gefüllt [FarW2000]. Durch die Messkammer ist ein dünner Messdraht gespannt. Dieser wird mit Hilfe von Isolatoren gasdicht durch die Wände der Messkammer geführt. Der Aufbau ist schematisch in der Abbildung 4-4 abgebildet. Das elektrische Beschleunigungsfeld entsteht somit zwischen der Detektorkugel und dem Messdraht. Die Detektorkugel ist als Schutz mit einem Zylinder aus Edelstahl (Wandstärke 1,3 mm) umgeben. Der Zylinder ist auf der Außenseite mit einer Edelstahlplatte mit einer Stärke von 6,35 mm abgeschlossen. An diese Detektorhülle ist ein weiterer Zylinder aus Aluminium angeflanscht, welcher ebenfalls von einer 6,35 mm starken Aluminiumplatte begrenzt wird. Innerhalb dieses Zylinders befindet sich die Auswerteeinheit. Diese analysiert mittels zweier MCA (Multi-Channel Analyser) die Impulshöhen der einzelnen gezählten Events. Dabei steht ein MCA mit 256 Energiekanälen für den Bereich von 0 keV/μm bis 25,5 keV/μm zur Verfügung. Im Bereich von 0 keV/μm bis 0,5 keV/μm werden die Messwerte aufgrund von starkem elektronischen Rauschen vom Hersteller unterdrückt [FarW2000]. In diesem Bereich wird ein simuliertes Spektrum einer ^{60}Co Quelle als Näherung verwendet [FarW2000]. Eine schematische Darstellung dieser Erweiterung des Spektrums ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

Ein Bild des HAWK-TEPCs ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Die Abbildung zeigt lediglich das Messgerät selbst ohne den schützenden Aluminiumkoffer. Das Innenleben des Detektors mit der Auswerteeinheit ist schematisch in Abbildung 4-4 abgebildet.

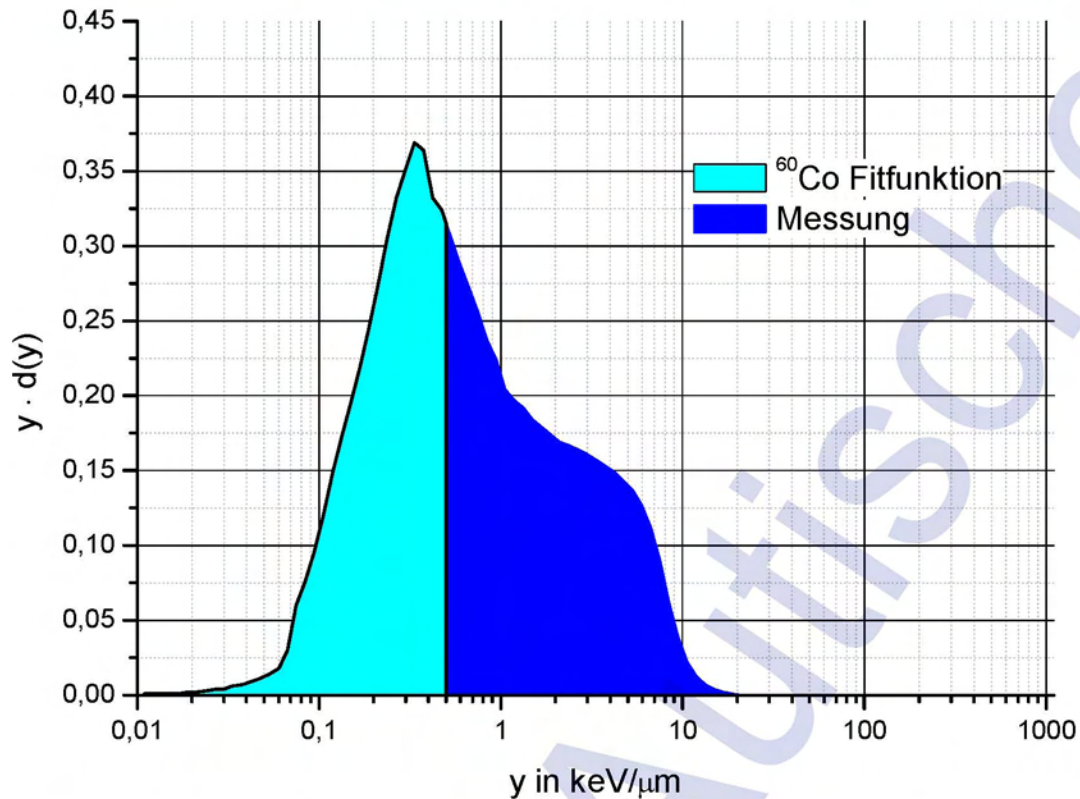


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Spektrumserweiterung durch ein simuliertes ^{60}Co Spektrum unterhalb von $0,5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ bei einer Messung einer ^{60}Co Quelle.

Der zweite MCA besitzt 1024 Kanäle und analysiert die Events von $0 \text{ keV}/\mu\text{m}$ bis $1024 \text{ keV}/\mu\text{m}$. Die Ereignisse werden dabei über eine Minute summiert und danach auf einer Compact Flash Speicherkarte gespeichert. Nach der Messung kann die Speicherkarte entnommen und mit einer speziellen Auswertesoftware analysiert und visualisiert werden. Zum Kalibrieren ist im Messgerät eine Alphaquelle integriert, welche mit einem Shutter vom restlichen Detektorteil getrennt ist. Dieser Shutter kann mit einem Magneten von außen geöffnet werden. Erkennt das Gerät den Alpha-Peak, erfolgt eine automatische Kalibrierung.



Abbildung 4-3: Bild des HAWK-TEPC ohne den dazugehörigen Koffer.

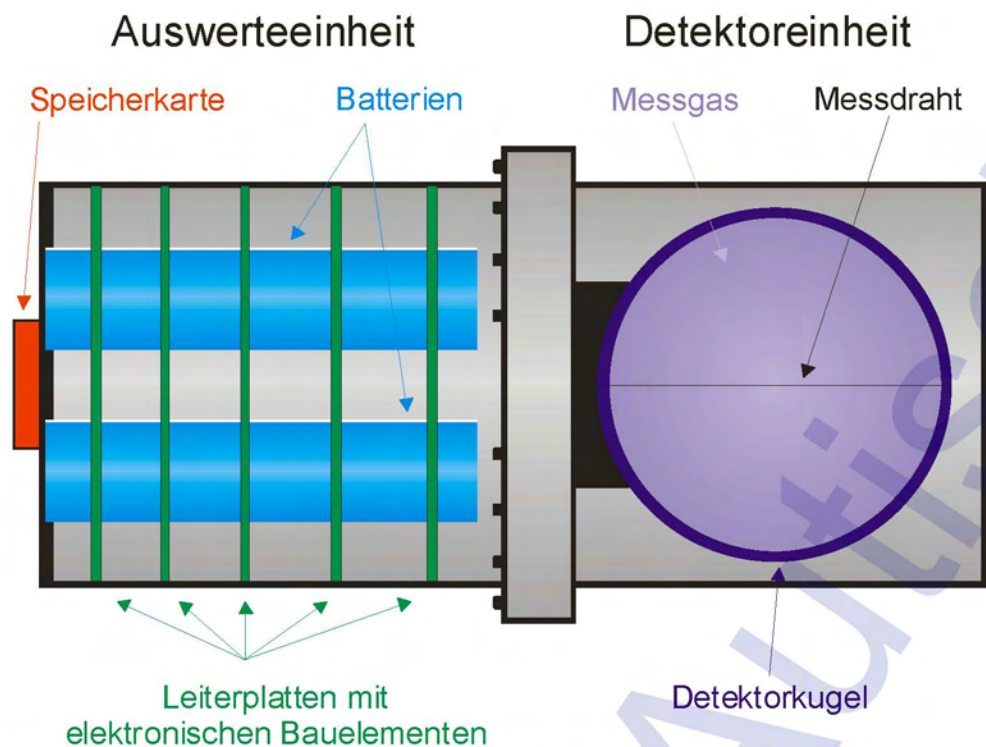


Abbildung 4-4: Schematischer Aufbau des HAWK-TEPC.

4.1.3 Mean Chord Length

Für die Berechnung der MCL des HAWK-TEPC Messvolumens wird die Gleichung 3-10 herangezogen. Weiters muss auch noch die geringe Dichte des Messgases auf die Dichte von Gewebe korrigiert werden. Diese Korrektur wird mittels Gleichung 4-1 durchgeführt [Beck2003].

$$d_t = p_g \cdot d_g \cdot \frac{\rho_0}{\rho_t} \cdot \frac{1}{p_0}$$

d_t ... korrigierte Länge (hier simulierter Gewebedurchmesser)

p_g ... Gasdruck im Detektor (hier 933,2 Pa)

d_g ... Detektordurchmesser (hier 12,55 cm)

ρ_0 ... Gasdichte bei Standarddruck (hier Propan $\sim 1,87e-3$ g/cm³)

ρ_t ... Materialdichte bei Standarddruck (hier Gewebe ~ 1 g/cm³)

p_0 ... Standardgasdruck (hier $1,01 \cdot 10^5$ Pa)

Gleichung 4-1: Längenkorrektur aufgrund Dichteunterschiede [Beck2003].

Die Mean Chord Length des HAWK-TEPC ergibt sich aus Gleichung 3-10 zu:

$$MCL_{HAWK-TEPC} = 1,44 \mu\text{m}$$

4.2 HAWK-SEPC

4.2.1 Aufbau / Materialien

Der Aufbau des HAWK-SEPC ist sehr ähnlich dem des HAWK-TEPC Gerätes. Der einzige Unterschied liegt im Detektormaterial und Detektoraufbau. Dieser ist bei dem HAWK-SEPC ein 1,6 mm dicker Zylinder aus reinem Silizium (99,9999%)

[FarW2000]. Der Zylinder hat einen Innendurchmesser von 87,8 mm und eine Innenlänge von 134,9 mm. Die beiden Abschlussplatten des Zylinders haben ebenfalls eine Dicke von 1,6 mm. Der Messdraht ist entlang der Längsachse des Zylinders gespannt und durch Bohrungen in den Seitenwänden nach außen geführt. Der Detektor ist als Schutz mit einem Zylinder aus Edelstahl (Wandstärke 1,3 mm) umgeben. Der Zylinder ist auf der Außenseite mit einer Edelstahlplatte mit einer Stärke von 6,35 mm abgeschlossen. An diese Detektorhülle ist ein weiterer Zylinder aus Aluminium angeflanscht, welcher ebenfalls von einer 6,35 mm starken Aluminiumplatte begrenzt wird. Innerhalb dieses Zylinders befindet sich die Auswerteeinheit.

Ein schematischer Aufbau des Messgerätes ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Eine Abbildung der realen Messgeräte ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

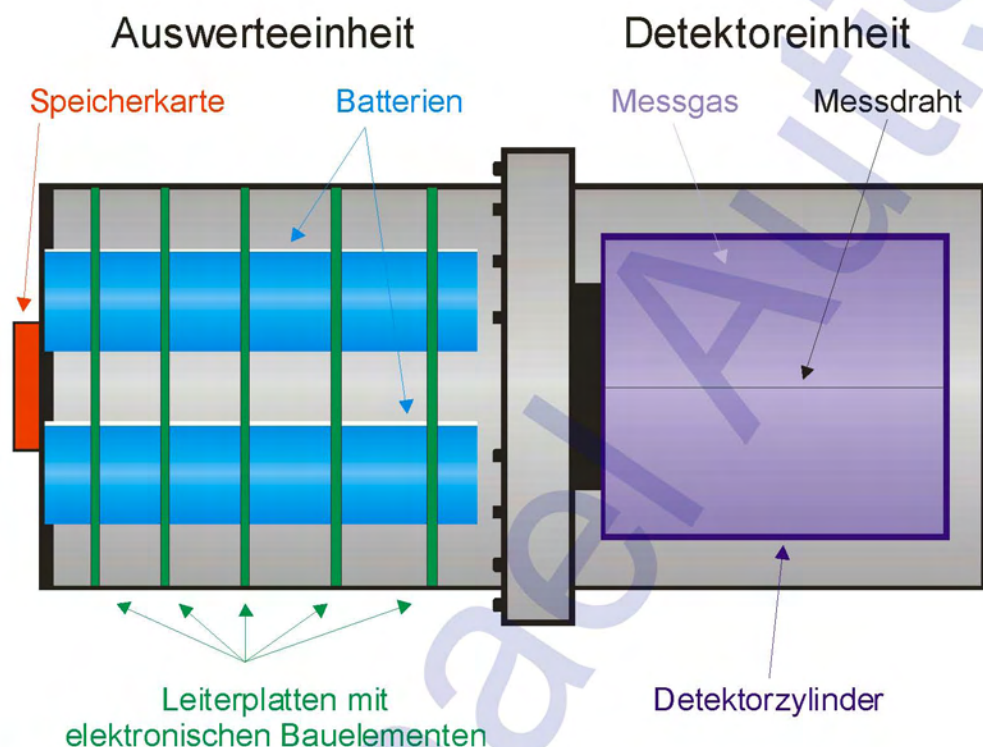


Abbildung 4-5: Schematischer Aufbau des HAWK-SEPC.



Abbildung 4-6: Ansicht zweier HAWK-SEPC Geräte.

4.2.2 Mean Chord Length

Wie schon beim HAWK-TEPC muss auch bei diesem Messinstrument die Dichte des Messgases korrigiert werden. Dafür wird wiederum die Gleichung 4-1 verwendet. Zusammen mit der MCL für einen Zylinder nach GL ergibt sich die MCL des HAWK-SEPC zu:

$$MCL_{HAWK-SEPC} = 1,63 \mu\text{m}$$

4.3 LiuLin

LiuLin ist ein Silizium-Halbleiter basierendes Messinstrument, das ebenfalls, wie die beiden oben beschriebenen Instrumente, ein Energiespektrum misst [Dach2004]. Dabei wird die Energiedeposition im Silizium Detektor jedes einzelnen Events gemessen und in einen Spannungsimpuls umgewandelt. Diese Spannungsimpulse werden dann wiederum von einer Messelektronik gezählt und in die jeweiligen Energieintervalle eingeteilt. Im Gegensatz zu den HAWK Geräten besitzt das LiuLin einen MCA mit nur 256 Kanälen. Der Messbereich ist von 0,067 keV/ μm bis 69,4 keV/ μm . Dadurch ergibt sich eine eher geringe Auflösung der Energiespektren. Der große Vorteil dieses Geräts liegt sicher in den kleinen Abmessungen. Das gesamte Gerät misst außen nur 8 x 8 x 3,5 cm und ist dadurch um vieles kleiner und handlicher als die HAWK Geräte. Dies ermöglichte auch einen Einsatz dieses Geräts auf der Internationalen Raumstation ISS [Dach2004]

4.3.1 Aufbau / Materialien

Für die Messungen und Simulationen in dieser Arbeit wurde die Version 4A des LiuLin Messinstrumentes verwendet [LiuL2004]. Wie schon oben beschrieben ist LiuLin ein sehr handliches Messgerät. Die Außenhülle ist eine Aluminium Box (Wandstärke mm). An der Außenseite der Box ist ein serieller Datenanschluss zum Auslesen der Messwerte angebracht. In der Box sind zwei Leiterplatten untergebracht, die die gesamte Messelektronik, Speicherelektronik und Batterien beherbergen. Ebenfalls auf diesen Leiterplatten angebracht ist der Detektor, welcher mit einer Keramikisolierung von den Leiterplatten getrennt ist. Der Detektor selbst ist ein 300 μm dickes Silizium Plättchen mit einer Länge von 2 cm und einer Breite von 1 cm. Oberhalb und unterhalb des Detektorplättchens befinden sich Leiterplatten aus Epoxy, welche den Abgriff der Spannungen vornehmen. An der Oberfläche des so zusammengesetzten Detektors befindet sich ein dünnes Kupferplättchen.

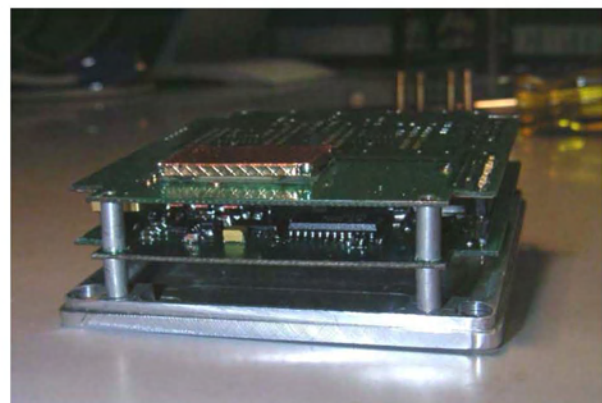
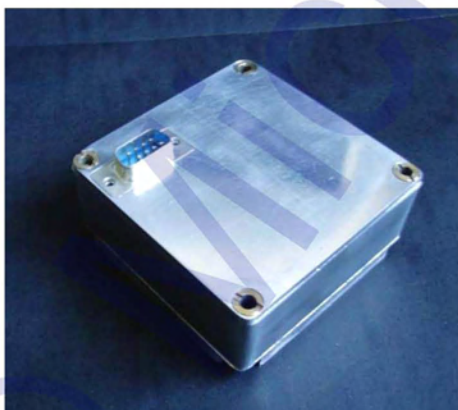


Abbildung 4-7: Ansicht des LiuLin A4 in geschlossener Form (links) und mit geöffnetem Gehäuse (rechts). Auf der obersten Leiterplatte ist dabei das Detektorplättchen zu erkennen.

4.3.2 Mean Chord Length

Durch die dünne Geometrie des Detektors ist die Streuung der unterschiedlichen Weglängen, bedingt durch die unterschiedlichen Einfallrichtungen, besonders stark abhängig von der Einfallrichtung.

Bei einer isotropen Einstrahlung ergibt sich die MCL für das LiuLin zu:

$$MCL_{\text{LiuLin}} = 574,2 \mu\text{m}$$

Bei Messungen oder Simulationen, die mit gerichteten Strahlenfeldern durchgeführt werden, muss die Weglänge der Teilchen für jede bestimmte Einfallrichtung separat berechnet werden. Bei einer Einfallrichtung aus 0° (siehe Abbildung 7-8) entspricht diese Weglänge genau der Dicke des Detektorplättchens mit $300 \mu\text{m}$.



5 Kalibriermessungen

5.1 Einleitung

Um einen Detektor in gemischten Strahlenfeldern einsetzen zu können, muss man vorerst versuchen die messrelevanten Eigenschaften des Detektors in genau definierten Strahlenfeldern zu untersuchen. Dies wurde mit den beschriebenen Messgeräten speziell für Photonen- und Neutronenstrahlung mit vielen Messungen durchgeführt. Dadurch konnte das Ansprechvermögen (Response) der Geräte bei unterschiedlichen Einstrahlungsenergien bestimmt und somit im Weiteren auch die Kalibrierfaktoren berechnet werden [Auti2003]. Erst durch die Kenntnis dieser für jedes Messgerät unterschiedlichen Kenngröße ist ein Einsatz in komplexen gemischten Strahlungsfeldern, wie sie auf der Erdoberfläche oder in der Atmosphäre vorherrschen, sinnvoll und möglich.

5.2 Photonen

Mit den HAWK-TEPC und HAWK-SEPC Geräten wurden an der Referenzstrahlanlage im Dosimetrielabor der ARC Seibersdorf research GmbH [Hran2002] Messungen mit ^{137}Cs und ^{60}Co Standard Quellen durchgeführt. Weiters wurde bei der Physikalisch Technischen Versuchsanstalt Braunschweig (PTB) mit dem HAWK-TEPC eine Kalibriermessung an einer 6,6 MeV Photonenquelle (gewichtetes Mittel aus drei Peaks: 6,13MeV, 6,92MeV und 7,12MeV von einem CaF_2 Traget, das mit Protonen mit einer Energie von 2,7MeV beschossen wird) durchgeführt. Die mikrodosimetrischen Spektren der HAWK-TEPC Photonen Messungen sind in Abbildung 5-1 dargestellt. Die mikrodosimetrischen Spektren, gemessen mit dem HAWK-SEPC, sind in Abbildung 5-2 dargestellt.

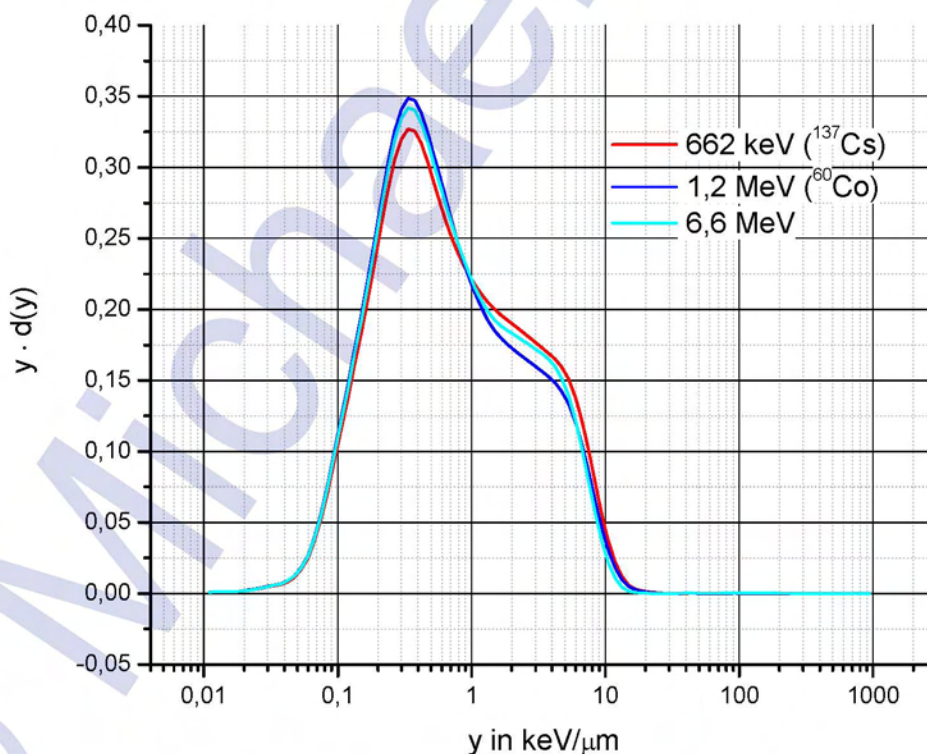


Abbildung 5-1: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 662keV (^{137}Cs), 1,2 MeV (^{60}Co) und 6,6MeV.

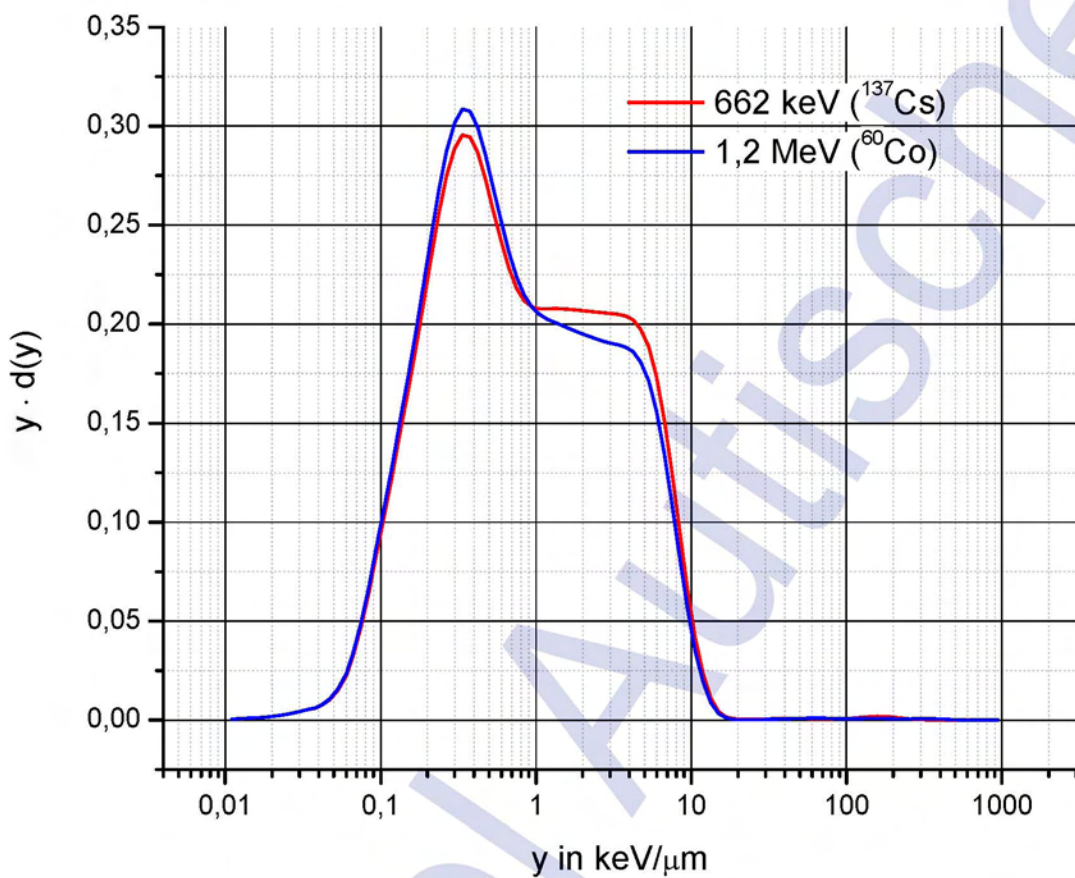


Abbildung 5-2: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-SEPC bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: $662 \text{ keV } (^{137}\text{Cs})$ und $1,2 \text{ MeV } (^{60}\text{Co})$.

5.3 Neutronen

Kalibriermessungen mit monoenergetischen Neutronen wurden bei der PTB in Braunschweig und bei der UCL (Université catholique de Louvain) mit dem HAWK-TEPC durchgeführt. Die mikrodosimetrischen Spektren der HAWK-TEPC Neutronen Messungen sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Leider ergab sich keine Möglichkeit Messungen in Neutronenfeldern mit dem SEPC oder dem LiuLin A4 durchzuführen.

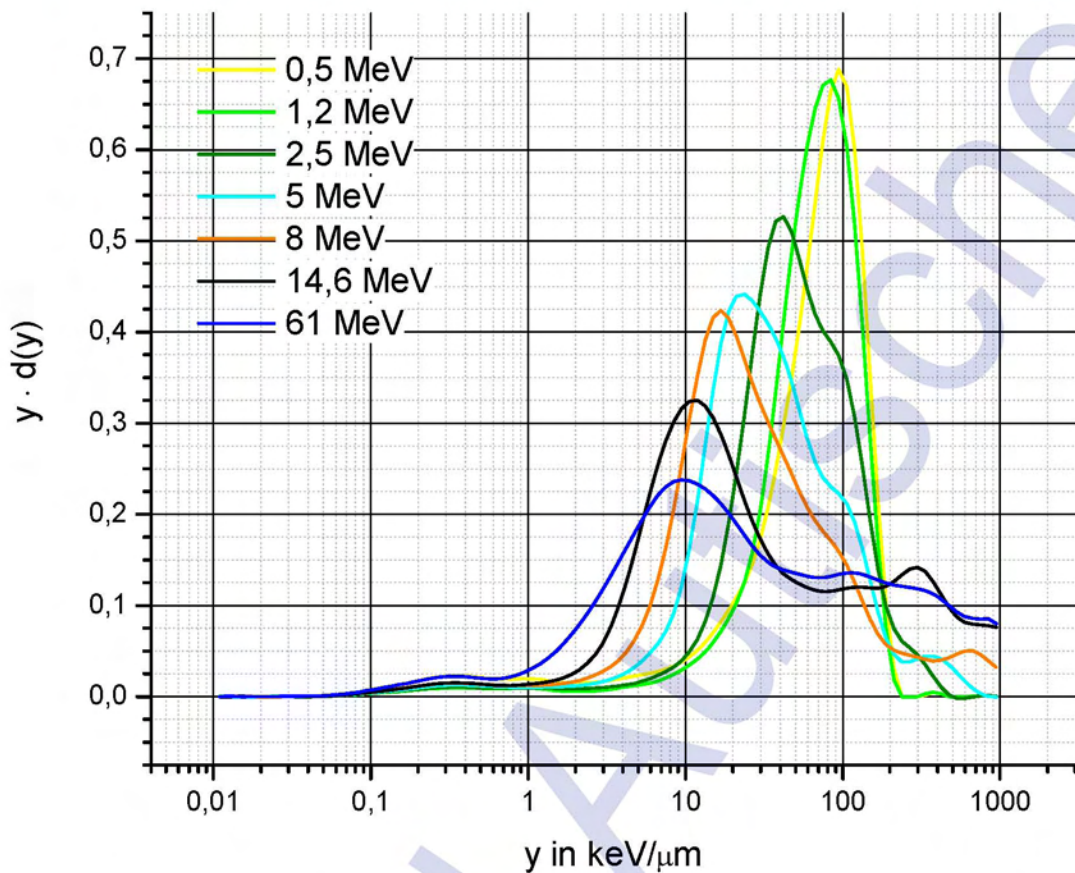


Abbildung 5-3: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC bei Bestrahlung von Neutronen unterschiedlicher Energien: 0,5MeV, 1,2MeV, 2,5MeV, 5MeV, 8MeV, 14,6MeV und 61MeV.

5.3.1 Hochenergetische Neutronen mit 100MeV und 200MeV

Im iTemba LABS (Laboratory for Accelerator Based Sciences) in Kapstadt wurden von mir selbst Messungen an hochenergetischen Neutronen durchgeführt. Dies ist eine multidisziplinäre Einrichtung, die auf der einen Seite Forschung in Bereich der Teilchenstrahlung betreibt, auf der anderen Seite medizinische Anwendung im Bereich der Krebsbestrahlung und Herstellung von radioaktiven Isotopen für medizinische Zwecke durchführt. Die größte Anlage dieser Forschungseinrichtung ist ein Zyklotron mit einem Durchmesser von 8,86 m, welches Protonen auf Energien von bis zu 200MeV beschleunigen kann. Zur Einspeisung der Protonen stehen zwei weitere kleinere Zyklotrons mit Durchmessern von 95,2 cm zur Verfügung. Die vierte Anlage auf dem Gelände ist ein 6MV Van de Graaf Beschleuniger. In der Abbildung 5-4 ist das Gelände und das Hauptgebäude der Forschungseinrichtung dargestellt.





Abbildung 5-4: Ansicht des iThemba LABS.

Bei den durchgeführten Messungen wurde das große Zyklotron mit Teilchenenergien bis 200MeV verwendet. Der schematische Aufbau der Messlokalitäten ist in der Abbildung 5-5 dargestellt.

Für die Bestrahlung der Messgeräte wurden Neutronen mit einer Energie von 100MeV und 200MeV gewählt. Die Neutronen wurden dabei durch beschleunigte Protonen mit ebenfalls 100MeV und 200MeV erzeugt, die auf ein 5 mm Li-Target geschossen wurden. Im Lithium Target läuft dabei eine ${}^7\text{Li}(p,n)$ Reaktion ab [Task2004], [Task2006]. Durch die Geometrie der Anlage ergaben sich zwei Messpositionen. Eine bei 0° und die andere bei 16° .

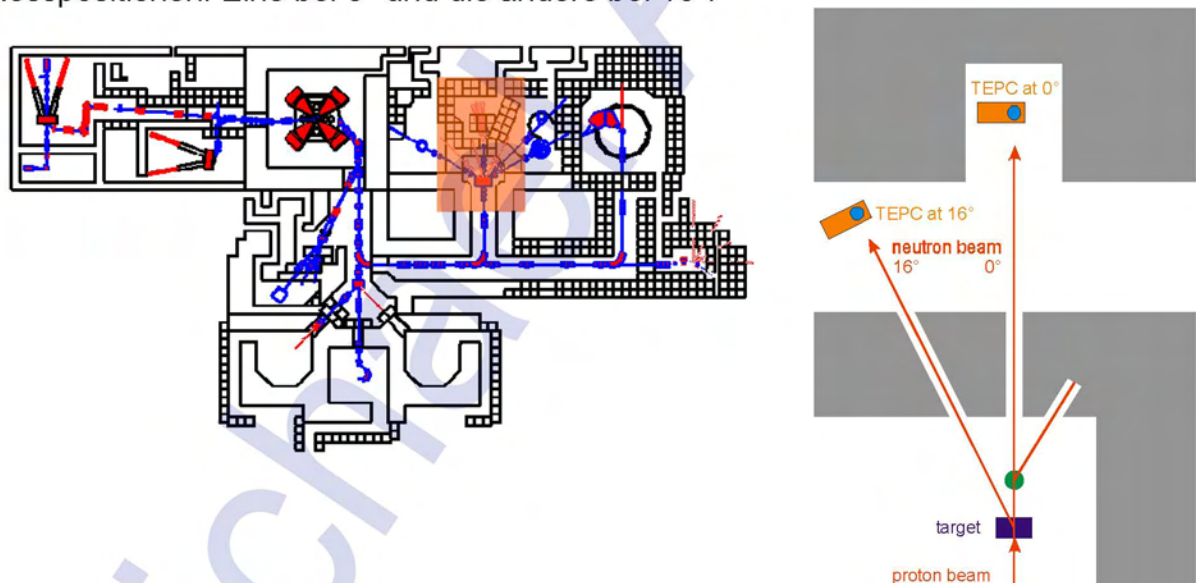


Abbildung 5-5: Schematische Ansicht der Messpositionen.

Die beiden Messpositionen unterschieden sich stark durch die Strahl Charakteristik. Der Strahl bei 0° war zum größten Teil monoenergetisch, während der 16° Strahl auch Komponenten bei niedrigeren Neutronenenergien aufwies. Die Energieverteilung der Neutronen ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Doch nicht nur die Strahlcharakteristik an den beiden Messpositionen ist unterschiedlich, sondern auch die Dosisleistungen unterscheiden sich deutlich. So wurden an der 16° Position eine zirka 25% geringere Äquivalentdosisleistungen gemessen als in der Hauptstrahlrichtung.

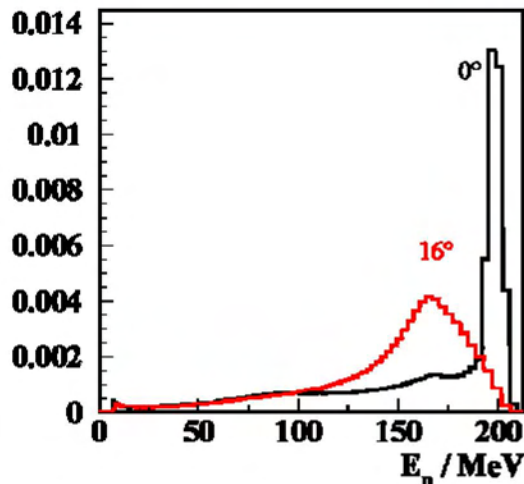


Abbildung 5-6: Normierte Zählraten einer ^{238}U fission chamber bei der Neutronenenergie von 200MeV für die Einfallrichtungen von 0° und 16°.

Die Aufstellung der Messgeräte ist in Abbildung 5-7 für die 0° Position und in Abbildung 5-8 für die 16° Position dargestellt.



Abbildung 5-7: Messposition bei 0°.



Abbildung 5-8: Messposition bei 16°.

Bei den durchgeführten Messungen wurden die zwei verwendeten Messgeräte immer an beiden Messpositionen aufgebaut und für die darauf folgende Messung vertauscht, sodass mit beiden Messgeräten an beiden Positionen gemessen wurde. Die Messzeiten der einzelnen Messungen betragen jeweils 20 Minuten, dadurch ergab sich eine Messunsicherheit der Dosisleistung von zirka 12 Prozent.

Abbildung 5-9 zeigt die normierten mikrodosimetrischen Spektren der verwendeten Messgeräte in der Hautstrahlrichtung bei einer Neutronenenergie von 100MeV.

In Abbildung 5-10 sind die mikrodosimetrischen Spektren beider Messgeräte an der 16° Position ebenfalls bei einer Neutronenenergie von 100MeV dargestellt. Die normierten mikrodosimetrischen Spektren bei einer Bestrahlung von Neutronen mit 200MeV sind für die Haupteinstrahlrichtung in Abbildung 5-11 und für die 16° Position in Abbildung 5-12 dargestellt.

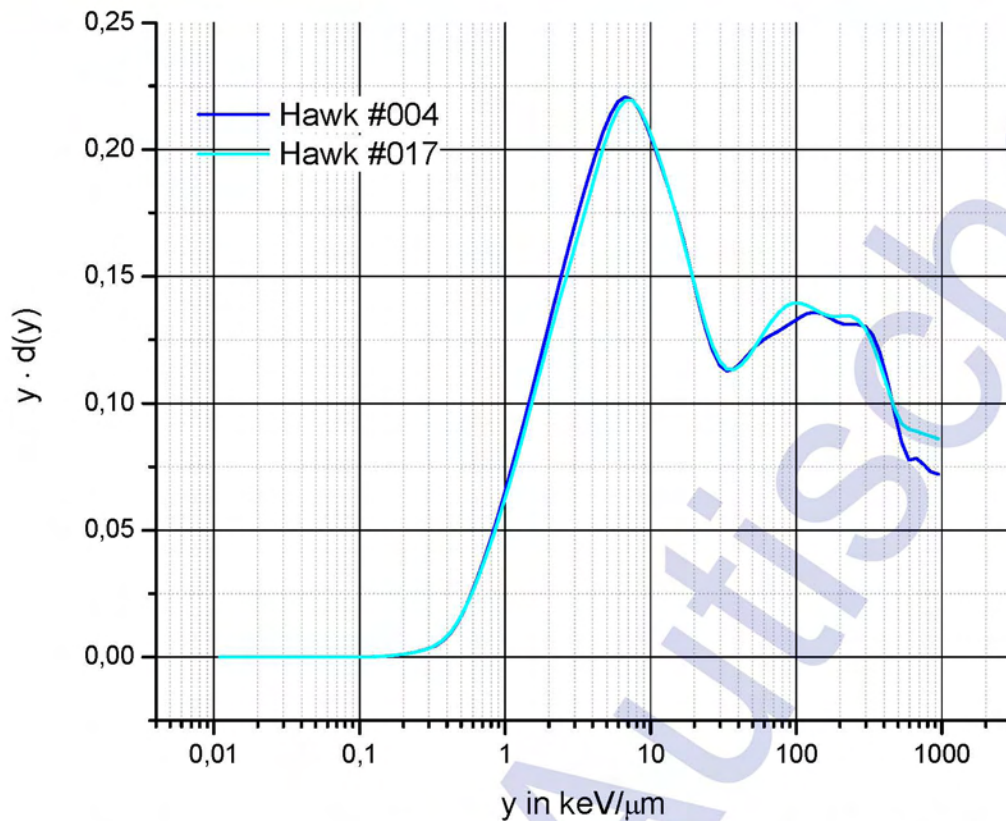


Abbildung 5-9: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung von Neutronenenergien von 100MeV in der 0° Messposition.

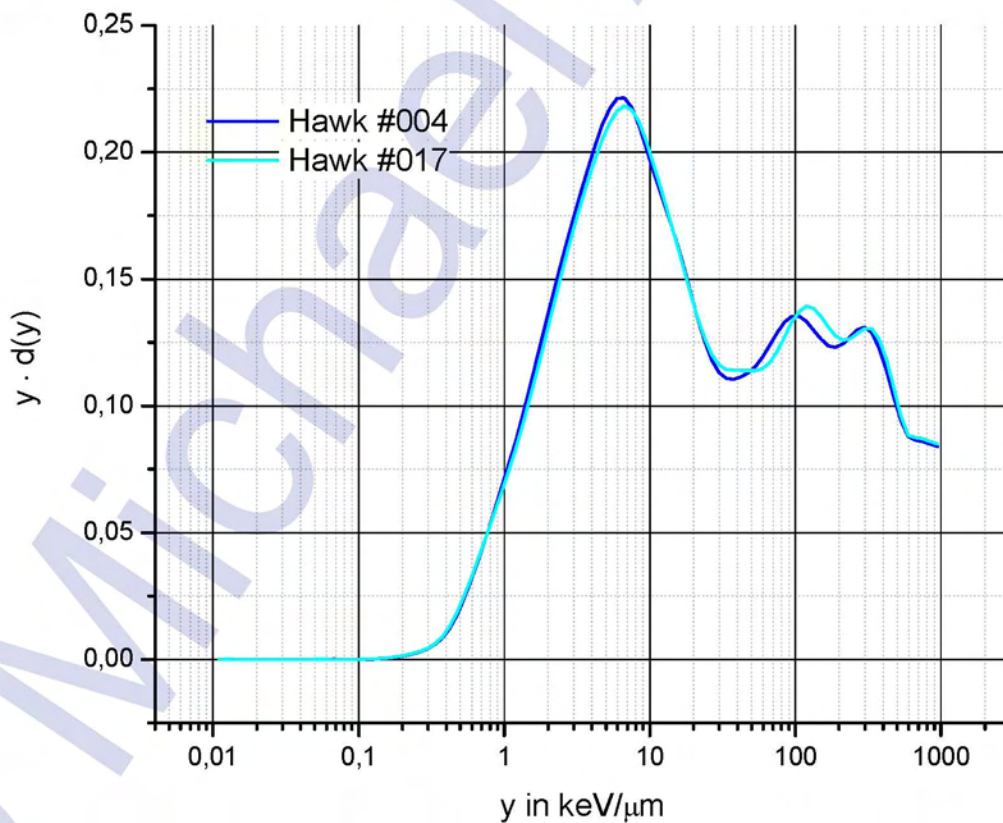


Abbildung 5-10: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung mit Neutronenenergien von 100MeV in der 16° Messposition.

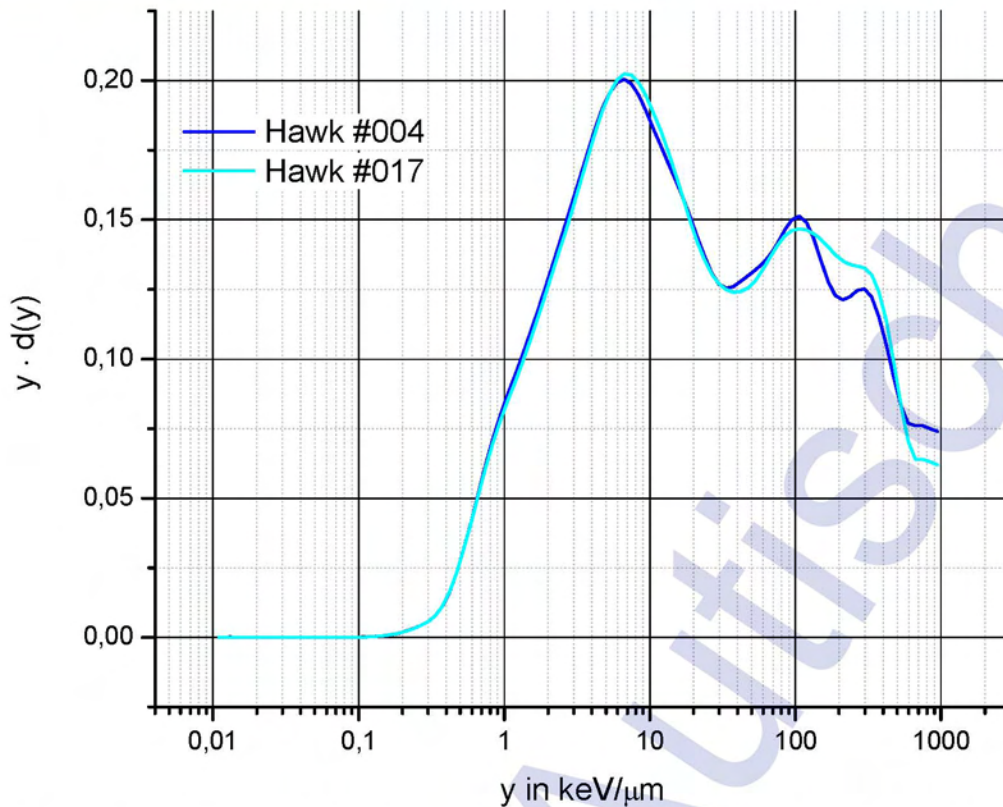


Abbildung 5-11: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung mit Neutronenenergien von 200MeV in der 0° Messposition.

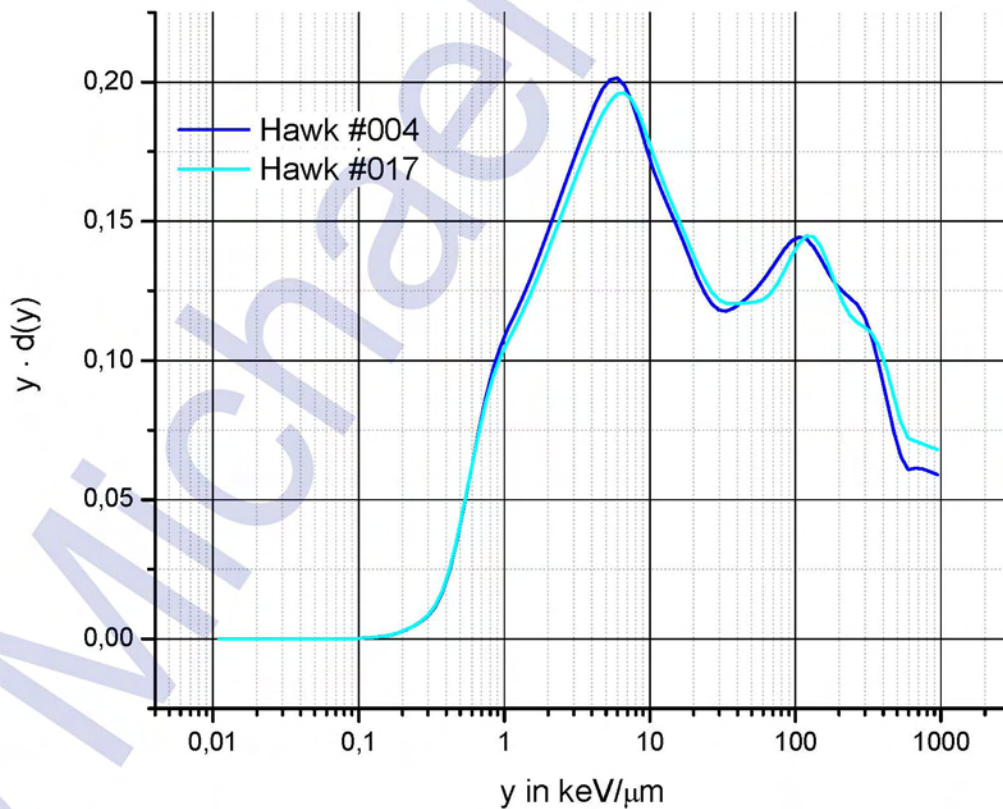


Abbildung 5-12: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung mit Neutronenenergien von 200MeV in der 16° Messposition.

Zusammen mit den schon früher bei der PTB durchgeführten HAWK-TEPC Messungen in Neutronenreferenzfeldern ergibt sich nun eine Zusammenstellung von mikrodosimetrischen Spektren monoenergetischer Neutronen zwischen 0,5 MeV und 200MeV. Eine Auswahl der gemessenen Neutronenenergien ist in Abbildung 5-13 dargestellt.

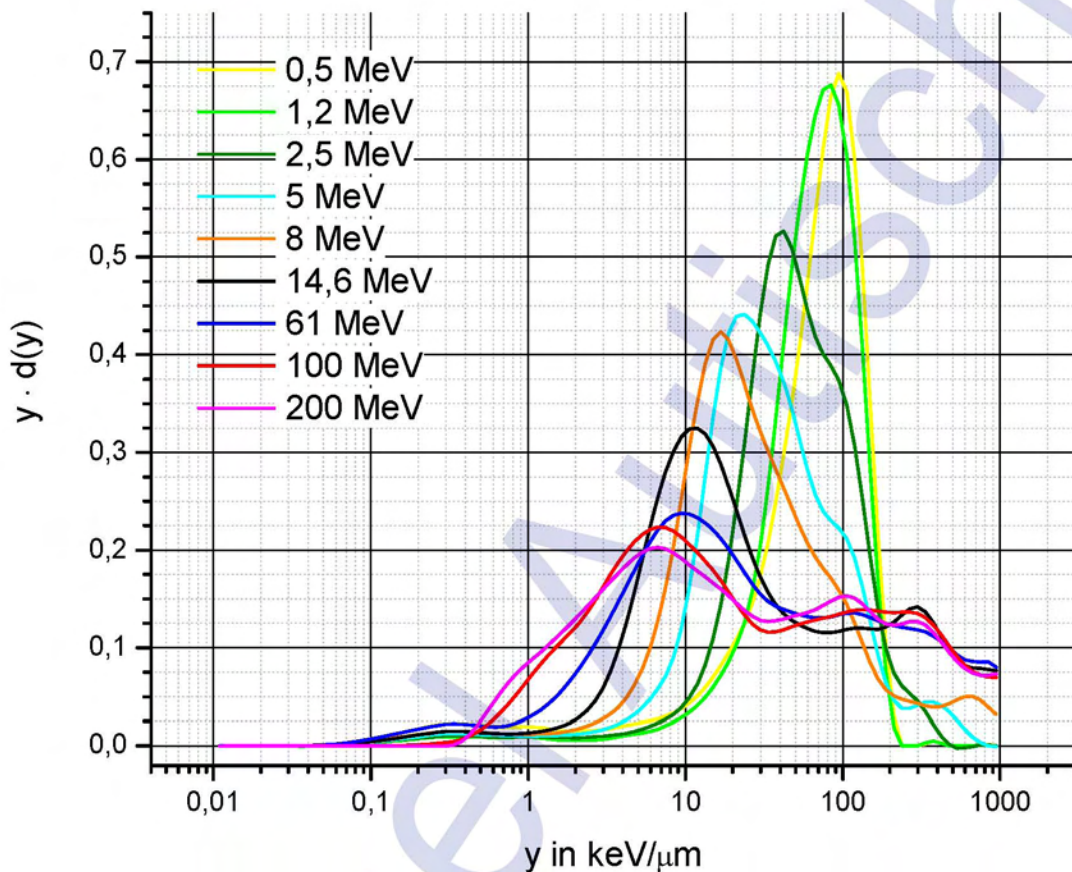


Abbildung 5-13: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC bei Bestrahlung von Neutronen unterschiedlicher Energien: 0,5MeV, 1,2MeV, 2,5MeV, 5MeV, 8MeV, 14,6MeV, 61MeV, 100MeV und 200MeV.

Die Auswertungen der während der Bestrahlungszeiten vorhandenen Dosisleistungen wurden von der PTB durchgeführt. Aufgrund von Detektorproblemen bei den 200MeV Messungen konnten dafür bis zum heutigen Zeitpunkt noch keine Referenzdaten angegeben werden. Daher wird in dieser Arbeit nur auf die Daten der 100MeV Referenzmessung genauer eingegangen.

Als erster Schritt wurde ein Kalibrierfaktor für die verwendeten Messgeräte bestimmt. Hierzu wurden die gemessenen Dosisleistungen mit den von der PTB angegebenen Referenzwerten für $H^*(10)$ [Wiss2004] verglichen.



Die Unsicherheit der Messung wurde dabei aus den statistischen Unsicherheiten getrennt für den Low- und High-LET Bereich ermittelt. Wobei sich die absolute Messunsicherheit der gemessene Zahl N durch \sqrt{N} ergibt [Bran1999] [Cowa1998].

$$K = \frac{H_{REF}}{H_{MESS}}$$

K ...Kalibrierfaktor

H_{REF} ... Referenzdosisleistung

H_{MESS} ... Gemessene Dosisleistung

Gleichung 5-1: Berechnung des Neutronenkalibrierfaktors.

Tabelle 5-1: Bestimmung des Neutronenkalibrierfaktors für 100MeV.

Gerät... Bei der Messung verwendetes Gerät

K_{n100} ...Kalibrierfaktor nach Gleichung 5-1 für 100MeV Neutronen

Gerät	Messung der Äquivalentdosisleistung H in $\mu\text{Sv/h}$	Referenzwert der Umgebungs-äquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$	K_{n100}
Hawk017	736 ± 56	300 ± 34	$0,41 \pm 0,06$
Hawk004	712 ± 41	309 ± 35	$0,43 \pm 0,06$

Da der Unterschied der Kalibrierfaktoren wesentlich kleiner ist als die Unsicherheiten, wurde für beide Geräte der Mittelwerte berechnet und dieser als Kalibrierfaktor für beide Geräte verwendet.

Dieser ergibt sich für die 100MeV Neutronenstrahlung somit zu

$$K_{n100} = 0,42 \pm 0,06$$

Für das Gerät Hawk004 wurden auch Messungen mit unterschiedlichen Einfallrichtungen (0° , 90° und 270°) durchgeführt. Daraus konnte die Winkelabhängigkeit des Gerätes bestimmt werden. Tabelle 5-2 zeigt die relative Response für die unterschiedlichen Einfallrichtungen bezogen auf die Messung bei 0° .

$$R_n = \frac{H_{REF,000}}{H_{REF,n}} \cdot \frac{H_{MESS,n}}{H_{MESS,000}}$$

R_n ...Response bei Einfallswinkel n°

$H_{REF,000}$...Referenzdosisleistung bei Einfallswinkel 0°

$H_{REF,n}$... Referenzdosisleistung bei Einfallswinkel n°

$H_{MESS,000}$...Gemessene Dosisleistung bei Einfallswinkel 0°

$H_{MESS,n}$...Gemessene Dosisleistung bei Einfallswinkel n°

Gleichung 5-2: Berechnung der Response für unterschiedliche Einfallswinkel n .



Tabelle 5-2: Bestimmung des Winkelabhängigkeit für 100MeV für den HAWK-TEPC mit der Seriennummer #004.

Gerät... Bei der Messung verwendetes Gerät
R... relative Response bezogen auf 0° nach Gleichung 5-2

Einfalls- winkel	Messung der Äquivaltdosisleistung H in $\mu\text{Sv/h}$	Referenzwert der Umgebungs- äquivaltdosisleistung $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$	Relative Response R
0°	712 ± 41	309 ± 35	1,00
90°	492 ± 49	242 ± 29	$0,83 \pm 0,13$
270°	441 ± 34	207 ± 25	$0,87 \pm 0,13$

Die in Tabelle 5-2 erhaltene Winkelabhängigkeit der Response ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Sie zeigt Abschwächungen bei den beiden Einfallsrichtungen von 90° und 270°. Wie schon bei den Photonenreferenzmessungen rührt die Abschirmung auch von den beiden etwas dickeren Abschlussplatten der Hülle des Messgerätes her. Jedoch zeigt sich die Abschwächung für Neutronen von 100MeV als erheblich geringer als für die Photonen.

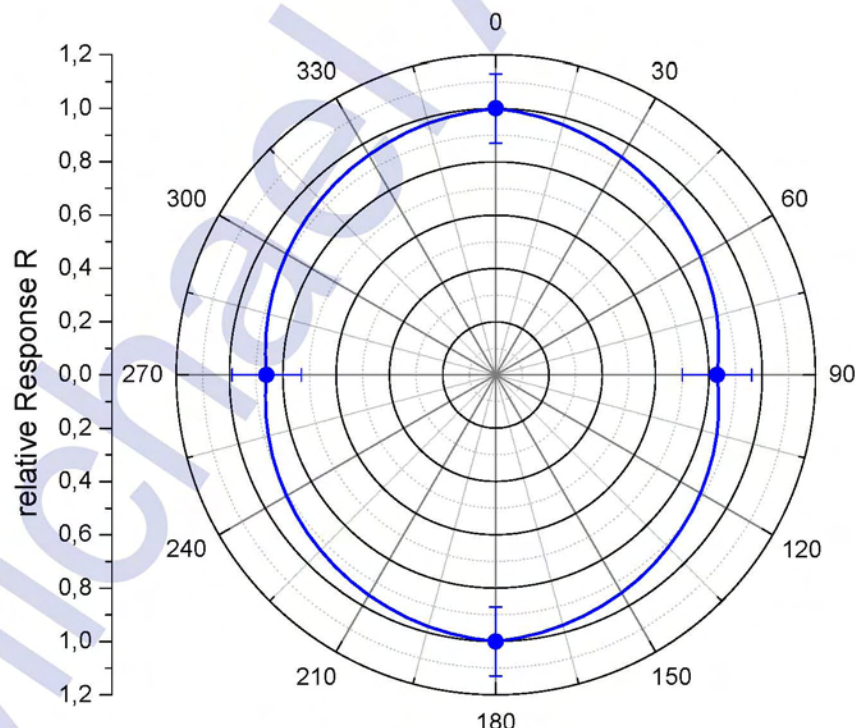


Abbildung 5-14: Relative Winkelabhängigkeit des HAWK-TEPC mit der Seriennummer #004 bei Bestrahlung von Neutronen mit 100MeV.

6 Messungen in gemischten Strahlenfeldern

Nach der genauen Charakterisierung der Messgeräte in Standard Referenzstrahlenfeldern ist der nächste logische Schritt die Eigenschaften der Messgeräte in gemischten Strahlenfeldern zu untersuchen. Dafür werden wiederum sehr genau untersuchte und leicht zu erzeugende Felder herangezogen. Einerseits kann dies durch Messungen an der Erdoberfläche verwirklicht werden, andererseits können auch Messungen tief unter der Erde dafür verwendet werden, um einen so genannten Leerwert eines Messgerätes zu bestimmen.

6.1 Leerwertmessung unter der Erdoberfläche

Der Leerwert der HAWK-TEPC-Geräte wurde in einem Bergwerk 800 m unter Tage durchgeführt [Auti2003]. Das Ergebnis dieser Messungen ist für die Bestimmung geringer Umgebungs-Dosisleistungen, wie sie an der Erdoberfläche herrschen, von großer Bedeutung. Der Leerwert des Messgerätes hat hier einen signifikanten Anteil des Messergebnisses und muss daher korrigiert werden. Die Messbedingungen und erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 6-1 und Tabelle 6-1 kurz dargestellt.

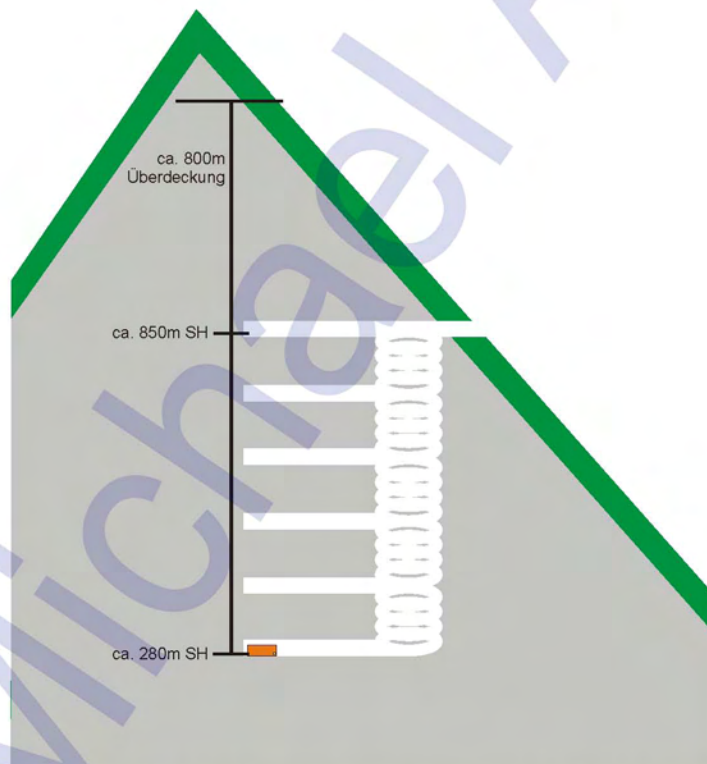


Abbildung 6-1: Schematischer Aufbau der Messposition der Leerwertmessung mit den Angaben der absoluten Seehöhen [Auti2003].



Tabelle 6-1: Ergebnis der Leerwertmessung 800 m unter Tage [Auti2003].

Hawk#004	
Energiedosisleistung	0,024 $\mu\text{Gy/h} \pm 4\%$
Umgebungsäquivalentdosisleistung	0,21 $\mu\text{Sv/h} \pm 4\%$
Messzeit	96h

Das mikrodosimetrische Spektrum der Leerwertmessung 800 m unter Tage ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Bei allen weiteren Darstellungen von gemessenen mikrodosimetrischen Spektren ist dieses als Leerwert abgezogen.

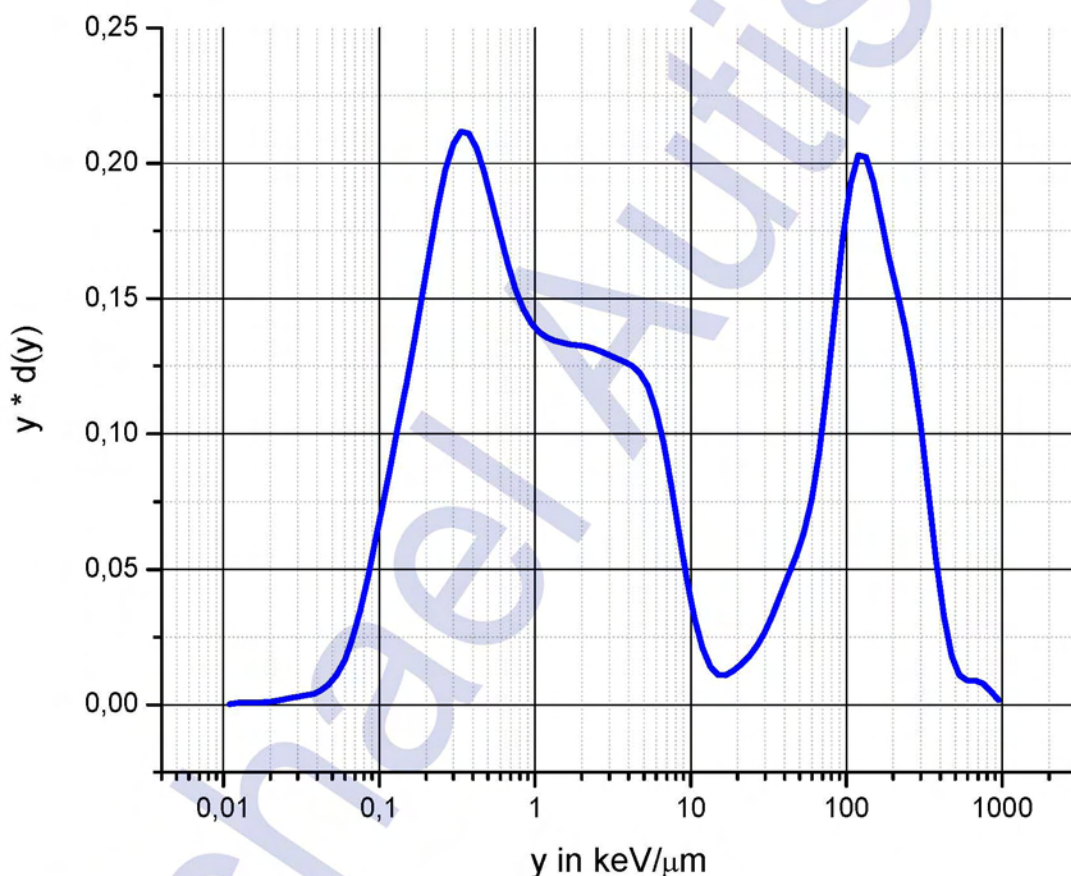


Abbildung 6-2: Normiertes mikrodosimetrisches Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC in einem Bergwerk mit einer Gesteinsüberdeckung von ca. 800m.

Der beim mikrodosimetrischen Spektrum relativ hohe Anteil im High-LET Bereich ergibt sich dabei aus mehreren Faktoren, die hierfür zusammenspielen. Erstens wird der High-LET Bereich durch die geringe Umgebungsstrahlung im Low-LET Bereich und die danach durchgeführte Normierung des Spektrums stark überbewertet. Andererseits werden bei dieser geringen Umgebungsstrahlung auch aus dem gering verunreinigten Messdraht austretende Alphateilchen gemessen, welche ebenfalls im High-LET Bereich als Counts gezählt werden [Wake1995].

6.2 Bergmessungen

Bergmessungen wurden im Laufe der Arbeit ebenfalls in unterschiedlichen Höhen durchgeführt. Frühere Messungen wurden durch weitere ergänzt.

6.2.1 Obergurgl

In Obergurgl wurde im Granatschlössl im Dachgeschoß direkt unter dem Dach gemessen. Die Messposition lag auf einer Seehöhe von zirka 1930m über dem Meeresspiegel. In Abbildung 6-3 ist die Messposition gekennzeichnet.



Abbildung 6-3: Messposition in Obergurgl.

Bei der Messung vom 20. März bis zum 26. März 2004 war ein konstanter Verlauf des SDP gegeben. Dieser Verlauf ist in Abbildung 6-4 dargestellt. Durch Mittelung über die gesamte Messzeit ergab sich ein durchschnittliches SDP von $992 \text{ MV} \pm 8 \text{ MV}$. Die geografische Position der Messung ist $46,874^\circ$ nördliche Breite und $11,030^\circ$ östliche Länge. Diese Lage entspricht einer CutOff Rigidity von 4,50 GV.

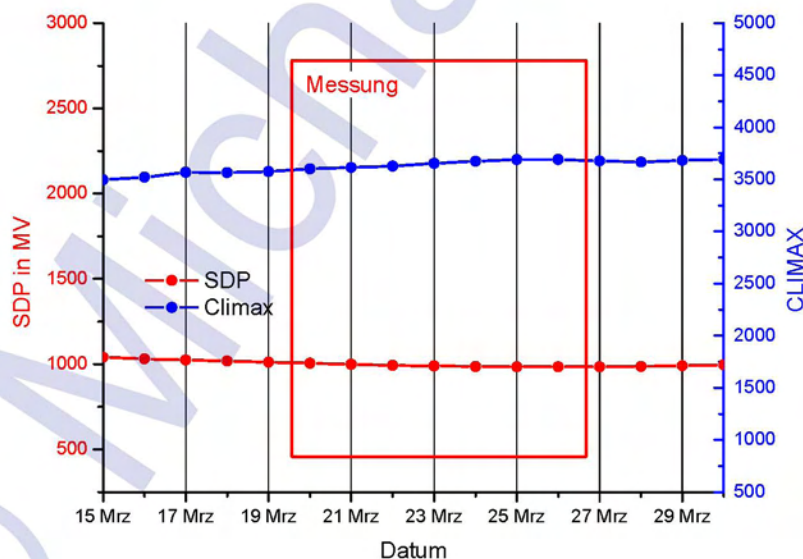


Abbildung 6-4: Verlauf des SDP in MV sowie der CLIMAX Daten während der Messung in Obergurgl.

Der Dosisleistungsverlauf der Messung ist in Abbildung 6-5 dargestellt. Aufgrund der großen statistischen Schwankung der Einzelmesswerte sind auch die Mittelwerte über 30 Minuten und ein laufender Mittelwert 10 Stunden dargestellt, der den Schwankungsbereich der Messung grafisch darstellt.

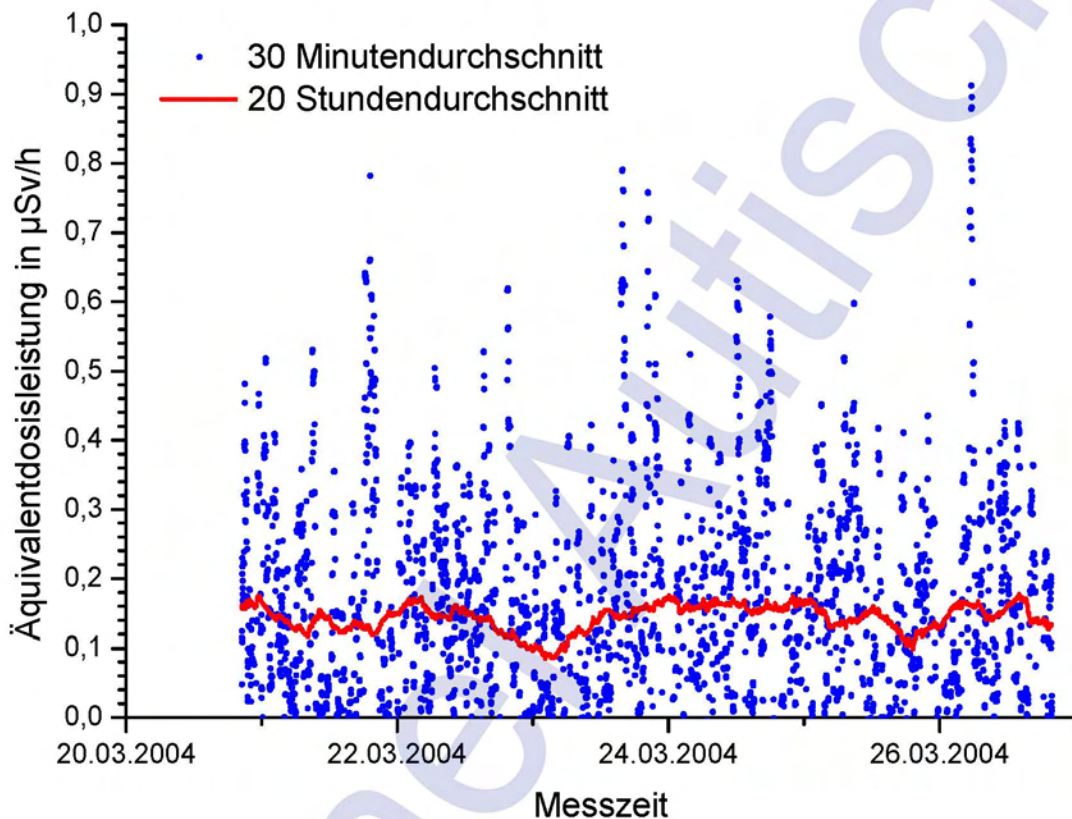


Abbildung 6-5: Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ während der Messung in Obergurgl.

Das über den Zeitraum der Messung aufgenommene normierte mikrodosimetrische Spektrum $y_d(y)$ ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Dabei sind beide HAWK-TEPC Messgeräte in der Darstellung abgebildet. Die der Äquivalentdosisleistung entsprechenden mikrodosimetrischen Spektren $y_h(y)$ der beiden Geräte sind in Abbildung 6-7 dargestellt.

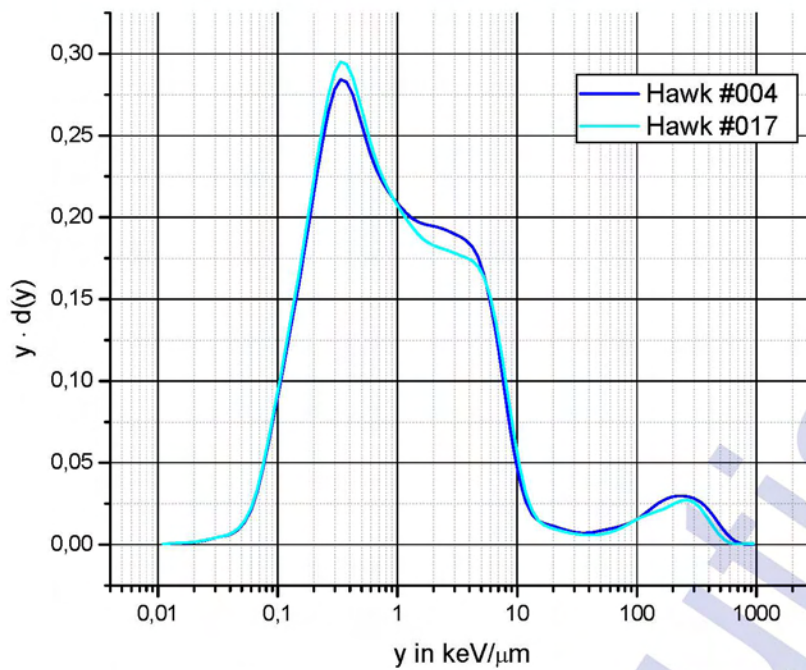


Abbildung 6-6: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC in Obergurgl auf 1930m Seehöhe.

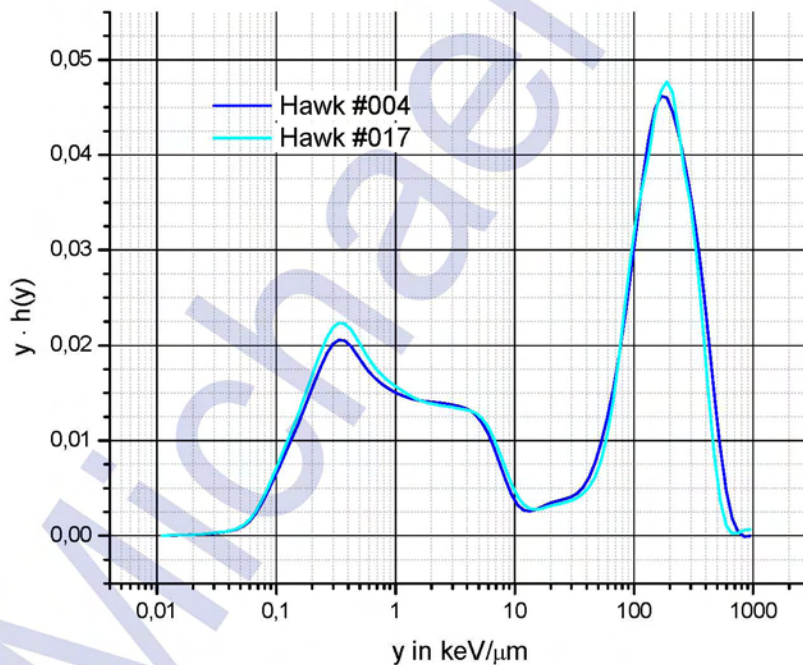


Abbildung 6-7: Dosisnormierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot h(y)$ gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten in Obergurgl auf 1930m Seehöhe.

6.2.2 Wurmkogel

In 3080m Seehöhe wurde in den Öztaler Alpen auf der Wurmkogelhütte gemessen. Als Messgerät wurde wiederum der HAWK-TEPC verwendet. Die Messung wurde vom 27. März bis zum 2. April 2004 durchgeführt. Die Messdauer bei dieser Bergmessung betrug 146,9 Stunden. Die Messposition ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Wie auf der Abbildung ersichtlich, war eine Hälfte des Daches mit Schnee bedeckt, darum wurde der Aufstellort des Gerätes so gewählt, dass sich das Gerät unter der nicht schneebedeckten Fläche befand.



Abbildung 6-8: Messposition am Wurmkogel.

Während der Messzeit ergab sich ein Verlauf des SDP wie in Abbildung 6-9 dargestellt. Der Mittelwert der Messung lag bei $994\text{MV} \pm 7\text{MV}$.

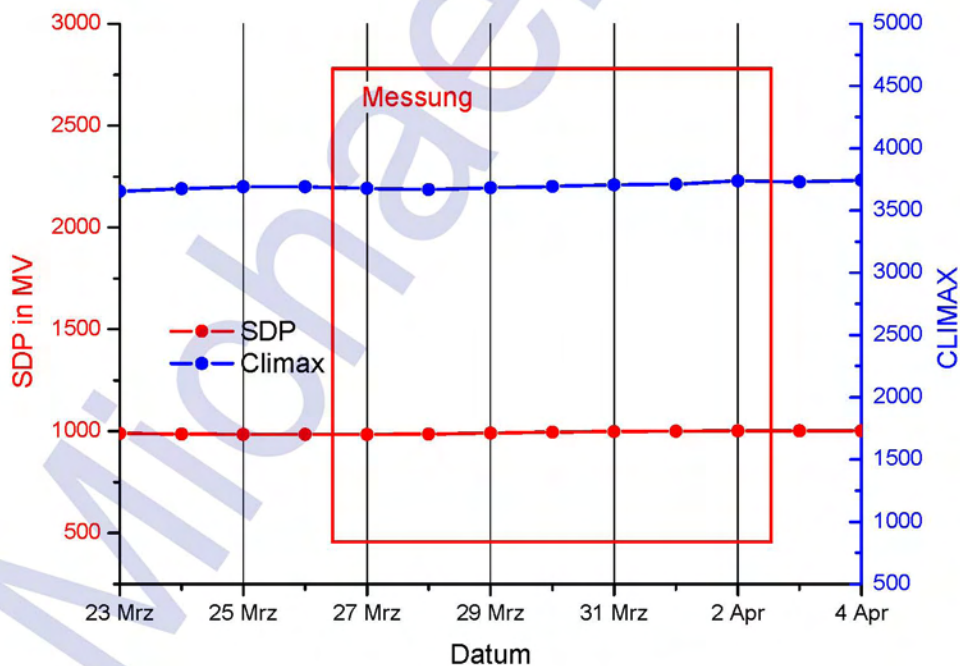


Abbildung 6-9: Verlauf des SDP in MV sowie der CLIMAX Daten während der Messung am Wurmkogel.

Die genaue geografische Position der Hütte ist $46,886^\circ$ nördliche Breite und $11,083^\circ$ östliche Länge. Dies entspricht einer CutOff Rigidity von 4,50 GV. Der Dosisleistungsverlauf der Messung ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

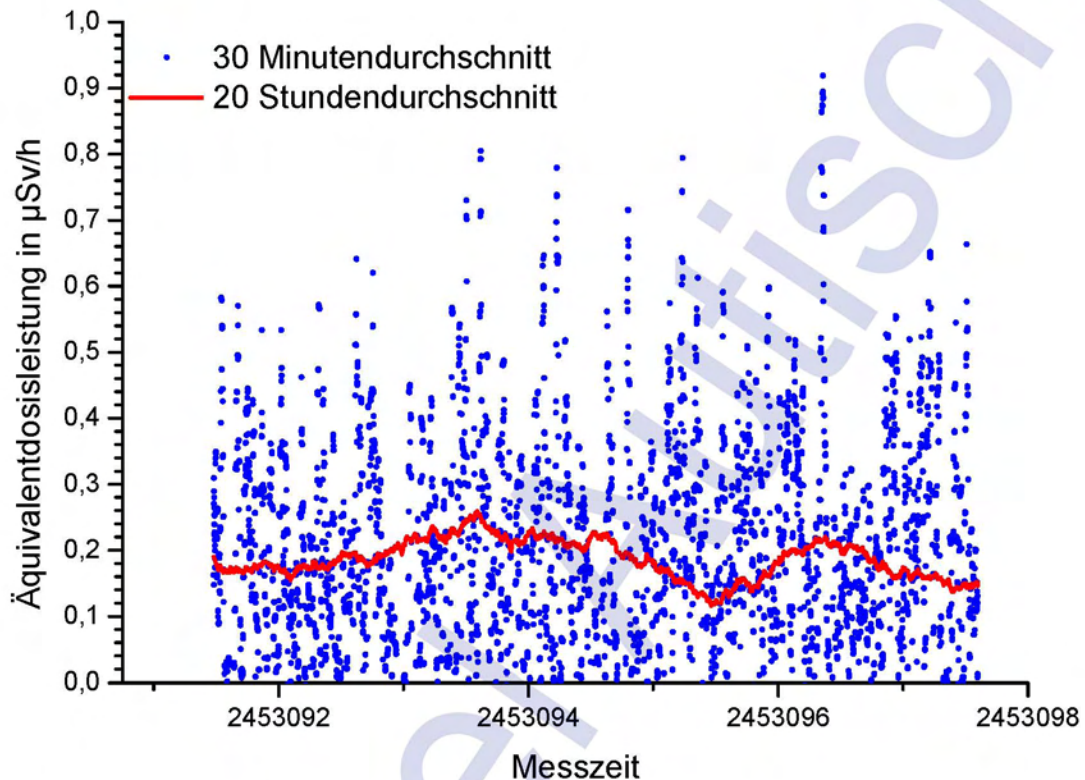


Abbildung 6-10: Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ während der Messung am Wurmkogel.

Das über den Zeitraum der Messung aufgenommene normierte mikrodosimetrische Spektrum $y_d(y)$ ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Dabei sind beide HAWK-TEPC Messgeräte in der Darstellung abgebildet. Die der Äquivalentdosisleistung entsprechenden mikrodosimetrischen Spektren $y_h(y)$ der beiden Geräte sind in Abbildung 6-12 dargestellt.

Zusätzlich zu den mikrodosimetrischen Spektren wurden auch die Dosisleistungen an den Messpositionen bestimmt. Die erhaltenen Größen sind in Tabelle 6-2 dargestellt.

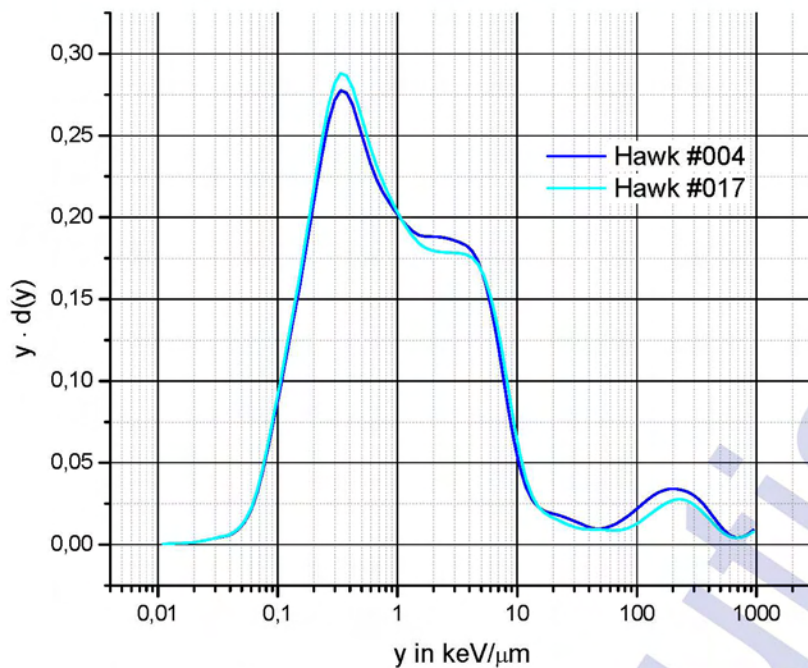


Abbildung 6-11: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC auf der Wurmkogelhütte im Ötztal auf 3080m Seehöhe.

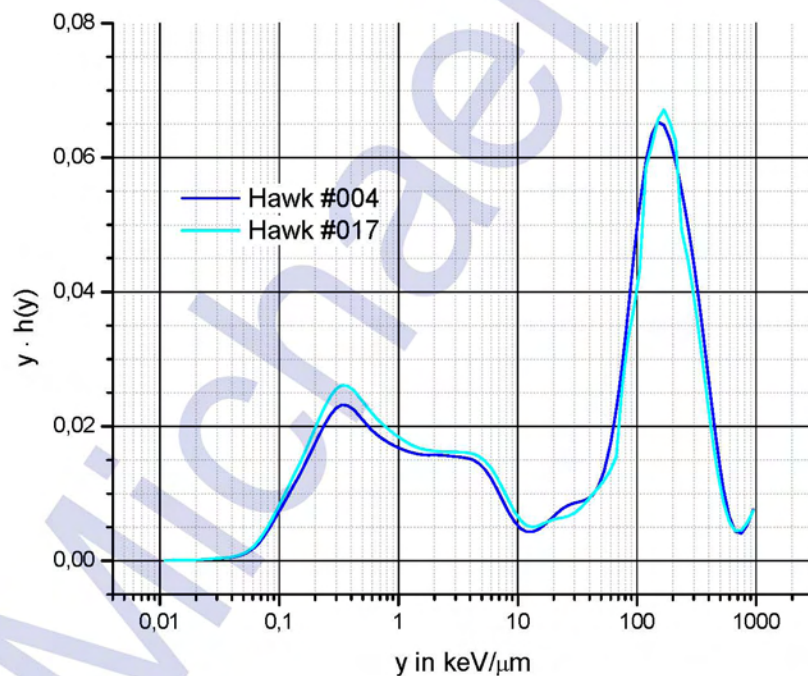


Abbildung 6-12: Dosisnormierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot h(y)$ gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC auf der Wurmkogelhütte im Ötztal auf 3080m Seehöhe.

Tabelle 6-2: gemessene Energiedosisleistungen und Äquivalent an den Messpositionen.

Ort	Seehöhe in m	gemessene E in nGy/h	gemessene H*(10) in nSv/h
Obergurgl	1930	102 ± 4	131 ± 8
Wurmkogel	3080	108 ± 4	162 ± 11

Trotz der langen Messzeiten ist ein Anstieg der Energiedosisleistung mit zunehmender Höhe zwar erkennbar, aber nicht signifikant. Anders bei der Äquivalentdosis, hier ist der Anstieg von ca. 30% deutlich sichtbar.

6.3 Messungen in Luftfahrzeugen des ÖBH

6.3.1 Messbedingungen

Am Fliegerhorst Nitter in Graz wurden am 4.2.2005 (FL380, Messzeit: 10:48 – 11:48) und am 8.2.2005 (FL230, Messzeit: 11:16 – 12:16) Messflüge mit einer Saab 105VIP durchgeführt. Dabei wurde der HAWK-TEPC wie in Abbildung 6-13 auf dem linken hinteren Sitz festgezurt. Die Abbildung 6-13 zeigt die exakte Position des Messgeräts in dem Luftfahrzeug. Die Messungen wurden jeweils eine Stunde in zwei unterschiedlichen Flughöhen, Flugfläche 230 (FL230 = 7.010m) und Flugfläche 380 (FL380 = 11.580m) durchgeführt. Die Bestimmung der Höhe erfolgte mit dem barometrischen Bordinstrument des Luftfahrzeugs. Der Schwankungsbereich der Flughöhen betrug ca. ± 90m. Das Solar Deceleration Potential (SDP) während der Messungen betrug 772 MV.



Abbildung 6-13: Messposition des HAWK-TEPC im Luftfahrzeug.



Abbildung 6-14: Messgebiet in der Obdach Area mit der eingezeichneten Flugbahn (blau) [Karte: BEV2010].

Die beiden Flüge wurden jeweils in dem Gebiet der Obdach Area im Grenzgebiet von Steiermark und Kärnten durchgeführt. Abbildung 6-14 zeigt das Einsatzgebiet mit der Flugbahn. Um eine ausreichende Statistik für die Messung zu erhalten, wurde jede der Messungen mit einer Stunde Messzeit durchgeführt. Natürlich hätte eine längere Messzeit eine noch geringere statistische Schwankung ergeben, aber aufgrund des Treibstoffverbrauchs ist eine längere Messzeit mit diesem Flugzeugtyp nicht möglich. Während der Messung kreiste das Luftfahrzeug auf einer Bahn mit einem Durchmesser von zirka 10km. Als Zentrum der Messung wurden die Koordinaten von $46,81^\circ$ nördlicher Breite und $14,83^\circ$ östlicher Länge gewählt. Diese Messposition entspricht einer CutOff Rigidity von 4,55 GV

6.3.2 Messverläufe

Die erste Messung wurde in einer Höhe von 11.500m durchgeführt. Die exakte Messzeit dieser Messung betrug 61 Minuten. In Abbildung 6-15 wird der Verlauf der Umgebungsäquivalentdosisleistung während der Messung gezeigt. Zusätzlich zu den Einzelwerten der Messung ist auch die über die Messzeit gemittelte Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in der Abbildung eingetragen. Zur besseren Visualisierung der Einzelmesswerte ist in der Abbildung auch der gemittelte Verlauf über 5 Minuten dargestellt.

Die Messzeit der zweiten Messung in einer Höhe von 7.000m betrug 62 Minuten.

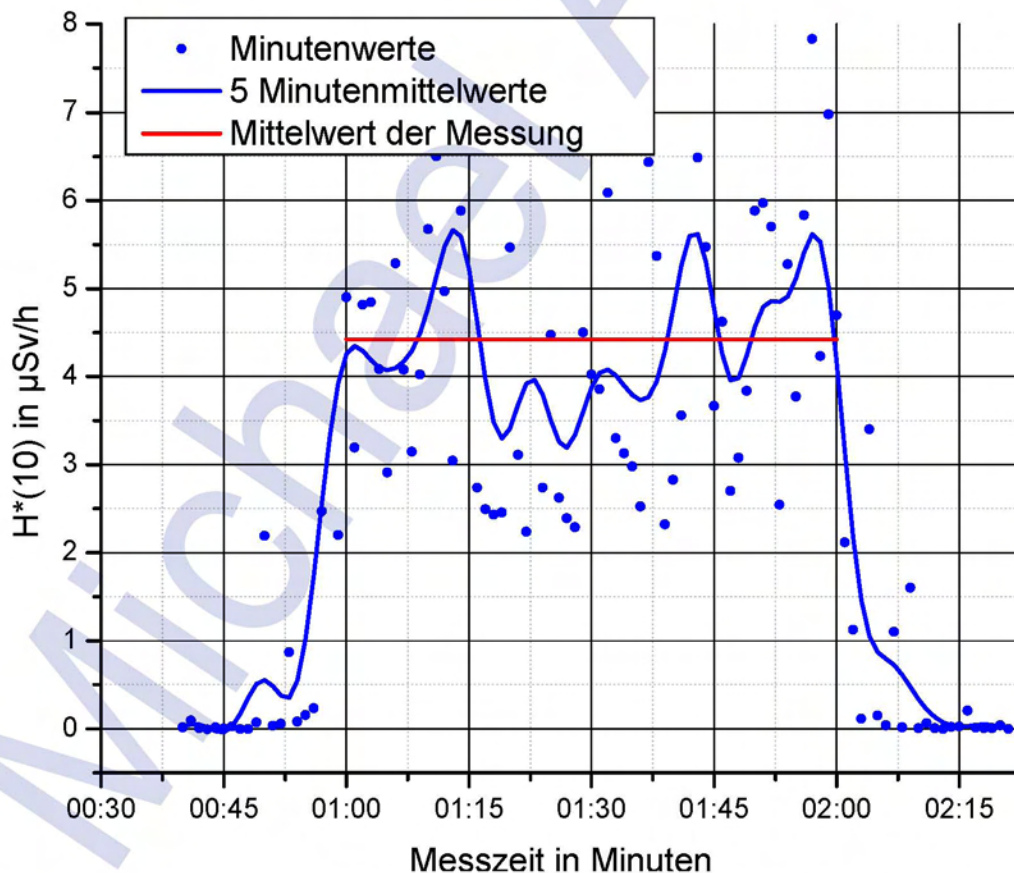


Abbildung 6-15: Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ der Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer in 11500m (FL380).

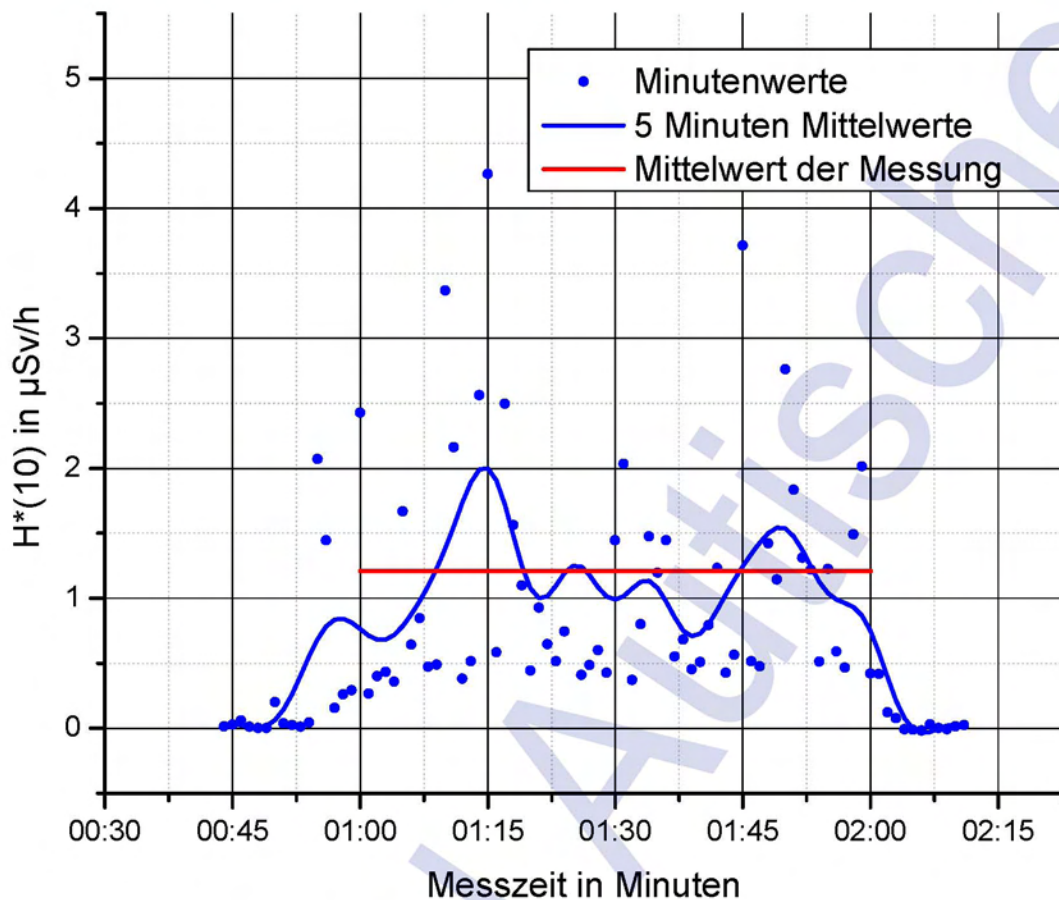


Abbildung 6-16: Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ der Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer in 7000m (FL230).

6.3.3 Dosisleistungsvergleiche

Ein Vergleich der beiden Messungen ist in Abbildung 6-17 dargestellt. Zur Veranschaulichung der Unterschiede in der Dosisleistung während der Messflüge wurden beide Flüge derart übereinander gelegt, sodass der Beginn der einstündigen Messungen jeweils bei der Zeit 01:00 gegeben war.

Zusätzlich zu den Dosisminutenwerten wurde während der Messungen auch ein mikrodosimetrisches Spektrum aufgenommen. Der Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren $y_d(y)$ der beiden Messungen ist in Abbildung 6-18 dargestellt. Abbildung 6-19 zeigt den Vergleich der, der Äquivalentdosisleistung entsprechenden, mikrodosimetrischen Spektren $y_h(y)$ der Messungen in den unterschiedlichen Flughöhen.



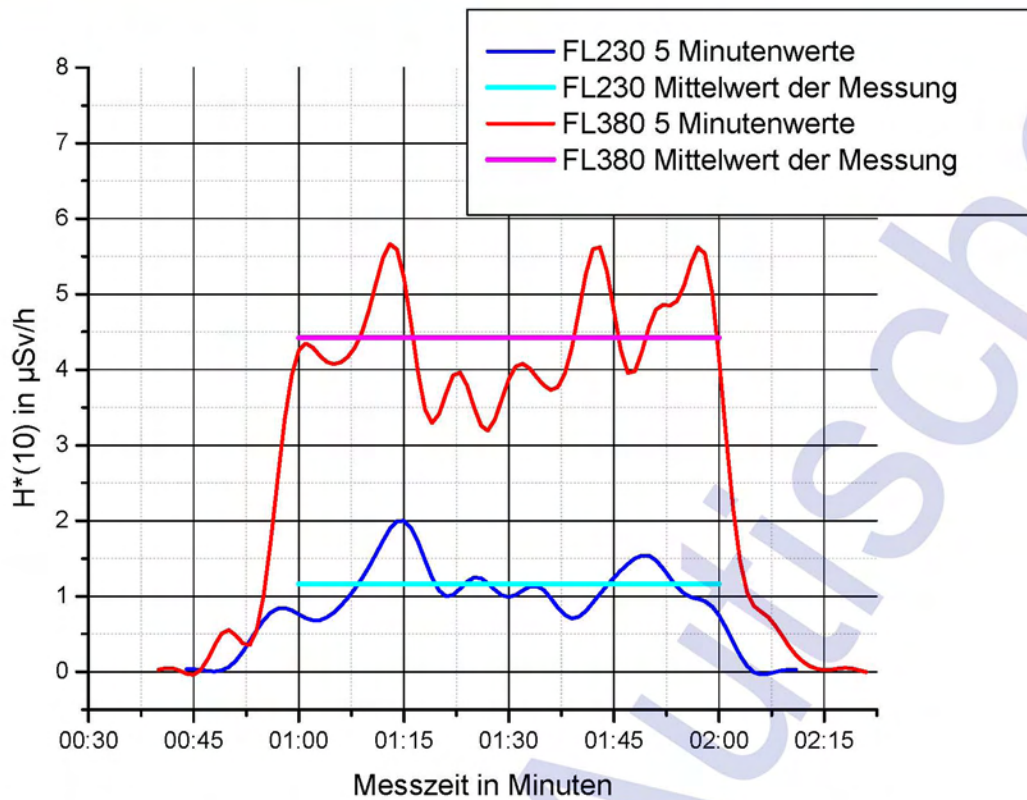


Abbildung 6-17: Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungsverläufe $H^*(10)$ der beiden Flugmessungen in 7000m (FL230) und 11500m (FL380).

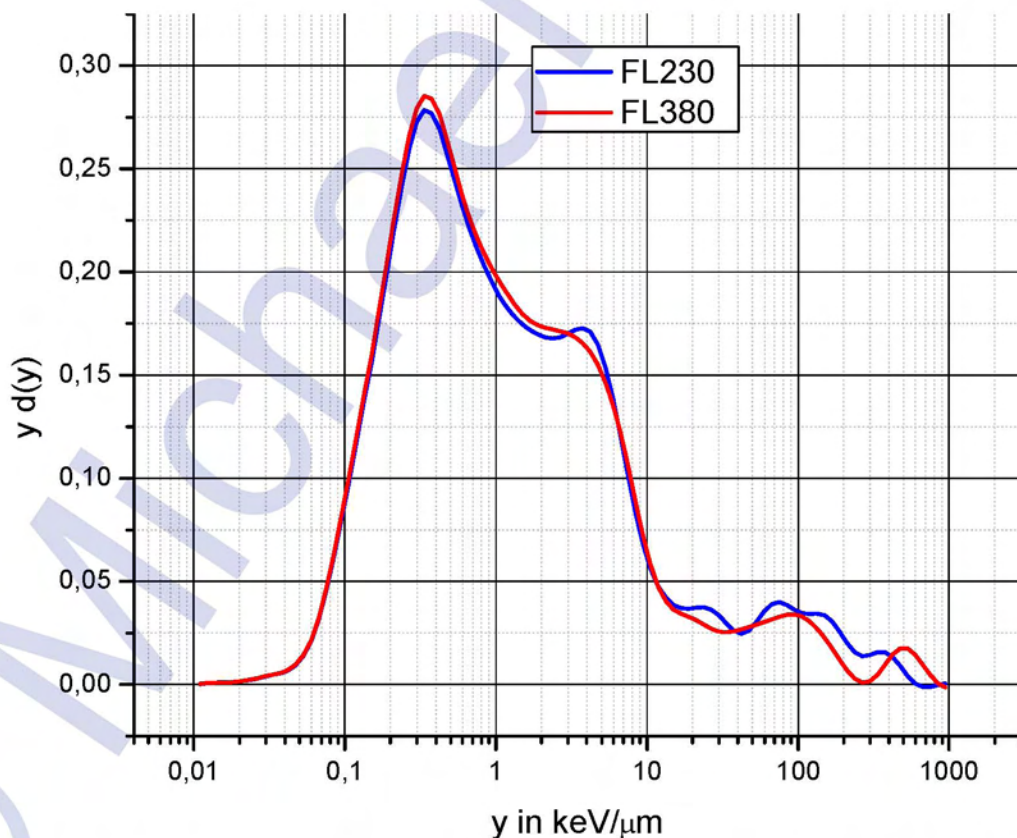


Abbildung 6-18: Vergleich der normierten mikrodosimetrischen y - $d(y)$ Spektren der Flugmessungen mit dem HAWK-TEPC in 7000m (FL230) und 11500m (FL380) Höhe.

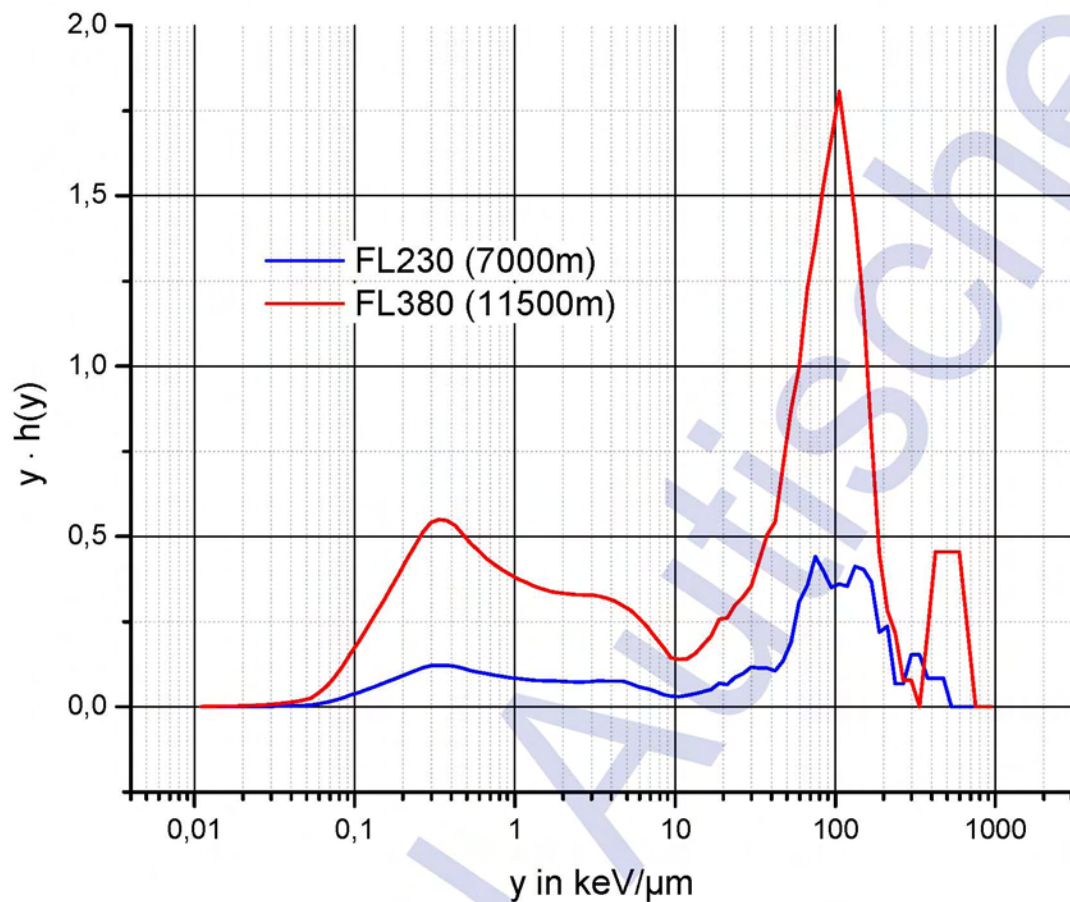


Abbildung 6-19: Vergleich der dosisnormierten mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot h(y)$ der Flugmessungen in 7000m (FL230) und 11500m (FL380). Die Spektren sind hierbei nicht normiert, sondern mit $Q(L)$ sowie der Dosisleistung multipliziert.

Die bei den beiden Flugmessungen gemessenen Werte für die Energiedosisleistung und die Äquivalentdosisleistung sind in der Tabelle 6-3 eingetragen. Zu erwähnen ist dabei, dass sich die Äquivalentdosisleistung von 7000m auf 11500m beinahe vervierfacht.

Tabelle 6-3: Gemessene Energiedosisleistungen und Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ an den Messpositionen in 7000m und 11500m der Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer.

E... gemessene Energiedosisleistung
H(10)...* gemessene Umgebungsäquivalentdosisleistung

Flughöhe in m	gemessene E in $\mu\text{Gy/h}$	gemessene $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$
7.000 (FL230)	$0,62 \pm 0,02$	$1,2 \pm 0,1$
11.500 (FL380)	$2,3 \pm 0,1$	$4,4 \pm 0,4$

6.4 Zusammenfassung der Messungen in gemischten Strahlenfeldern

Mit dem HAWK-TEPC Messgerät wurden am Gelände der damaligen ARC Seibersdorf research GmbH und auch auf Bergen Messungen durchgeführt [Auti2003] [Göld2004]. Alle Werte wurden mit den aktuellen Auswerteprozeduren und Leerwertkorrekturen neu berechnet. Zusammen mit den Bergmessungen und den Flugmessungen kann hiermit ein Verlauf von 186m Höhe bis 11500m Höhe wiedergegeben werden. Die detaillierten Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 6-4 zusammengefasst. Diese Zusammenstellung ist grafisch in Abbildung 6-20 dargestellt. In der Abbildung ist der Anstieg der Dosisleistung in Abhängigkeit der Seehöhe sehr gut zu erkennen und gibt die abschirmende Wirkung der Erdatmosphäre wieder und zeigt den besonders starken Anstieg der Strahlung bei Flughöhen um 7000m. Zur besseren Übersicht sind in der Abbildung auch noch die mit dem Rechencode AVIDOS [Lato2009] errechneten Äquivalentdosisleistungen eingetragen. Die Werte unterhalb von 8000m sind extrapolierte Werte [Lato2010] die lediglich zur besseren Veranschaulichung dienen sollen.

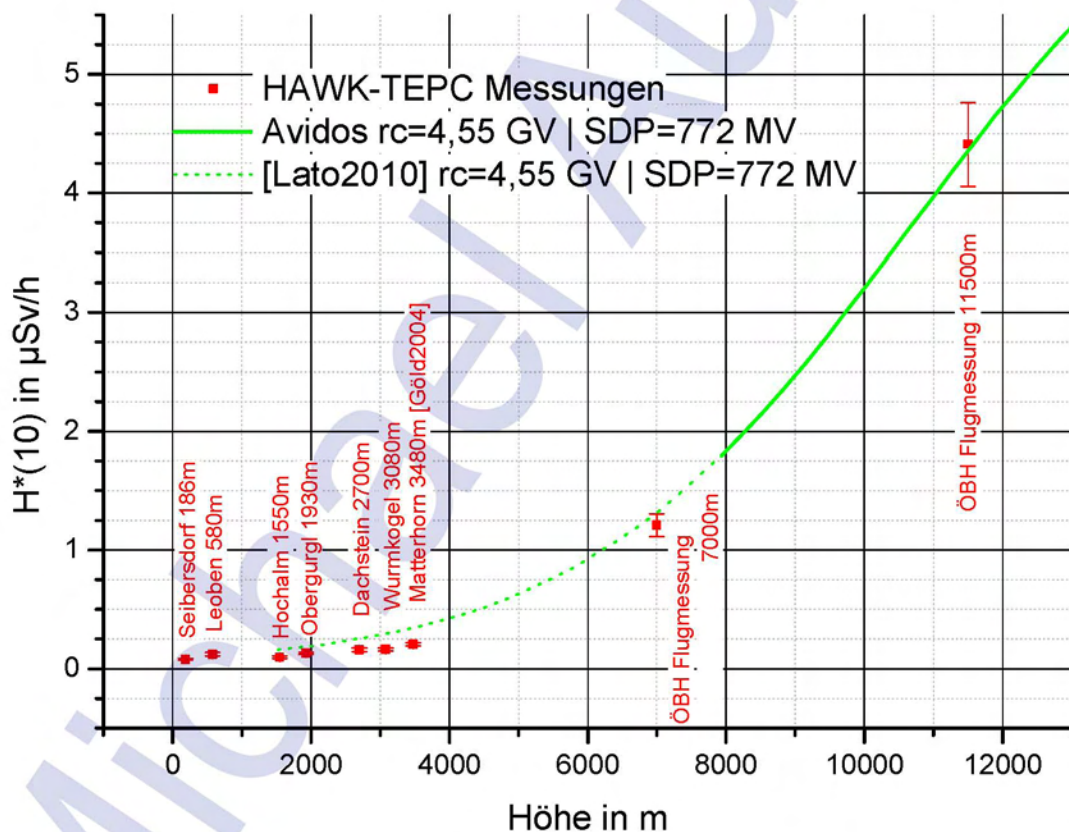


Abbildung 6-20: Umgebungsäquivalentdosisleistungsvergleich $H^*(10)$ verschiedener Messpunkte auf der Erdoberfläche [Auti2003],[Göld2004] und bei den Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer. Zum Vergleich sind die Werte von Avidos [Lato2009] und die extrapolierten Werte unter 8000m [Lato2010] in der Abbildung dargestellt.

In Tabelle 6-4 ist zusätzlich zu den grafisch in Abbildung 6-20 dargestellten Werten, auch noch die Messung in Graz [Auti2003] eingetragen. Damit gibt die Tabelle einen vollständigen Überblick über die von mir persönlich durchgeführten Erdoberflächen- und Bergmessungen. Diese werden noch weiter durch die ebenfalls von mir selbst durchgeführten Flugmessungen mit dem ÖBH ergänzt.

Tabelle 6-4: Zusammenfassung der Messungen am Gelände des ARC Seibersdorf, in Graz, in Leoben, auf der Hochalm, in Obergurgl, am Dachstein, am Wurmkogel, am Matterhorn [Göld2004] sowie der Flugmessungen in 7000m und 11500m Höhe mit dem ÖBH. Verglichen werden dabei die Energiedosisleistungen und die Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$. Des Weiteren werden diese Werte noch weiter aufgesplittet in die Anteile $<10\text{keV}/\mu\text{m}$ (LowLET) und $>10\text{keV}/\mu\text{m}$ (HighLET).

Höhe... Seehöhe der Ortsmessung, bzw. Flughöhe
 Ort... lokale Ortsbezeichnung, bzw. Bezeichnung der Flugmessung
 Datum... Datum der Messung, bzw. Beginn und Ende der Messung
 E... gemessene Energiedosisleistung der Messung, darunter die Anteile
 LowLET... Energiedosisleistung für LET $<10\text{keV}/\mu\text{m}$
 HighLET... Energiedosisleistung für LET $>10\text{keV}/\mu\text{m}$
 $H^*(10)$... gemessene Umgebungsäquivalentdosisleistung der Messung, darunter die
 Anteile
 LowLET... $H^*(10)$ für LET $<10\text{keV}/\mu\text{m}$
 HighLET... $H^*(10)$ für LET $>10\text{keV}/\mu\text{m}$

Höhe Ort	Geogr. Breite Länge	Datum am/von bis	gemessene E in $\mu\text{Gy}/\text{h}$		gemessene $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv}/\text{h}$	
			LowLET	HighLET	LowLET	HighLET
186m	47,976	19.9.2002	0,05 \pm 4%		0,08 \pm 9%	
Seibersdorf	16,505	25.9.2002	0,04	0,01	0,04	0,04
380m	47,065	30.8.2002	0,08 \pm 9%		0,10 \pm 14%	
Graz	15,457	2.9.2002	0,07	0,01	0,07	0,03
580m	47,362	9.9.2002	0,11 \pm 6%		0,12 \pm 11%	
Leoben	15,052	16.9.2002	0,09	0,02	0,09	0,03
1.550m	47,330	7.9.2002	0,08 \pm 7%		0,10 \pm 12%	
Hochalm	15,204	9.9.2002	0,07	0,01	0,07	0,03
1.930m	46,874	20.3.2004	0,10 \pm 4%		0,13 \pm 6%	
Obergurgl	11,030	26.3.2004	0,09	0,01	0,09	0,04
2.700m	47,467	18.10.2002	0,10 \pm 5%		0,16 \pm 9%	
Dachstein	13,662	20.10.2002	0,09	0,01	0,09	0,07
3.080m	46,880	27.3.2004	0,11 \pm 4%		0,16 \pm 7%	
Wurmkogel	11,083	2.4.2004	0,10	0,01	0,10	0,06
3.480m	45,934	24.3.2003	0,15 \pm 4%		0,21 \pm 7%	
Matterhorn	7,708	31.3.2003	0,13	0,02	0,14	0,07
7.000m	46,808	9.2.2005	0,62 \pm 4%		1,2 \pm 8%	
ÖBH Flugm	14,829	9.2.2005	0,54	0,08	0,5	0,7
11.500m	46,808	4.2.2005	2,33 \pm 4%		4,4 \pm 8%	
ÖBH Flugm	14,829	4.2.2005	2,06	0,27	2,1	2,3



7 Monte Carlo Simulationen

7.1 Monte Carlo Codes

7.1.1 Allgemein

In vielen Gebieten der modernen Physik werden Simulationsprogramme, die auf dem Monte Carlo Prinzip [Land2000] beruhen, eingesetzt. Die Anwendungen ziehen sich dabei von der Berechnung von Eigenschaften ungeordneter Medien, über Systeme der Gleichgewichtsstatistik in denen thermische Bewegungen eine Rolle spielen und Stoßumwandlungen bei Warteschlangenproblemen bis hin zur Berechnung vom Durchgang von Strahlung durch Materie. Ebenso eignen sich die Methoden für eigentlich analytische Fragestellungen, wie der Auswertung hochdimensionaler Integrale, oder bestimmter Typen von Differentialgleichungen unter komplexen Randbedingungen. [Thei2002]

Der Transport von Teilchen durch Materie mit Hilfe von MC Codes beruht darauf, dass versucht wird, die Wechselwirkung mit Materie möglichst genau zu modellieren. Hierbei wird ein Teilchen mit vordefinierten Randbedingungen in das Absorbermaterial eingeschossen und beginnt dort mit den Atomen des Absorbers wechselzuwirken. Die MC Methode wird nun dazu verwendet den statistischen Prozess, dem die Wechselwirkung unterliegt, zu duplizieren. Beispielsweise unterliegen Ort und Art der Wechselwirkung, Anzahl und Art der erzeugten Sekundärteilchen und viele andere Parameter einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, die mit realen Experimenten bestimmt wird. Mit Hilfe von Zufallszahlen werden dann die jeweiligen Werte aus diesen Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt. Wegen der Verwendung von Zufallszahlen wurde auch der Name Monte-Carlo Methode für diese Art der Berechnung gewählt. Die MC Methode ermöglicht ein Minimum an Komplexität in der Beschreibung, wodurch eine gute Imitation der Realität erreicht wird. Als Nachteil erweist sich der sehr hohe Rechenaufwand. Schnelle Computer und mitunter lange Rechenzeiten werden benötigt um Ergebnisse mit hinreichend guter Statistik zu erzielen. [Land2000] [Hoff2002]

7.1.2 Fluka

Für alle in dieser Arbeit vorkommenden Simulationen wurde der MC Code FLUKA verwendet. Fluka (FLUktuierende KASKade) wurde 1962 entwickelt und von diesem Zeitpunkt an laufend weiterentwickelt. Die aktuelle Version ist 2008.3c.0 (vom 30. November 2009). Die in der Arbeit gezeigten Simulationen beruht noch auf die Vorgängerversionen bis zurück zur Version Fluka2003. Wobei in diesen Versionen die Gruppierung der niederenergetischen Teilchen noch nicht beinhaltet war. Der Simulationscode ist basierend auf der Programmiersprache Fortran. Fluka transportiert zirka 60 verschiedene Teilchen. Die Energiebereiche der einzelnen transportierten Teilchen von Fluka sind in Tabelle 7-1 für eine Auswahl von Teilchen dargestellt. [Fass2003] [Fass2005]

Speziell seit dem Beginn dieser Arbeit wurde auch das User Interface von Fluka sehr stark verbessert. Am Anfang gab es keinerlei grafische Bedienoberfläche und auch die Auswertung der Simulationsergebnisse war meist sehr zeitaufwendig. In den letzten Jahren hat Fluka diesbezüglich eine notwendige Veränderung erfahren. Mit "Flair for Fluka" wurde eine sehr bedienerfreundliche grafische Benutzeroberfläche geschaffen [Vlac2009].

Tabelle 7-1: Transportenergiebereiche der einzelner Teilchen in Fluka [Fass2009].

Teilchen	Energiegrenzen für Sekundäre Teilchen	Energiegrenzen für Primäre Teilchen
Charged hadrons	1 keV-20 TeV	100 keV-20 TeV
Neutronen	Thermal- 20 TeV	Thermal-20 TeV
Antineutronen	1 keV-20 TeV	10 MeV-20 TeV
Myonen	1 keV-1000 TeV	100 keV-1000 TeV
Elektronen	1 keV-1000 TeV	70 keV -1000 TeV (low-Z-materials) 150 keV -1000 TeV (high-Z materials)
Photonen	1 keV-1000 TeV	7 keV -1000 TeV
Heavy ions	10 MeV/n-10000 TeV/n	100 MeV/n-10000 TeV/n

Die Simulationsgeometrien werden in Form einer kombinatorischen Geometrie aus vordefinierten Körpern zusammengesetzt und definiert. Diese vordefinierten Körper können zu komplexen Geometrien zusammengefügt werden. Jedem dieser Körper muss auch ein Material zugewiesen werden. Um die Simulationsgeometrie herum muss eine Abgrenzung des Simulationsraumes mit einem weiteren Körper erfolgen. Diesem wird die Eigenschaft eines „Schwarzen Loches“ zugewiesen, so dass jedes, zu diesem Körper vordringende Teilchen, an der Oberfläche dieses Körpers absorbiert wird.

Seit einiger Zeit besteht in Fluka auch die Möglichkeit eine Voxelgeometrie zu verwenden. Eine solche Geometrie besteht aus vielen kleinen dreidimensionalen Pixeln (sogenannten Voxeln), jedem von diesen Voxeln wird dann wiederum ein Material zugewiesen.

Eine dreidimensionale Visualisierung der Simulationsgeometrie ist mit der Applikation SimpleGeo möglich. Aktuell steht die Version 4.1 zur Verfügung. Teile der Abbildungen wurden auch noch mit früheren Versionen erstellt. [Thei2006]

7.2 Simulationsgeometrien

7.2.1 HAWK-TEPC

Die Geometrie und die Materialien des HAWK-TEPC wurden in einer etwas vereinfachten Geometrie nachgebildet. Die Simulationsgeometrie enthält alle wichtigen Elemente des HAWK-TEPCs. Der Aluminium Koffer wurde in Form eines Quaders mit entsprechender Dicke simuliert. In die Polyethylen Füllung des Koffers wurde das Gerät selbst eingebettet. Bei dem Gerät wurden die Hülle und die Batterien ebenfalls nachgebildet. Besonders genau nachgebildet wurde die Geometrie des kugelförmigen Detektors selbst. Alle Außenabmessungen wurden dabei per Hand nachgemessen und mit diesen Werten nachmodelliert. Für die Abmessungen des Detektors wurde das Manual der Erzeugerfirma [FarW2000] verwendet und bei Unklarheiten über die Geometrie Rücksprache mit dem Hersteller gehalten. Eine Abbildung dieser Simulationsgeometrie ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

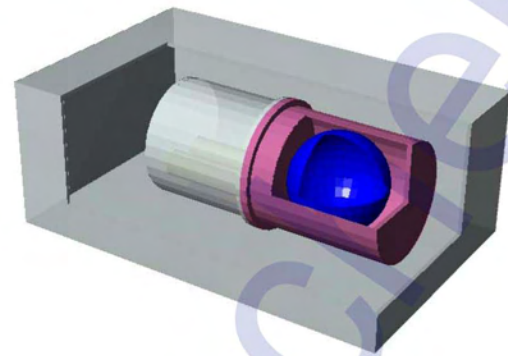
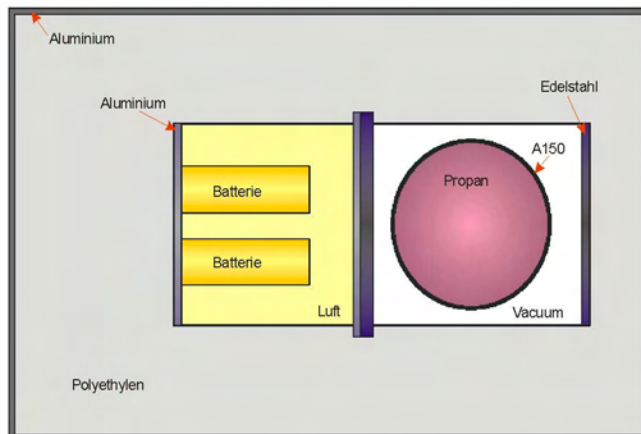


Abbildung 7-1: Simulationsgeometrie des HAWK-TEPCs.

7.2.2 HAWK-SEPC

Für die Erstellung der Simulationsgeometrie des SEPC konnte die Hülle vom HAWK-TEPC übernommen werden. Wie auch schon beim HAWK-TEPC musste beim HAWK-SEPC besonderer Wert auf den Detektor selbst gelegt werden. Dieser wurde nach den genauen Abmessungen des beschriebenen Manuals nachgebildet [FarW2002]. Die Simulationsgeometrie ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

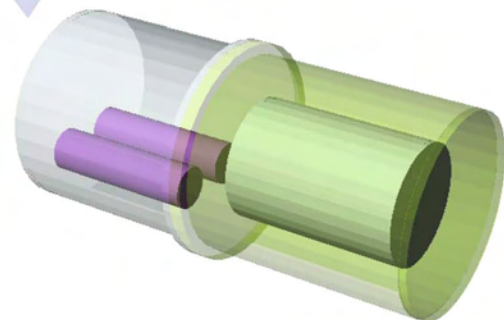
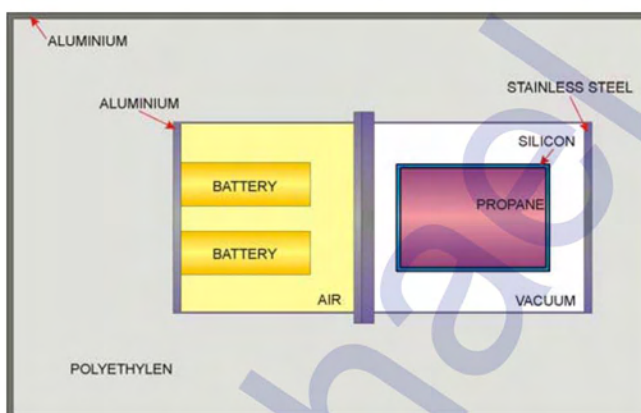


Abbildung 7-2: Simulationsgeometrie des HAWK-SEPCs.

7.2.3 LiuLin A4

Die Simulationsgeometrie des LiuLin Geräts wurde basierend auf den vom Hersteller zugrunde gelegten Daten und Plänen konstruiert. Ein wichtiger Aspekt des Geräts war die detaillierte Beschreibung der Region um den Siliziumdetektor. Hierfür wurden, soweit dies möglich war, genauere Auskünfte von den Herstellern der Einzelkomponenten eingeholt. Einige Zusammensetzungen von Komponenten konnten aufgrund von Firmengeheimnissen der Hersteller nur näherungsweise nachgebildet werden. Die elektronischen Bauelemente auf den Platinen wurden bei dieser Simulation miteinbezogen, indem in den Regionen, in die diese aufgelöteten Elemente sich befinden, ein Gemisch von Luft und den Bestandteilen der

elektrischen Bauelemente angenommen wurde (Hellgrau(links) bzw. Grün(rechts) in Abbildung 7-3). Die Simulationsgeometrie ist in Abbildung 7-3 dargestellt. Diese Abbildung zeigt links den Schnitt der Geometrie in der Umgebung des Detektors.

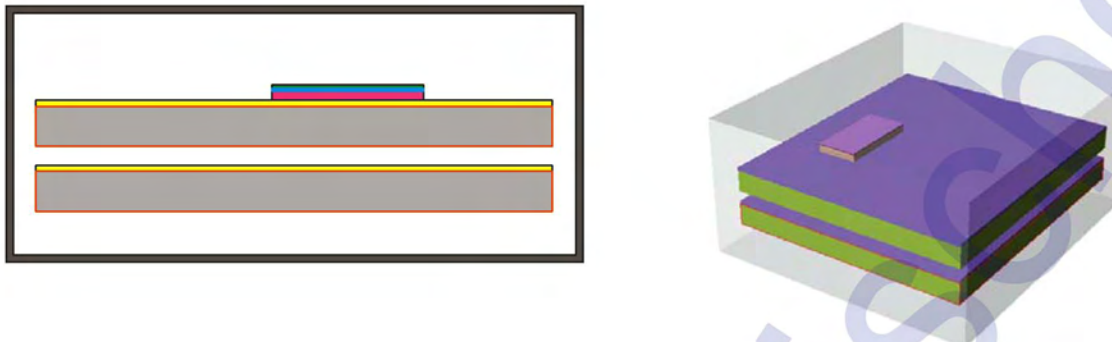


Abbildung 7-3: Simulationsgeometrie des LiuLin A4.

7.3 Simulation von Referenzfeldern

7.3.1 Simulationsquellen

Da im Standard FLUKA Simulationscode die Startpositionen, Richtungen und Verteilungen nur eingeschränkt für die Simulationsprobleme benutzbar waren, musste für viele Spezialfälle eigene, so genannte Quellen programmiert werden. Die am häufigsten verwendeten Quellen sind hier etwas näher beschrieben.

7.3.1.1 Ebene Quelle

Bei Gestaltung einer ausgedehnten ebenen Quelle war zu beachten, dass die Startpartikel gleichmäßig von der gesamten Oberfläche der Quelle starten. Weiters wurde in die Quelle die Möglichkeit integriert, die Einstrahlungsrichtung zu verändern. Damit ist es möglich, die Quelle in einem beliebigen Winkel zu drehen. Diese besondere Eigenschaft der Quelle wurde wie später gezeigt, verwendet, um die Winkelabhängigkeit der Geräte zu simulieren.

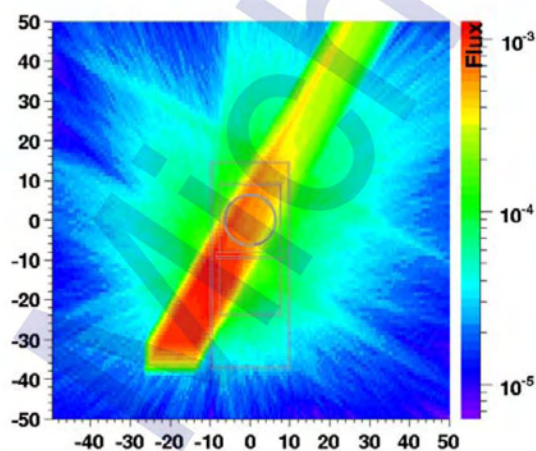


Abbildung 7-4: Fluenzverteilung bei einem Einstrahlungswinkel von 60° mit 1,2 MeV Neutronen für den HAWK-TEPC.

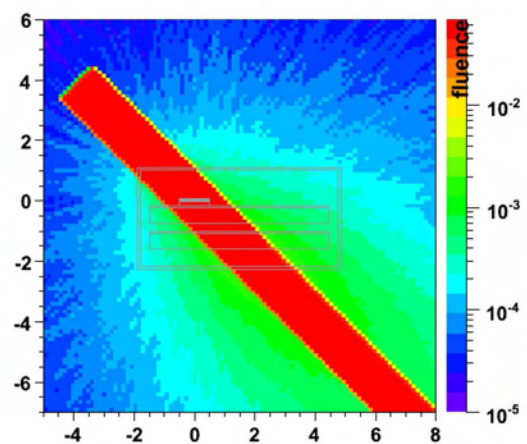


Abbildung 7-5: Fluenzverteilung bei einem Einstrahlungswinkel von 135° mit 30 MeV Neutronen für LiuLin.

Für die HAWK-TEPC und HAWK-SEPC Simulationen wurde im Falle der ebenen Quellen eine Größe von 15 cm mal 15 cm verwendet. Dabei konnte gezeigt werden, dass auch größer gewählte Quellen keinen Einfluss auf das Ergebnis hatten [Beck2003]. Der Mittelpunkt der Quelle wurde dabei so gewählt, dass er von der Detektormitte einen Abstand von 40 cm hatte, also bei jedem gewählten Winkel außerhalb der Simulationsgeometrie liegt.

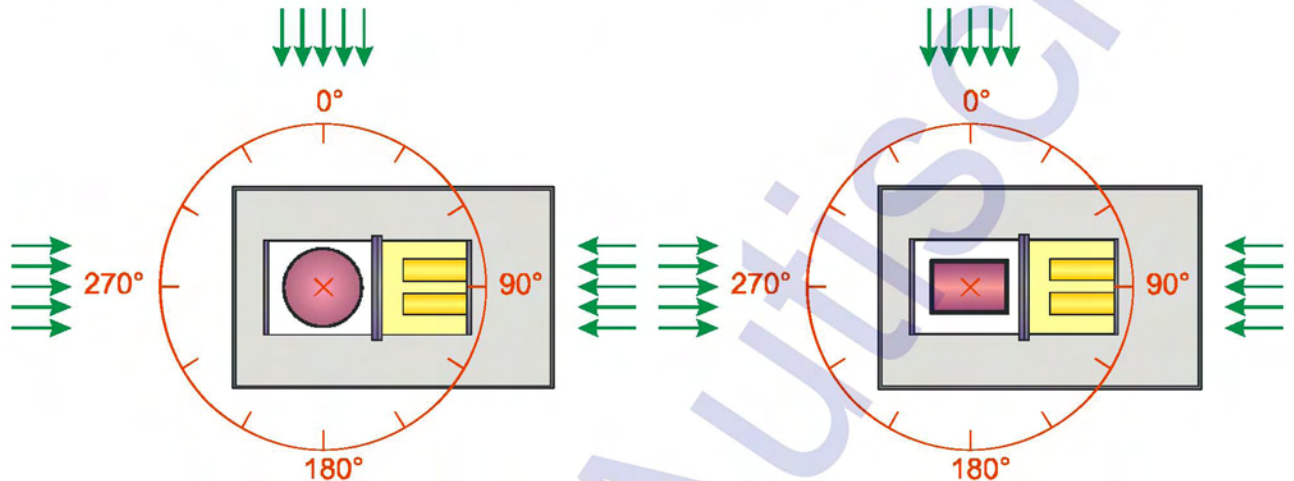


Abbildung 7-6: Definition der Einfallswinkel für den HAWK-TEPC.

Abbildung 7-7: Definition der Einfallswinkel für den HAWK-SEPC.

Für die Simulation von Liulin wurde die Quellenebene in der Größe von 3 cm mal 3 cm gewählt. Der Abstand von der Quelle zum Detektor wurde mit 8 cm so gewählt, dass für alle möglichen Winkel die Quellebene stets außerhalb der Gerätehülle lag.

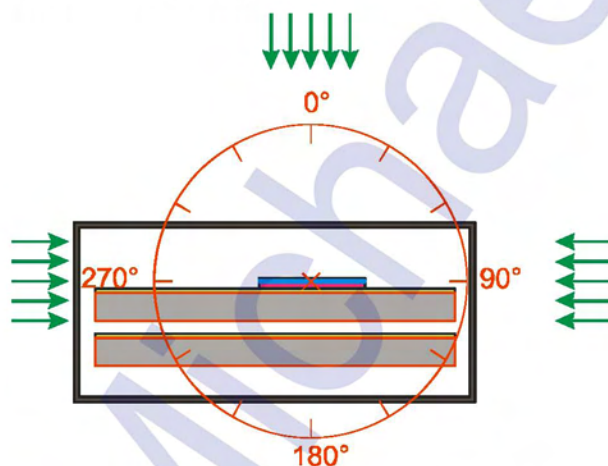


Abbildung 7-8: Definition der Einfallswinkel für das LiuLin A4.

Da die für die Winkelabhängigkeit verwendeten unterschiedlichen Einfallswinkel je nach Lage der Simulationsgeometrien variierten, sind die Einfallsrichtungen in Abbildung 7-6, Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8 dargestellt.

7.3.1.2 Isotrope Quelle

Bei der Gestaltung einer nach innen gerichteten isotropen Quelle war zu beachten, dass der gesamte Raum im Inneren der Quelle gleichmäßig von den Strahlen ausgefüllt wird. Dies wurde verwirklicht, indem als Quelloberfläche eine Kugel gewählt wurde. Von dieser Kugeloberfläche starten nun die Quellteilchen in Richtung des Zentrums, wobei die Richtung zusätzlich noch mit dem Kosinus variiert, sodass ein isotropes Feld innerhalb der Kugel erzeugt wird. Ein schematischer Aufbau einer solchen Quelle ist in Abbildung 7-9 dargestellt.

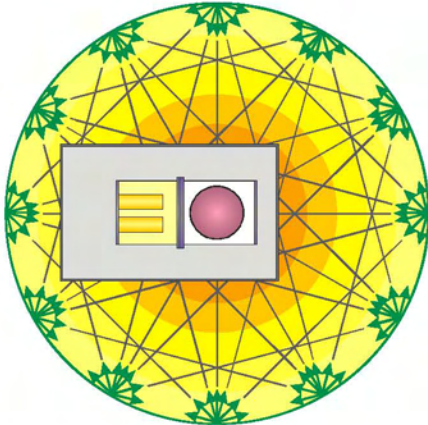


Abbildung 7-9: Schematischer Aufbau der isotropen Quelle [Auti2005].

Der Abstand der Quelloberfläche zum Mittelpunkt des Detektors wurde für die HAWK-TEPC und HAWK-SEPC Geometrien wie auch schon bei den ebenen Quellen mit 40cm modelliert. Bei der LiuLin Geometrie konnte der Abstand aufgrund der geringeren Außenabmessung mit 8cm angenommen werden.

Aufgrund dieser geometrischen Bedingungen musste für einen absoluten Vergleich der Ergebnisse zurückgerechnet werden, wie viele Quellteilchen das jeweilige Detektorvolumen treffen. Diese so genannte Ausbeute für die oben beschriebenen Konstellationen ist in Tabelle 7-2 dargestellt. Die Ausbeute gibt den mittleren Prozentsatz an Startteilchen, die den Detektor treffen, wieder.

Tabelle 7-2: Ausbeute der isotropen Quelle.

Simulationsgeometrie	Quellabstand	Ausbeute
HAWK-TEPC	40 cm	15,69 %
HAWK-SEPC	40 cm	15,07 %
LiuLin	8 cm	26,03 %

Um die Empfindlichkeit der Messgeräte in unterschiedlichen Messumgebungen festzustellen, wurden Simulationen mit Bedingungen, die bei Referenzmessungen herrschen, durchgeführt.

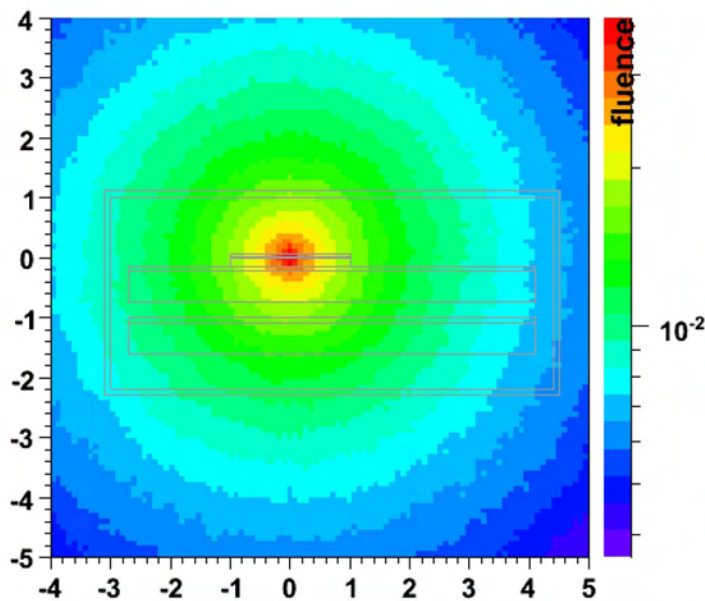


Abbildung 7-10: Fluenzverteilung bei einer isotropen Einstrahlung mit 662keV (^{137}Cs) Photonen für Liulin A4.

7.3.2 Photonen Simulationen

Zur Überprüfung der Simulationsgeometrien wurden anfangs Messungen mit Photonen simuliert. Dabei wurde speziell auf die, im AIT (Austrian Institute of Technology) vorhandenen Photonenquellen in Form von ^{60}Co und ^{137}Cs zurückgegriffen, da diese auch für den späteren Vergleich mit Messungen leicht zugänglich waren. Simulationen mit diesen beiden Quellen ergeben eine aufschlussreiche Auskunft, ob die Simulationsgeometrie der Wirklichkeit entspricht.

7.3.2.1 Allgemein

Vorerst wurden die Simulationen mit Photonen für die Standardeinfallrichtungen der einzelnen Geräte durchgeführt. Dabei wurden für die Simulation die Photonenenergien von 50 keV, 100 keV, 300 keV, 662 keV (^{137}Cs), 1,2 MeV (^{60}Co), 2 MeV und 6,6 MeV verwendet. Die mikrodosimetrischen Spektren dieser Simulationen sind in Abbildung 7-11 bis Abbildung 7-13 für alle drei Simulationsgeometrien dargestellt.



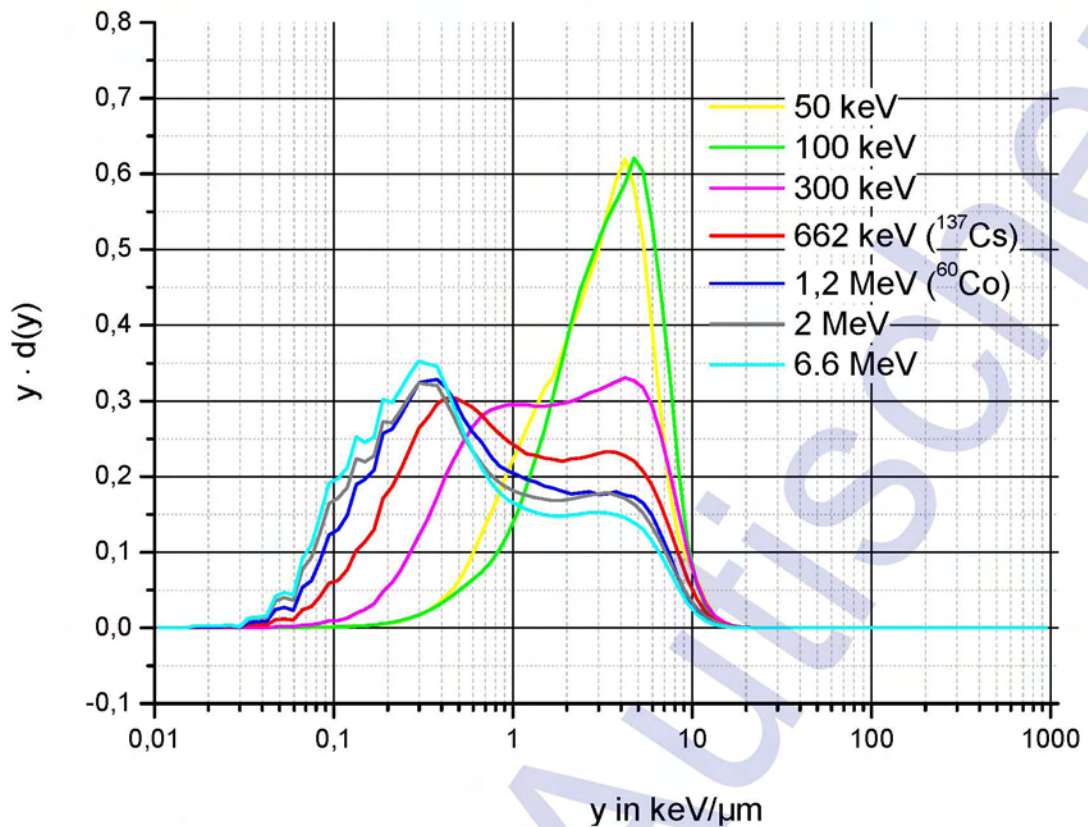


Abbildung 7-11: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) simuliert mit der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 50keV, 100keV, 300keV, 662keV (^{137}Cs), 1,2 MeV (^{60}Co), 2MeV und 6,6MeV.

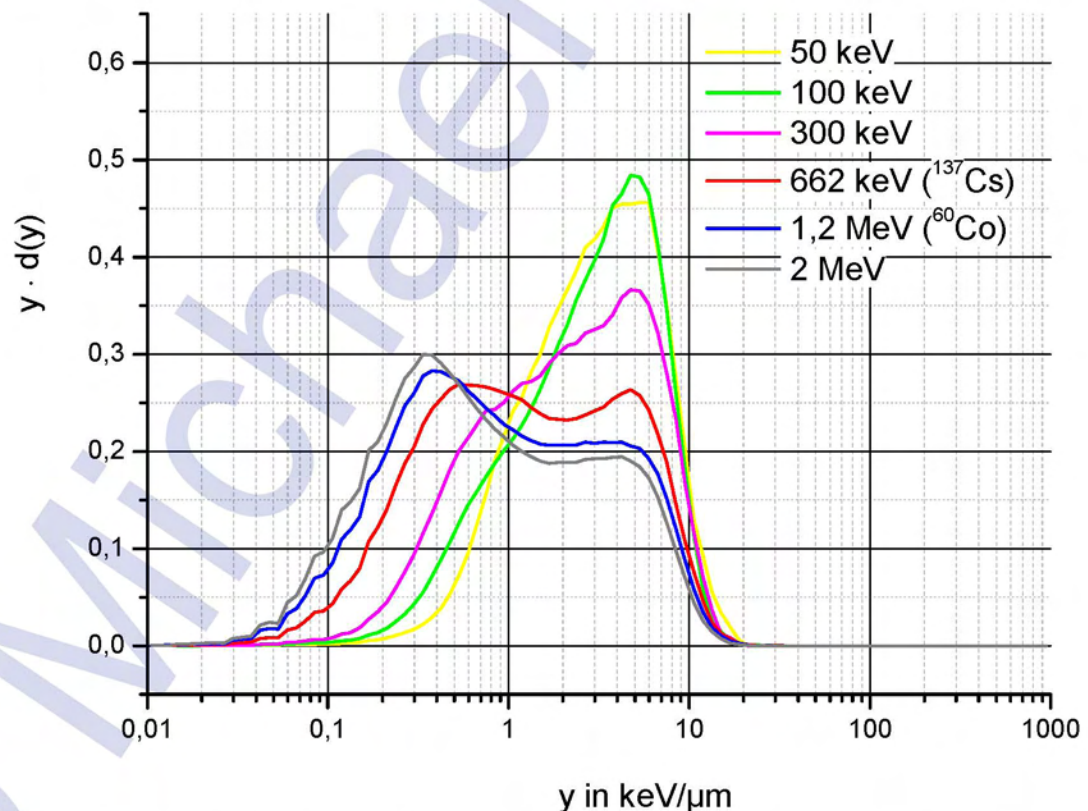


Abbildung 7-12: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) simuliert mit der HAWK-SEPC Geometrie bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 50keV, 100keV, 300keV, 662keV (^{137}Cs), 1,2 MeV (^{60}Co) und 2MeV.

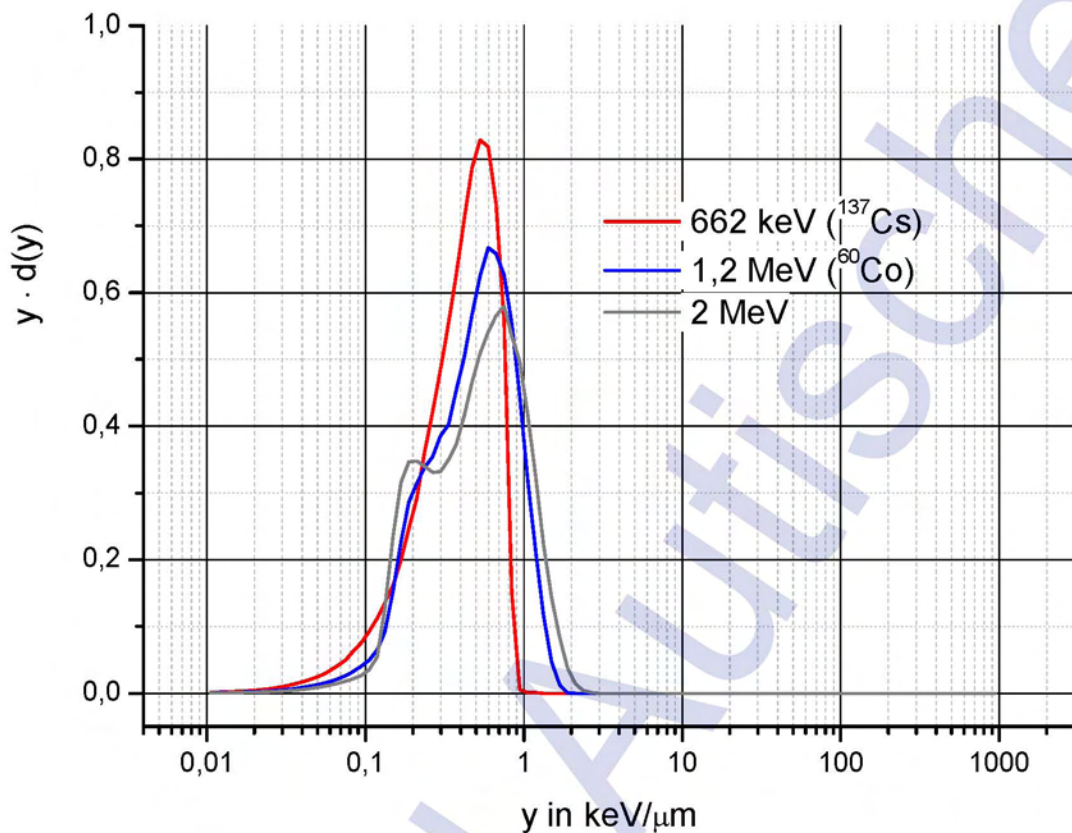


Abbildung 7-13: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) simuliert mit der LiuLin Geometrie bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 662keV (^{137}Cs), 1,2 MeV (^{60}Co) und 2MeV.

Bei allen Simulationsgeometrien ist eine ähnliche Verschiebung der Spektren zu niedrigerem LET bei höheren Einstrahlungsenergien zu erkennen. Ein direkter Vergleich der drei Simulationsgeometrien ist in Abbildung 7-14 für ^{60}Co und in Abbildung 7-15 für ^{137}Cs dargestellt. Die Abbildungen zeigen, dass die LET-Spektren der drei Geräte in derselben Größenordnung sind. Vergleicht man die Spektren vom HAWK-TEPC und HAWK-SEPC so kann nur ein sehr geringer Unterschied festgestellt werden. Die Ähnlichkeit kommt daher, dass bei beiden Geräten dasselbe Messgas verwendet wird und auch die MCL für beide Geräte ähnlich ist. LiuLin unterscheidet sich deutlich von den beiden anderen. Diese Unterschiede sind auf zwei Punkte zurückzuführen. Einerseits besteht der Detektor des LiuLin aus reinem Silizium, zum Anderen ist die geometrische Ausdehnung des LiuLin-Detektors zwar kleiner im Vergleich zu HAWK-TEPC und HAWK-SEPC, aber durch die bedeutend höhere Dichte wird im LiuLin mehr Material durchstrahlt als in den beiden Hohlraumdetektoren des HAWK-TEPC oder HAWK-SEPC. Diese Eigenschaft spiegelt sich auch in der MCL der Geräte wieder, während HAWK-TEPC und HAWK-SEPC eine MCL von ca. $1,5\mu\text{m}$ besitzen, beträgt diese bei dem LiuLin $576\mu\text{m}$. Eine Gegenüberstellung der MCLs der Geräte ist in Tabelle 7-3 dargestellt.

Tabelle 7-3: Vergleich der MCLs der verwendeten Geräte.

Gerät	MCL	Verhältnis der LiuLin MCL zu Geräte MCL
HAWK-TEPC	1,44 μm	398,75
HAWK-SEPC	1,63 μm	352,27
LiuLin	574,2 μm	1

Wie die Tabelle 7-3 zeigt, ergeben sich für die einzelnen Geräte sehr große Unterschiede der MCL. Dieser Unterschiede in der MCL der einzelnen Geräte ergeben auch eine Veränderung der normierten mikrodosimetrischen Spektren. In Abbildung 7-14 sind die normierten mikrodosimetrischen Spektren bei Bestrahlung mit Photonen einer Energie von 1,2 MeV (^{60}Co) für alle drei Simulationsgeometrien dargestellt. Auffallend ist der Unterschied in der Form der Spektren, speziell von LiuLin und den beiden HAWK Geräten. Die mittlere Lage bezogen auf die X-Achse, also der Linealen Energie, bleibt aber erhalten, da die MCL in der Berechnung des mikrodosimetrischen Spektrums miteingeht.

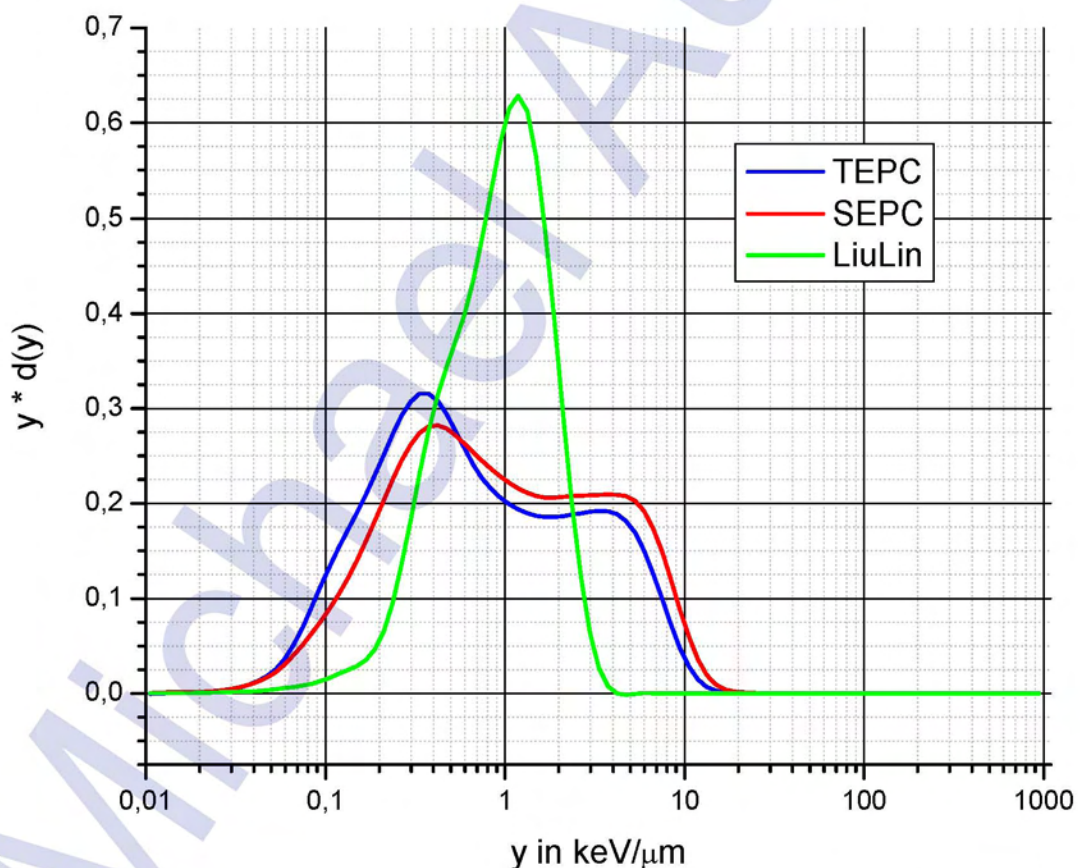


Abbildung 7-14: Vergleich der simulierten normierten mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot d(y)$ der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung von Photonen mit der Energie von 1,2 MeV (^{60}Co).

Abbildung 7-15 zeigt die simulierten mikrodosimetrischen Spektren bei Bestrahlung mit Photonen einer Energie von 662 keV (^{137}Cs) für alle drei Simulationsgeometrien. Wiederum fällt die Änderung der Form des Spektrums am stärksten ins Auge.

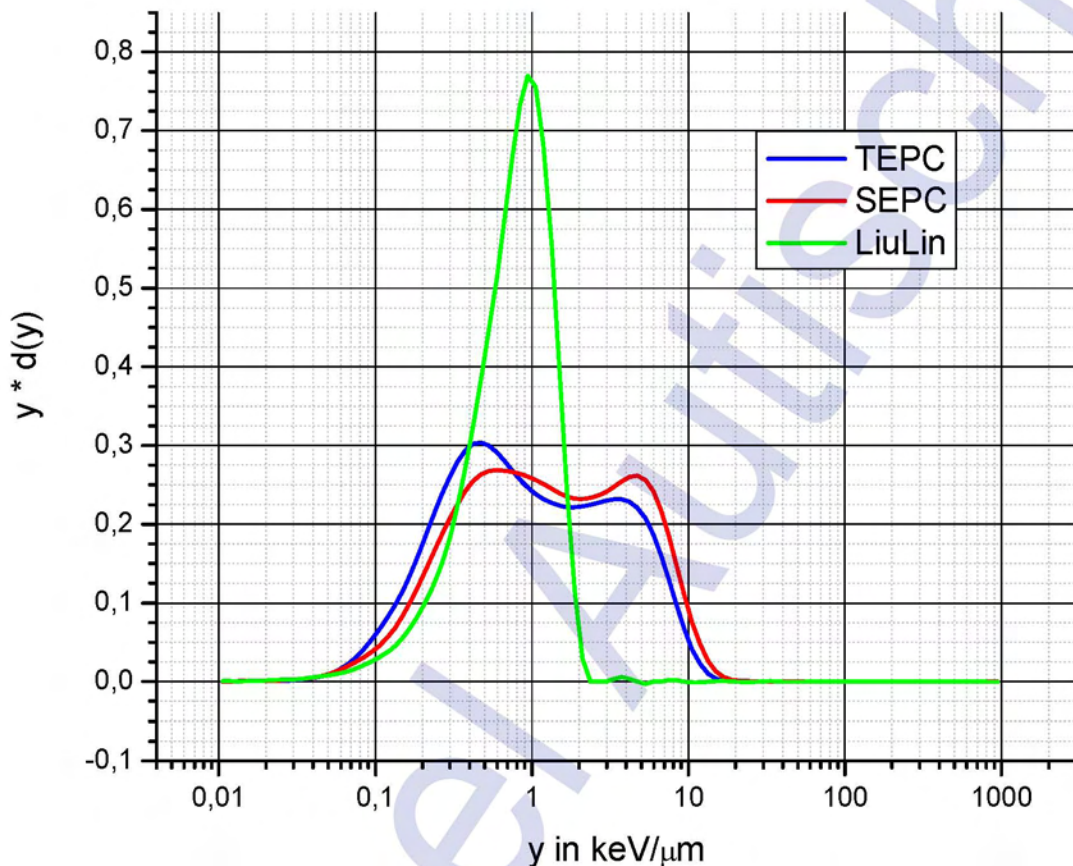


Abbildung 7-15: Vergleich der simulierten normierten mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot d(y)$ der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung von Photonen mit der Energie von 662 keV (^{137}Cs).

Um den Übergang von einer Geometrie mit einer großen MCL zu einer kleinen MCL wiederzugeben, wurden Simulationen mit Siliziumplättchen unterschiedlicher Dicke durchgeführt. Zum Vergleich der Simulationen wurden die Spektren der Energieabsorption innerhalb des Plättchens betrachtet. Diese Spektren sind für die oben angeführte Simulation mit ^{60}Co für die HAWK-SEPC Geometrie und die LiuLin Geometrie in Abbildung 7-16 dargestellt.

Diese Spektren zeigen Unterschiede der einzelnen Detektorgeometrien noch deutlicher. Gut erkennbar ist in dieser Abbildung, dass LiuLin durch die sehr viel höhere Dichte des Detektors auch höhere Energien absorbieren kann. Eine Absorption der einfallenden Energie ist bis in den Bereich der Quellenergie für ^{60}Co möglich, während das Messgas im HAWK-SEPC nur maximal ca. 20keV zu absorbieren vermag, wie aus Abbildung 7-16 erkennbar ist.

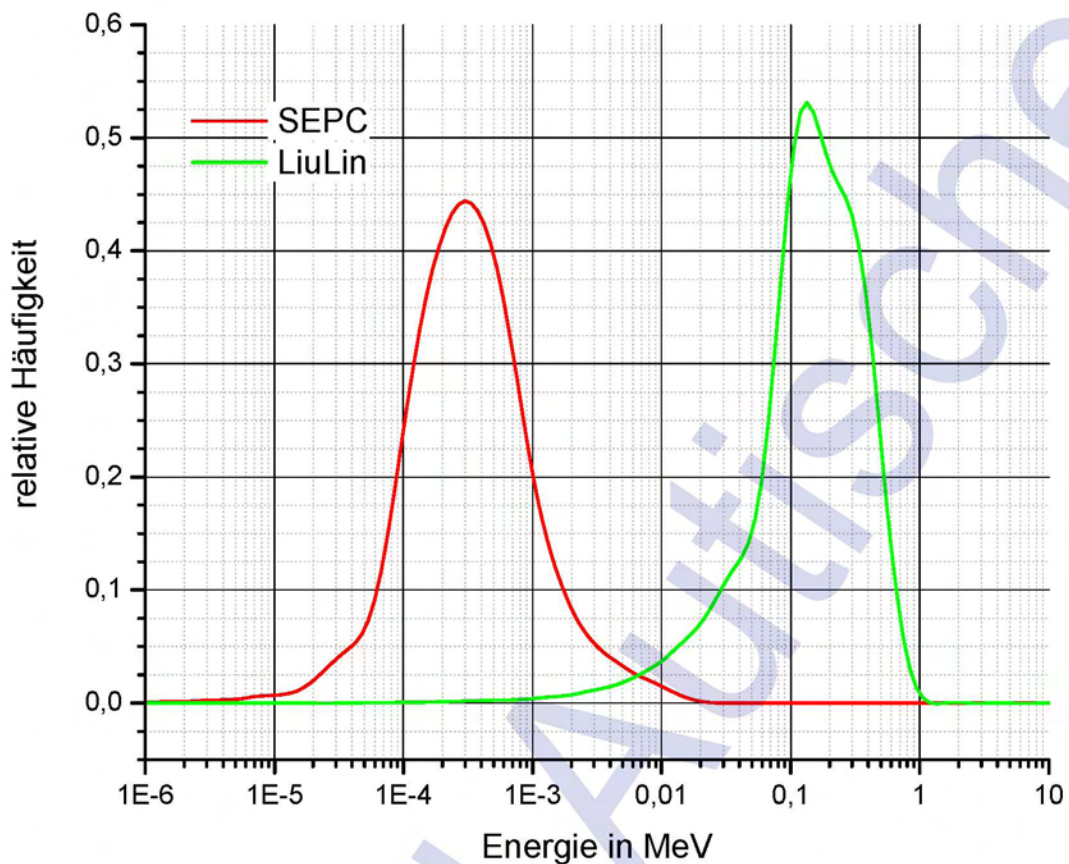


Abbildung 7-16: Simulierte absorbierte Energiespektren von HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung von Photonen mit der Energie von 1,2 MeV (^{60}Co).

In Abbildung 7-17 sind die Energieabsorptionsspektren von Siliziumplättchen unterschiedlicher Dicke dargestellt. Die für die Simulation verwendeten Dicken sind $2\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, und $300\mu\text{m}$. Dabei entsprechen $2\mu\text{m}$ ungefähr der MCL vom HAWK-SEPC und die $300\mu\text{m}$ der MCL von LiuLin bei Bestrahlung aus 0° . Zusätzlich sind auch noch die Ergebnisse der realen Simulationsgeometrien des HAWK-SEPC (MCL= $1,63\mu\text{m}$) und des LiuLin bei isotroper Einstrahlung (MCL= $574\mu\text{m}$) eingezeichnet. In der Abbildung ist der Übergang der beiden unterschiedlichen Simulationsgeometrien deutlich erkennbar. Da in diesen Simulationen die anderen Materialien in den Messgeräten vernachlässigt wurden und die Simulation auf das Wesentliche reduziert wurde, ist die Form der Spektren nicht ganz ident mit denen der gesamten Messinstrumente.

Abbildung 7-18 zeigt die simulierten normierten mikrodosimetrischen Spektren der unterschiedlichen Siliziumplättchen. Wiederum sind auch die Spektren der realen Simulationsgeometrien des HAWK-SEPC und des LiuLin eingetragen. Auch hier ist die Veränderung des mikrodosimetrischen Spektrums durch die MCL gut ersichtlic.

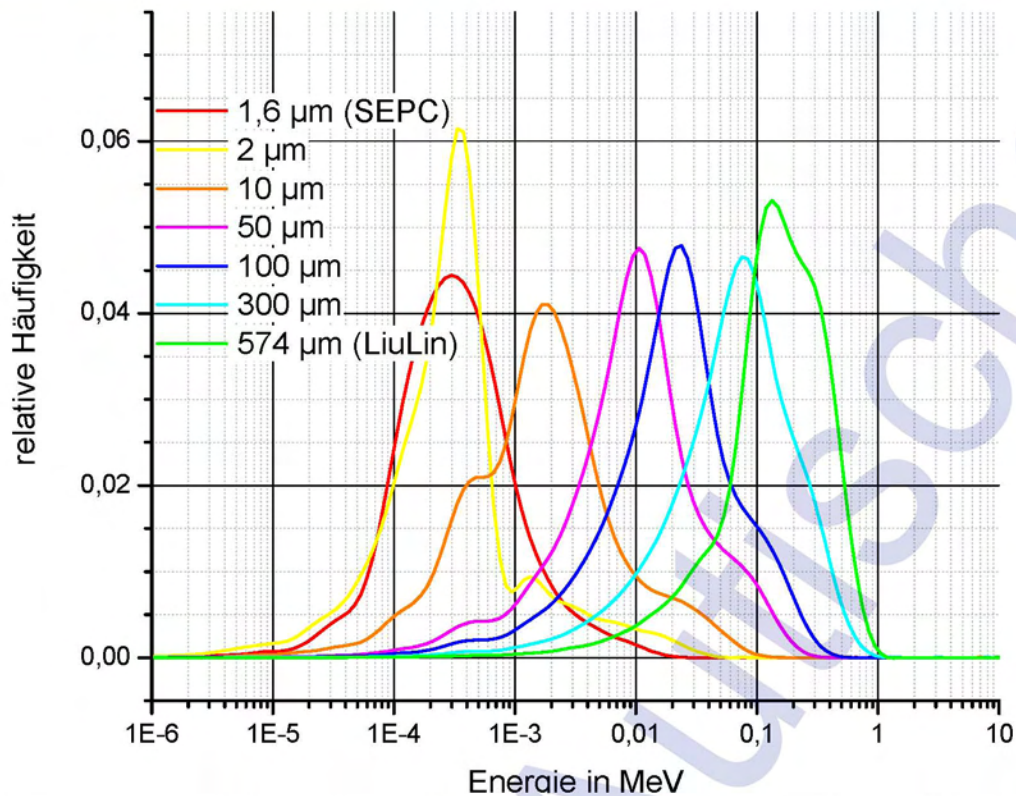


Abbildung 7-17: Simulierte absorbierte Energiespektren von Siliziumplättchen der Dicke von $2\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, und $100\mu\text{m}$ und $300\mu\text{m}$ bei Bestrahlung mit einer ^{60}Co Quelle. Als Vergleich sind auch die Energiespektren der realen Simulationsgeometrie von HAWK-SEPC ($1,63\mu\text{m}$) und LiuLin ($574\mu\text{m}$) eingetragen.

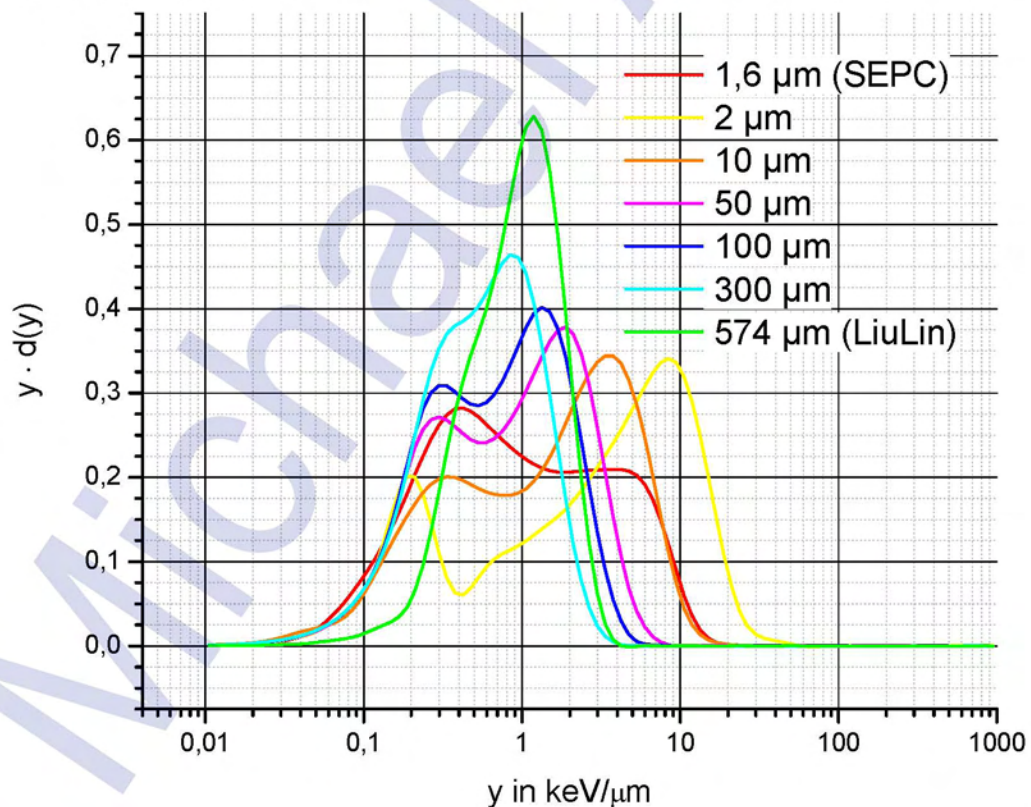


Abbildung 7-18: Normierte mikrodosimetrische Spektren von Siliziumplättchen der Dicke von $2\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, und $100\mu\text{m}$ und $300\mu\text{m}$ bei Bestrahlung mit einer ^{60}Co Quelle. Als Vergleich sind auch die mikrodosimetrische Spektren der realen Simulationsgeometrie von HAWK-SEPC ($1,63\mu\text{m}$) und LiuLin ($574\mu\text{m}$) eingetragen.

7.3.2.2 Winkelabhängigkeit

Mit dem Werkzeug Simulation konnte man diesbezüglich auch noch weitere Eigenschaften, wie die Winkelabhängigkeit der Geräte simulieren, die messtechnisch nur mit einem großen Zeit- und Messaufwand möglich wären. Die Simulationsgeometrien wurden in 90° Schritten auf ihre Winkelabhängigkeit überprüft. Dabei wurden die Startteilchen von jeweils unterschiedlichen Startpositionen aus auf die bestehenden Geometrien gesendet. Die Definitionen für die Einfallrichtungen sind für den HAWK-TEPC in Abbildung 7-6 und für den HAWK-SEPC in Abbildung 7-7 dargestellt. Für die Simulationsgeometrie von LiuLin sind die definierten Einfallrichtungen in der Abbildung 7-8 beschrieben.

Die Ergebnisse der Simulationen der Winkelabhängigkeit für die Simulationsgeometrie des HAWK-TEPCs bei Bestrahlung mit Photonen der Energien von 662keV (^{137}Cs) und $1,2\text{MeV}$ (^{60}Co) sind in Abbildung 7-19 abgebildet. Dabei zeigen sich eine starke abschirmende Wirkung bei 90° und eine etwas schwächere Abschirmung bei 270° .

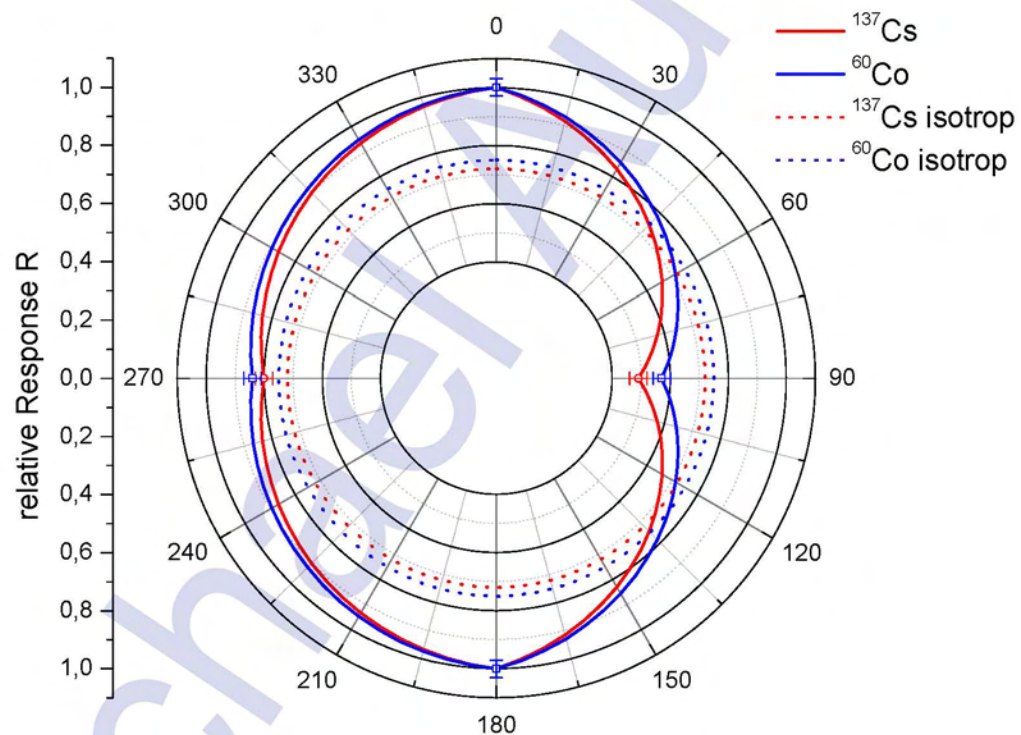


Abbildung 7-19: Simulierte relative Response R der Winkelabhängigkeit für die HAWK-TEPC Geometrie bei ^{60}Co und ^{137}Cs .

Die Abschirmung bei 90° ergibt sich dadurch, dass in diesem Fall die Photonen den gesamten Teil der Auswerteelektronik im Gerät durchqueren müssen, bevor sie auf den Detektor treffen. Die Abschirmung ist in dem Fall auch noch abhängig von der Energie der Photonen. Höherenergetische Photonen wie jene von ^{60}Co werden weniger abgeschirmt als jene von niederenergetischen Photonen wie ^{137}Cs . Im Falle von ^{137}Cs ergibt sich eine Abschirmung von mehr als 50% bei dieser Einfallrichtung von 90° .

Bei der Einstrahlungsrichtung von 270° wird die sich ergebende abschirmende Wirkung durch eine 6,35 mm dicke Stahlabschlussplatte hervorgerufen. Auch in diesem Fall werden wiederum höherenergetische Photonen weniger geschwächt als niederenergetische Photonen.

Weiters wurde mit den Daten der Winkelabhängigkeit auch die Einstrahlung mit einer isotropen Quelle simuliert. Dadurch ergaben sich Abschirmeffekte im Bereich von 70% – 80%. Wie schon bei der Winkelabhängigkeit ist auch hier die Abschirmung für niedrigere Photonenenergien größer als für hohe Energien. Die exakten Werte dieser Untersuchung sind in Tabelle 7-4 nachzulesen.

Tabelle 7-4: Relative Response R des HAWK-TEPC bei isotroper Einstrahlung für Photonen.

Teilchen	Energie	Response R	Unsicherheit
Photonen (^{137}Cs)	662 keV	72 %	1 %
Photonen (^{60}Co)	1.25 MeV	75 %	1 %

Zur detaillierteren Untersuchung der unterschiedlichen Wirkung von einer Einstrahlung von 0° und einer isotropen Einstrahlung wurde der energieabhängige Photonen- und Elektronenfluss innerhalb des Messgases ausgewertet. Diese Ergebnisse für eine ^{137}Cs Quelle sind in Abbildung 7-20 und Abbildung 7-21 dargestellt.

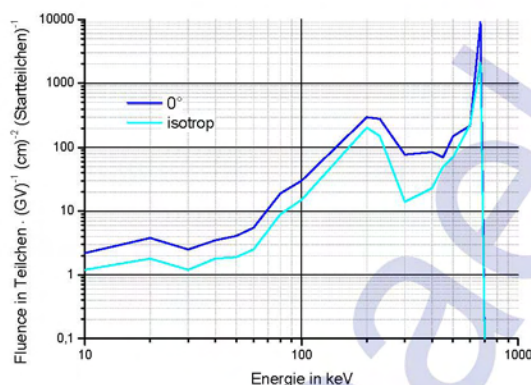


Abbildung 7-20: Photonenfluss pro Quellteilchen innerhalb des HAWK-TEPC Messgases für ^{137}Cs in Abhängigkeit der Energie. Vergleich von isotroper und 0° Einstrahlung.

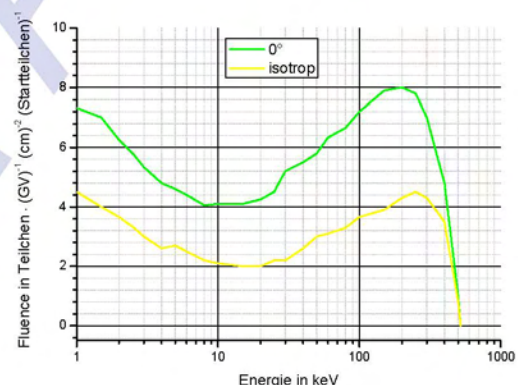


Abbildung 7-21: Elektronenfluss pro Quellteilchen innerhalb des HAWK-TEPC Messgases für ^{137}Cs in Abhängigkeit der Energie. Vergleich von isotroper und 0° Einstrahlung.

Aus diesen Abbildungen ist ersichtlich, dass sich die Fluenz der Photonen deutlich unterhalb der Quellenergie ändert, jedoch der Peak und somit der Gesamtfluss nur unwesentlich geringer ist. Der Elektronenfluss zeigt hingegen bei einer isotropen Einstrahlung eine Verringerung von 50% über den nahezu gesamten Energiebereich. Die Form des mikrodosimetrischen Spektrums ändert sich zwischen der Einstrahlung bei 0° und einer isotropen Einstrahlung nur geringfügig. Ein Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren ist in Abbildung 7-22 für eine Photonenenergie von 300keV, in Abbildung 7-23 für eine Photonenenergie von 662keV (^{137}Cs), in Abbildung 7-24 für eine Photonenenergie von 1,2MeV (^{60}Co) und in Abbildung 7-25 für eine Photonenenergie von 2MeV dargestellt.

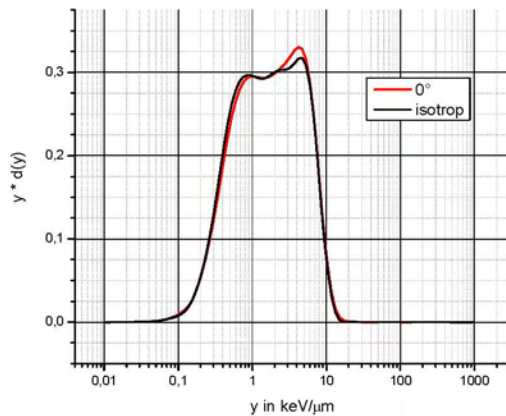


Abbildung 7-22: Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 300 keV. Vergleich von isotroper und 0° .

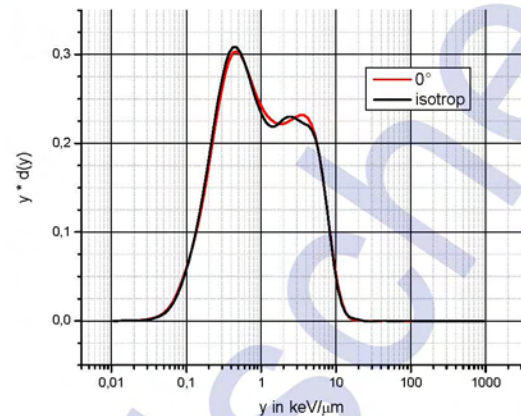


Abbildung 7-23: Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 662 keV (^{137}Cs). Vergleich von isotroper und 0° .

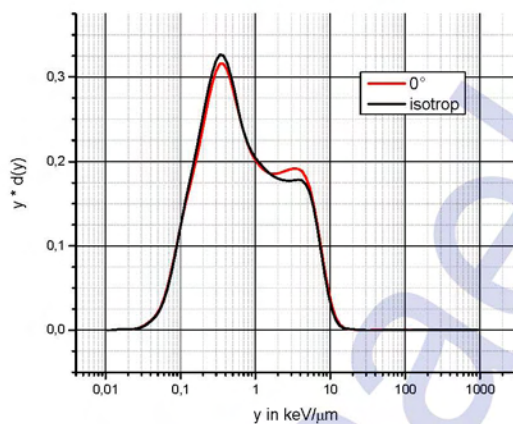


Abbildung 7-24: Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 1,2 MeV (^{60}Co). Vergleich von isotroper und 0° .

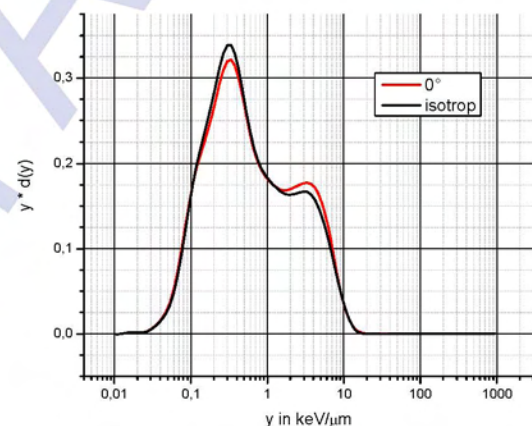


Abbildung 7-25: Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 2 MeV. Vergleich von isotroper und 0° Einstrahlung.

Die Winkelabhängigkeit wurde ebenfalls für die Simulationsgeometrie des HAWK-SEPC bestimmt. Da dieses Gerät bis auf den Detektor baugleich mit dem HAWK-TEPC ist, ist es wenig verwunderlich, dass die Winkelabhängigkeit zum Verwechseln ähnlich ausfällt. Dargestellt ist diese Winkelabhängigkeit des HAWK-SEPC Gerätes in Abbildung 7-26.

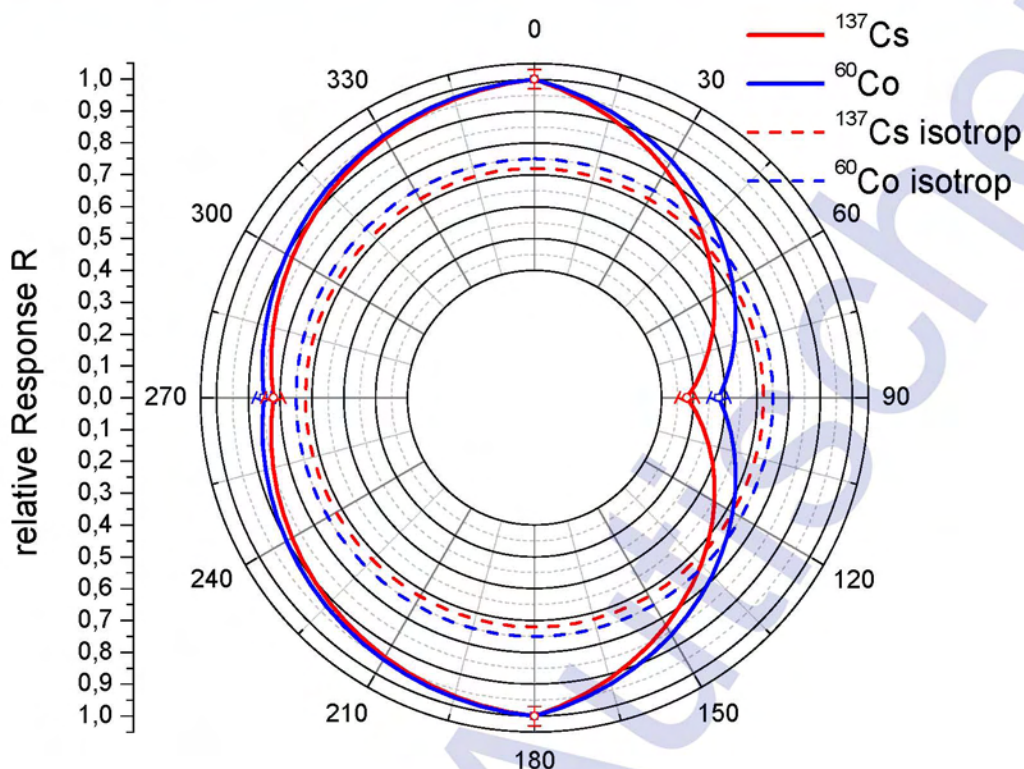


Abbildung 7-26: Simulierte relative Response der Winkelabhängigkeit für die HAWK-SEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit den Energien von 662 keV (^{137}Cs) und 1,2 MeV (^{60}Co).

Wiederum ergibt sich die starke Abschirmung bei 90° aufgrund der durchstrahlten Messelektronik und bei 270° aufgrund der Seitenabschlussplatte. Auch die Energieabhängigkeit dieser Abschirmungen ist vergleichbar mit der des HAWK-TEPCs. In Tabelle 7-5 ist dies dargestellt.

Tabelle 7-5: Relative Response R der Äquivalentdosisleistung der HAWK-SEPC Simulationsgeometrie bei isotroper Einstrahlung für Photonen.

Teilchen	Energie	Response R	Unsicherheit
Photonen (^{137}Cs)	662 keV	72 %	1 %
Photonen (^{60}Co)	1.2 MeV	75 %	1 %

Auch für das Gerät LiuLin wurde die Winkelabhängigkeit mittels Simulation bestimmt. Dieses Ergebnis ist in Abbildung 7-27 dargestellt. Aufgetragen ist in der Abbildung die relative Veränderung der Energiedeposition im Silizium in Abhängigkeit der Einstrahlrichtung, bezogen auf eine Einstrahlung aus der 0° Position.

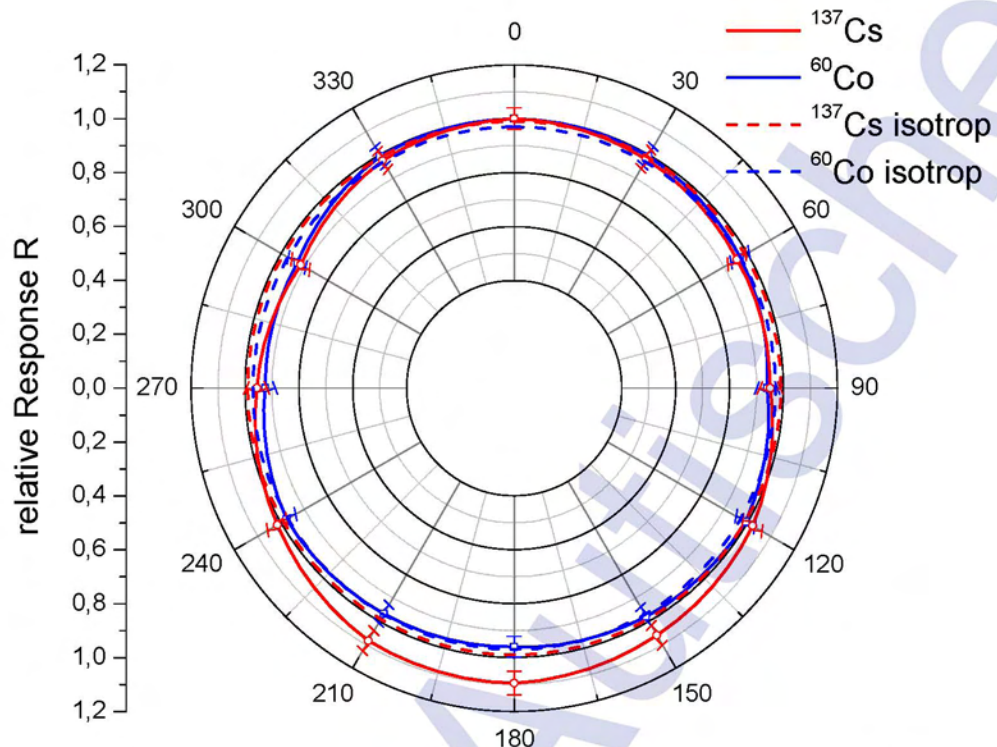


Abbildung 7-27: Simulierte relative Response R der Winkelabhängigkeit für die LiuLin Geometrie bei ^{60}Co und ^{137}Cs .

Beim LiuLin A4 Messgerät ergibt sich keine nennenswerte Änderung der Empfindlichkeit mit dem Einstrahlungswinkel. Weder bei 90° noch bei 270° ist die Abschirmung signifikant. Auch die Abschirmungen bei isotroper Einstrahlung fällt sehr gering aus und ist in Tabelle 7-5 dargestellt.

Tabelle 7-6: Relative Response R der Äquivalentdosisleistung bei der LiuLin Simulationsgeometrie bei isotroper Einstrahlung für Photonen unterschiedlicher Energien.

Energie...	Energie der Teilchen		
Teilchen	Energie	Response R	Unsicherheit
Photonen (^{137}Cs)	662 keV	99 %	2 %
Photonen (^{60}Co)	1.2 MeV	97 %	2 %

7.3.3 Neutronen Simulationen

7.3.3.1 Allgemein

Ebenso wie mit den Photonenquellen, wurden auch mit Neutronen Simulationen durchgeführt. Hierbei wurden die Neutronenenergien wiederum so gewählt, dass die Simulationen mit den bereits vorhandenen Messungen verglichen werden konnten. Somit kamen als Quellenergien vorrangig 1,2MeV, 5MeV, 61MeV, 100MeV und 200MeV in Frage. Eine Auswahl der mikrodosimetrischen Spektren dieser Simulationen sind in Abbildung 7-28 bis Abbildung 7-30 für die unterschiedlichen Simulationsgeometrien dargestellt.

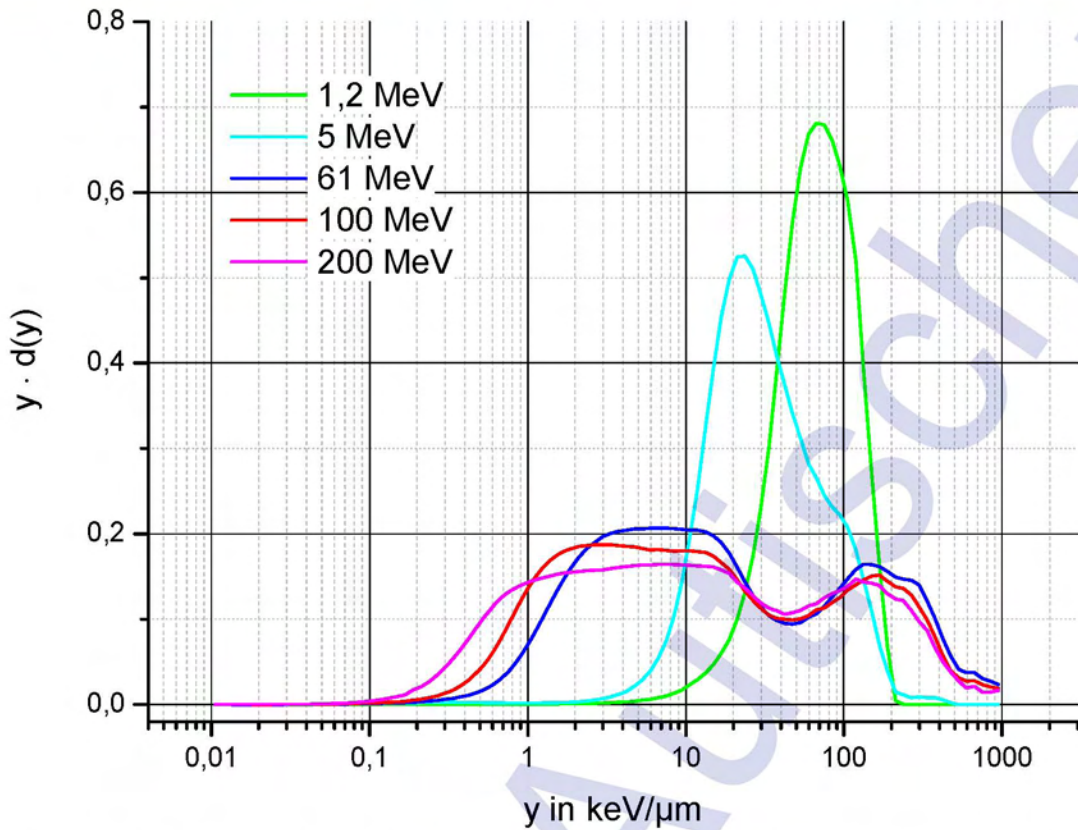


Abbildung 7-28: Simulierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie für unterschiedliche Neutronenenergien: 1,2 MeV, 5 MeV, 61 MeV, 100 MeV und 200 MeV.

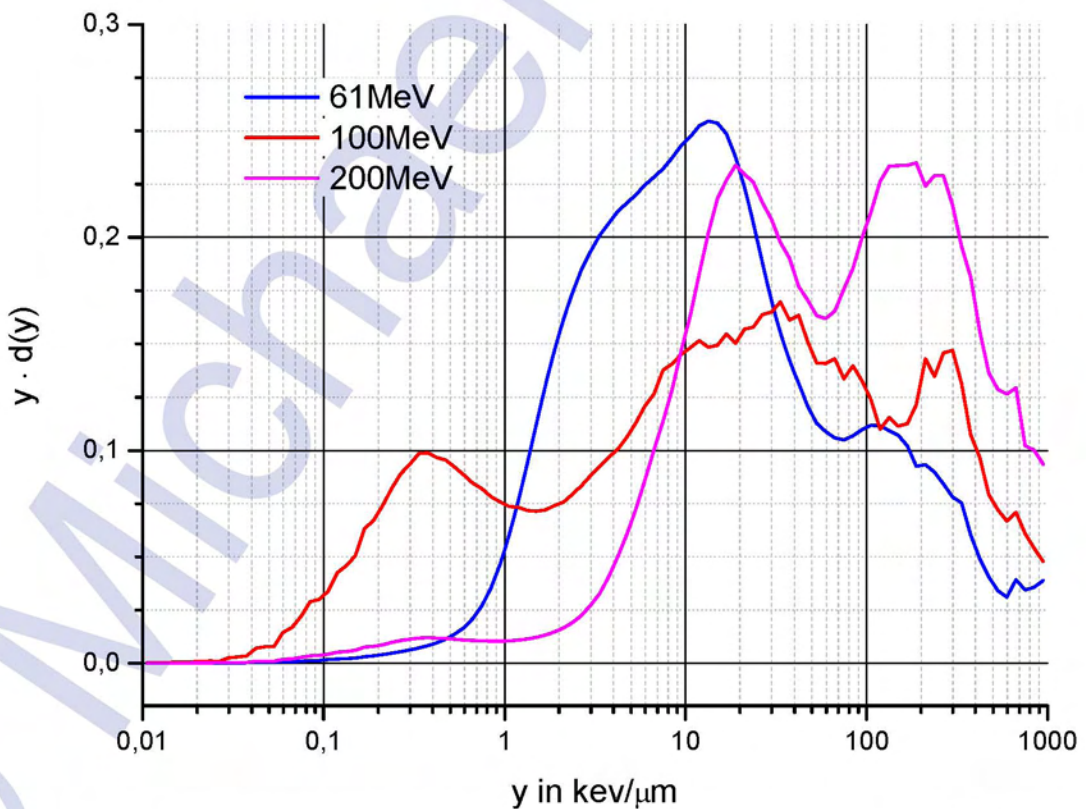


Abbildung 7-29: Simulierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der HAWK-SEPC Geometrie für unterschiedliche Neutronenenergien: 61 MeV, 100 MeV und 200 MeV.

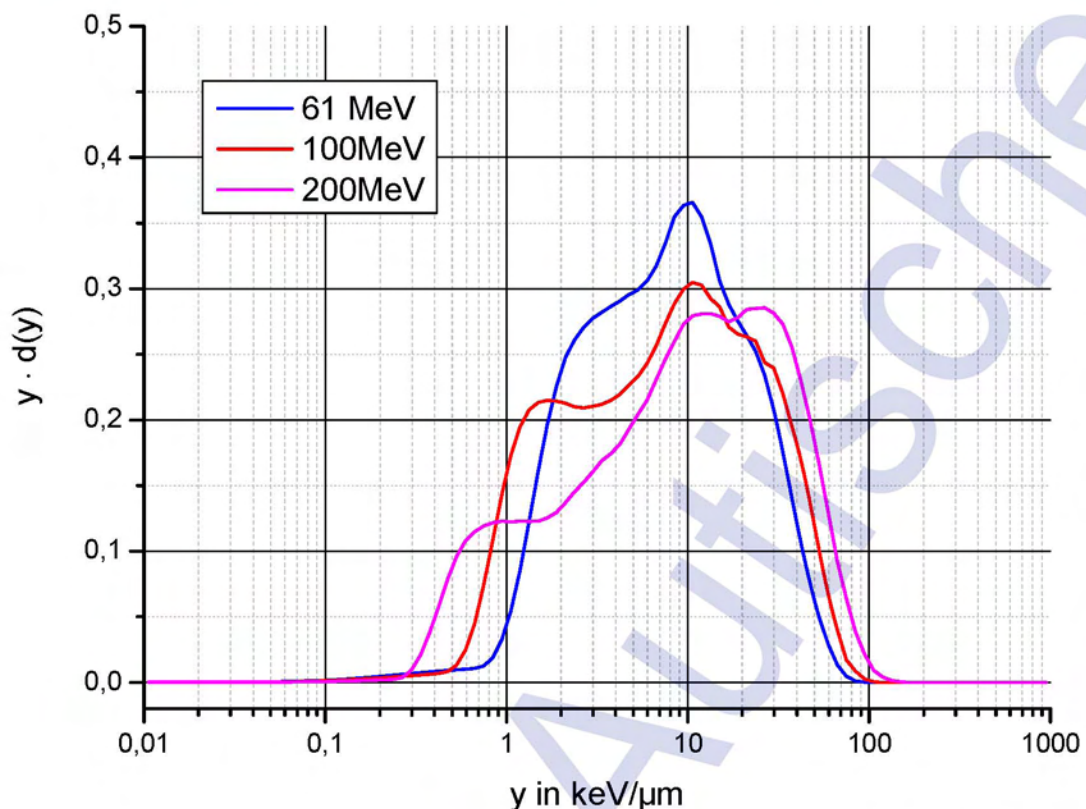


Abbildung 7-30: Simulierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der LiuLin Geometrie für unterschiedliche Neutronenenergien: 61 MeV, 100 MeV und 200 MeV.

Im folgenden werden nun die unterschiedlichen mikrodosimetrischen Spektren der einzelnen Simulationsgeometrien untereinander verglichen. Abbildung 7-31 zeigt den Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren $y d(y)$ für die drei Simulationsgeometrien (HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin) bei einer Bestrahlung mit Neutronen einer Energie von 61 MeV. Am deutlichsten fällt dabei auf, dass LiuLin im Bereich über 100 keV/μm keine Werte liefert. Dieser Umstand rechtfertigt auch, dass im realen Messgerät in diesem Bereich keine Daten aufgezeichnet werden.

In Abbildung 7-32 ist wiederum ein Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren $y d(y)$ für die drei Simulationsgeometrien (HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin) gezeigt. Die Neutronenenergie ist bei diesem Vergleich mit 100 MeV gewählt.

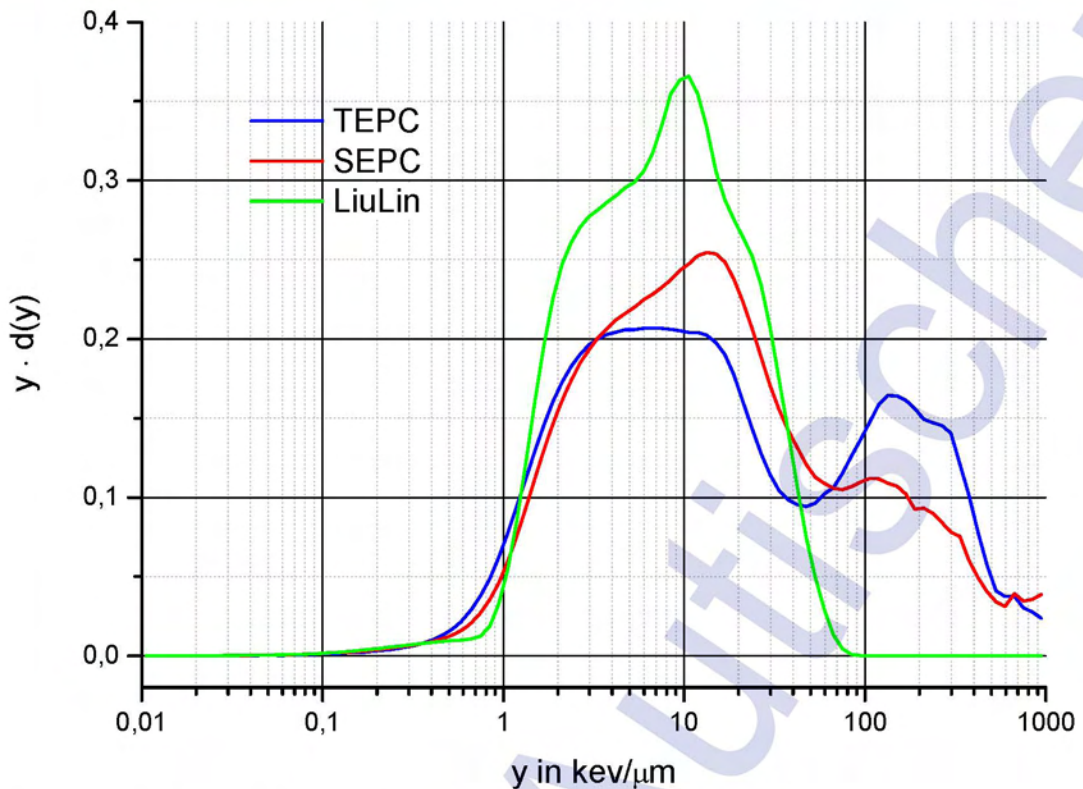


Abbildung 7-31: Vergleich der mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot d(y)$ der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung mit Neutronen von 61 MeV.

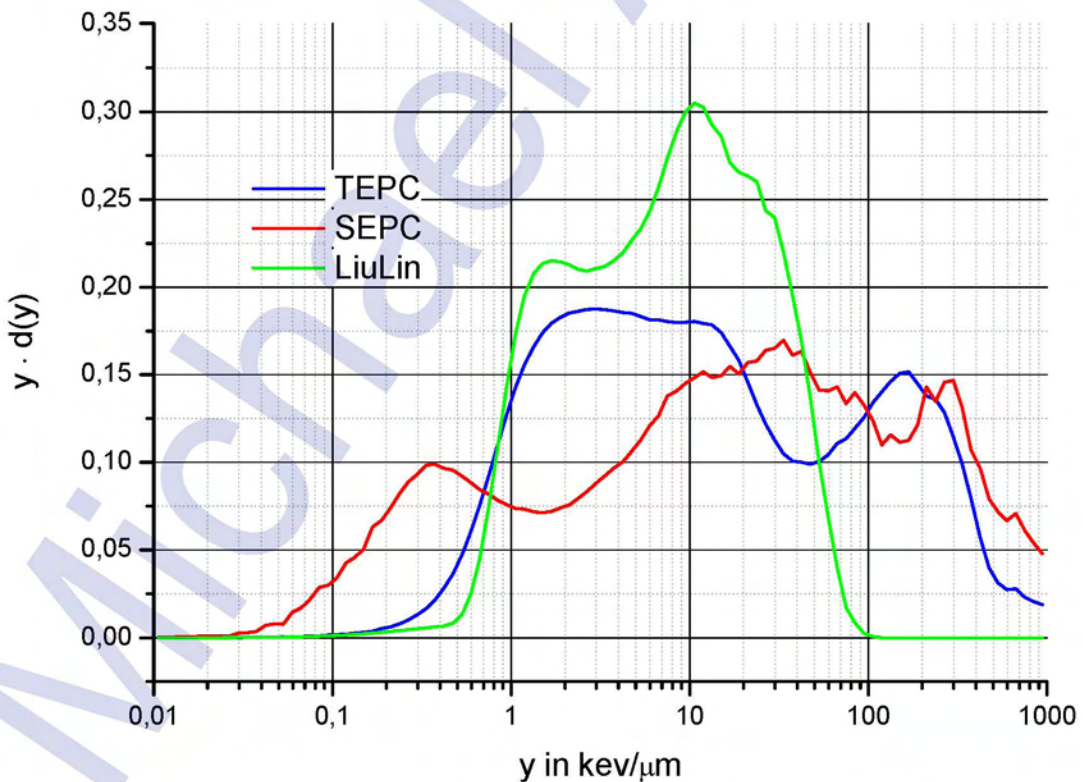


Abbildung 7-32: Vergleich der mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot d(y)$ der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung mit Neutronen von 100 MeV.

7.3.3.2 Winkelabhängigkeit und isotrope Einstrahlung

Wie schon für die Photonenquellen, wurde auch für Neutronenquellen die Winkelabhängigkeit der drei Messgeräte simuliert.

Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigen teilweise eine starke Abhängigkeit mit der Energie der Neutronen. In Tabelle 7-7 bis Tabelle 7-9 ist die relative Response, bezogen auf die 0° Einfallsrichtung, eingetragen.

HAWK-TEPC

Die Ergebnisse der simulatorischen Untersuchung der Winkelabhängigkeit ist in Abbildung 7-33 dargestellt. In der Abbildung ist die Energiedeposition beim gewählten Einstrahlwinkel relativ zur Energiedeposition bei einer Einstrahlung von 0° dargestellt.

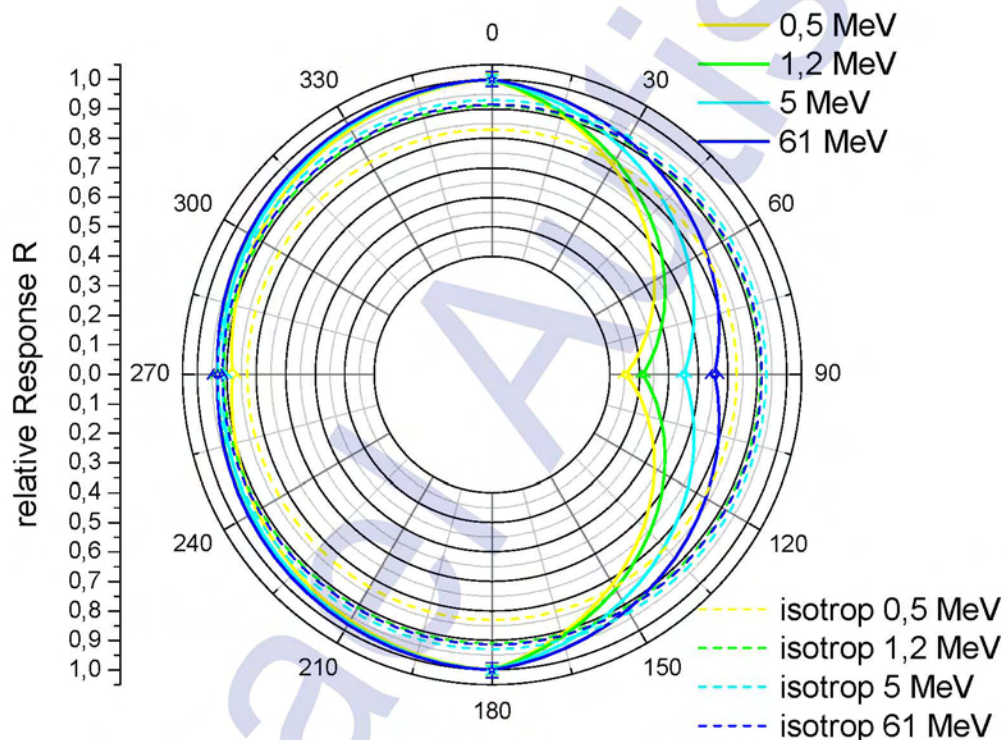


Abbildung 7-33: Relative Response der simulierten HAWK-TEPC Simulationsgeometrie in Abhängigkeit des Einfallswinkels für unterschiedliche Neutronenenergien. Zusätzlich ist die Response für die jeweiligen Neutronenenergien von 0,5 MeV, 1,2 MeV, 5 MeV und 61 MeV bei isotroper Einstrahlung eingetragen.

Für niedrige Neutronenenergien ergeben sich für den HAWK-TEPC ähnliche Abschwächungen für eine Bestrahlung aus 90°, wie schon bei Photonen. Mit höherwerdender Energie der Neutronen nimmt die Abschwächung wiederum ab. Dabei ergeben sich Abschwächungen bei 90° von bis zu 65% und bei 270° von bis zu 13%. Ein Vergleich mit einer isotropen Darstellung ist ebenfalls in der Abbildung gezeigt. Diese zeigt ebenfalls eine Energieabhängigkeit, jedoch das Maximum der Abschirmung bei der niedrigsten simulierten Neutronenenergie von 0,5MeV beträgt 17%. Die exakten Werte dieses Vergleichs sind in Tabelle 7-7 dargestellt.

Tabelle 7-7: Relative Response R der Äquivalentdosisleistung des HAWK-TEPC bei isotroper Einstrahlung für Neutronen mit unterschiedlichen Energien.

Energie...	Energie der Teilchen	Teilchen	Energie	Response R	Unsicherheit
		Neutronen	0.5 MeV	83 %	2.3 %
		Neutronen	1.2 MeV	91 %	1.4 %
		Neutronen	5 MeV	93 %	1.6 %
		Neutronen	61 MeV	91 %	2.7 %

Für Neutronenenergien über 1,2 MeV scheinen sich die relativen Abschirmungen des Gerätes innerhalb der Unsicherheiten im Bereich von 8% einzupendeln.

HAWK-SEPC

Für die Simulationsgeometrie des HAWK-SEPC wurde ebenfalls die Winkelabhängigkeit bei Einstrahlung von Neutronen unterschiedlicher Energien bestimmt. Abbildung 7-34 zeigt die erhaltene Winkelabhängigkeit für Neutronen mit 5MeV und 61MeV. Zusätzlich wurde zum Vergleich auch die Response für die isotrope Einstrahlung derselben Neutronenenergien in Abbildung 7-34 dargestellt.

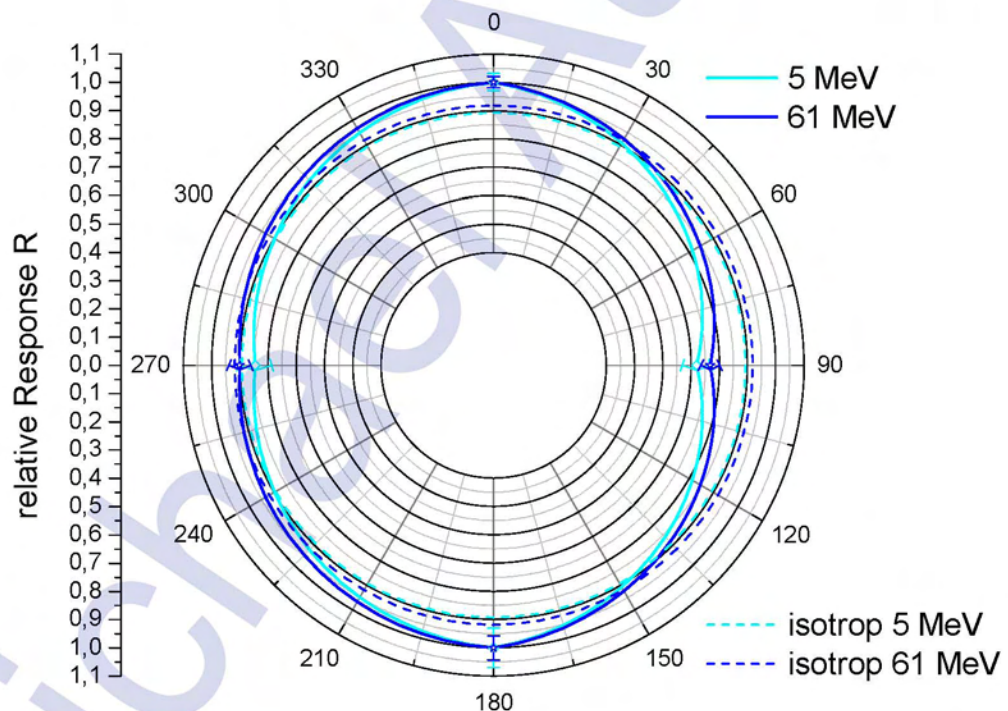


Abbildung 7-34: Relative Response der simulierten HAWK-SEPC Simulationsgeometrie in Abhängigkeit des Einfallswinkels für unterschiedliche Neutronenenergien. Zusätzlich ist die Response für die jeweiligen Neutronenenergien von 5 MeV und 61 MeV bei isotroper Einstrahlung eingetragen.

Für die niedrigere Neutronenenergie ergeben sich bei der HAWK-SEPC Geometrie Abschwächungen für eine Bestrahlung aus 90° und 270°. Bei den Neutronen mit einer höheren Energie scheint die Abschwächung nicht so stark auszufallen, jedoch ist der Unterschied bei den beiden Energien nicht signifikant. Es ergeben sich Abschwächungen bei 90° von bis zu 30% und bei 270° von bis zu 25%. Ein Vergleich

mit einer isotropen Darstellung ist ebenfalls in der Abbildung gezeigt. Diese zeigt ebenfalls eine Energieabhängigkeit, jedoch das Maximum der Abschirmung bei der niedrigeren simulierten Neutronenenergie von 5MeV beträgt 11%. Die exakten Werte dieses Vergleichs sind in Tabelle 7-8 dargestellt.

Tabelle 7-8: Relative Response R der Äquivalentdosisleistung des HAWK-SEPC bei isotroper Einstrahlung für Neutronen mit unterschiedlichen Energien.

Teilchen	Energie	Response R	Unsicherheit
Neutronen	5 MeV	89 %	7 %
Neutronen	61 MeV	92 %	6 %

Ebenso wie schon beim HAWK-TEPC liegen auch hier die unterschiedlichen Responses der beiden Neutronenenergien nicht innerhalb der statistischen Unsicherheit zusammen im Bereich von ca. 90%.

LiuLin A4

Für die Simulationsgeometrie des LiuLin A4 wurde, wie schon für die beiden anderen Geräte, die Winkelabhängigkeit bei Einstrahlung von Neutronen unterschiedlicher Energien bestimmt. Abbildung 7-35 zeigt die erhaltene Winkelabhängigkeit für Neutronen mit 5MeV und 61MeV. Zusätzlich wurde zum Vergleich auch die Response für die isotrope Einstrahlung bei den selben Neutronenenergien simuliert und ebenfalls in Abbildung 7-35 dargestellt.

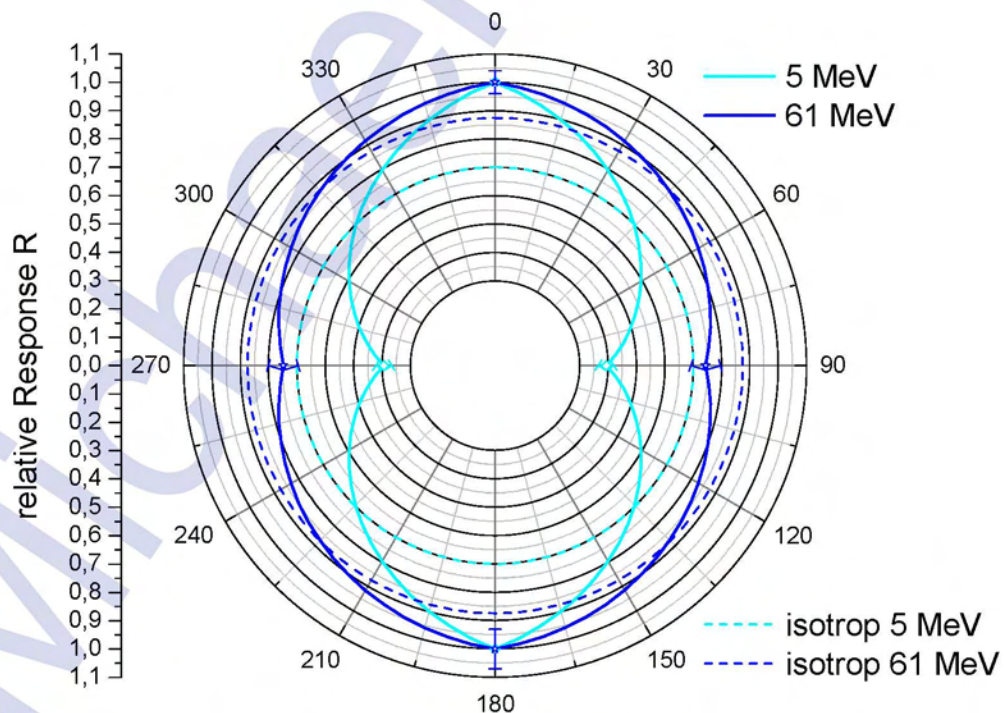


Abbildung 7-35: Relative Response der simulierten LiuLin Simulationsgeometrie in Abhängigkeit des Einfallswinkels für unterschiedliche Neutronenenergien. Zusätzlich ist die Response für die jeweiligen Neutronenenergien von 5 MeV und 61 MeV bei isotroper Einstrahlung eingetragen.

Für die Neutronenenergie von 5 MeV ergeben sich bei der LiuLin Geometrie starke Abschwächungen bei einer Bestrahlung aus 90° und 270°. Bei den Neutronen mit einer höheren Energie fällt die Abschwächung nicht so stark aus. Die sich ergebenden Abschwächungen bei 90° und 270° sind, wie schon aufgrund des symmetrischen Aufbaus, innerhalb der statistischen Unsicherheit ident. Auffällig ist die extrem starke Verringerung der Response, wenn das Gerät um 90° bzw. 270° gedreht wird. Dieser Effekt ist aber dadurch zu verstehen, dass der Detektor, ein 300µm dickes Siliziumplättchen ist. Ein solches Plättchen ist natürlich weit von einer kugelsymmetrischen Form, wie sie der HWAK-TEPC und HAWK-SEPC haben, entfernt.

Es ergeben sich Abschwächungen bei Neutronen mit 5 MeV von bis zu 60% und bei Neutronen mit 61 MeV von bis zu 25%. Ein Vergleich mit einer isotropen Darstellung ist ebenfalls in der Abbildung gezeigt. Diese zeigt ebenfalls eine Energieabhängigkeit, welche in Tabelle 7-9 angegeben ist.

Tabelle 7-9: Relative Response R der Äquivalentdosisleistung des LiuLin bei isotroper Einstrahlung für Neutronen mit unterschiedlichen Energien.

<i>Energie...</i>	<i>Energie der Teilchen</i>		
Teilchen	Energie	Response R	Unsicherheit
Neutronen	5 MeV	70 %	8 %
Neutronen	61 MeV	87 %	7 %

7.4 Simulation der Kosmischen Strahlung

7.4.1 Beschreibung des verwendeten Modells

Für die Simulation der Kosmischen Strahlung wird ein Simulationsmodell verwendet, dessen Aufbau so gestaltet ist, dass die gesamte Erdatmosphäre darin enthalten ist. Eine genaue Beschreibung dieser Geometrie wird in Kapitel 7.4.1.2 gegeben. Bei Simulationen mit dieser Geometrie starten die Startteilchen am oberen Ende der Erdatmosphäre (in ca. 70km Höhe) und durchfliegen diese. Dabei wechselwirkt dieses Teilchen mit den einzelnen Schichten der Atmosphäre bis es die gesamte Energie abgegeben hat oder den Boden erreicht hat. Die Startteilchenenergie wird aus dem Primärspektrum gesampelt. Eine genaue Beschreibung dieser Primärspektren wird in Kapitel 7.4.1.1 gegeben.

Das sich über die Jahre verändernde Primärspektrum wird dabei beschrieben, indem für jedes unterschiedliche SDP vor dem Beginn der Simulation ein dementsprechendes Primärspektrum generiert wird.

7.4.1.1 Primärspektrum

Das Primärspektrum ist für die Startenergie der Teilchen verantwortlich. Es variiert durch die abschirmende Wirkung des Magnetfeldes der Sonne, wie in Kapitel 2.4 beschrieben. Zur Beschreibung dieses Einflusses wird das SDP herangezogen (siehe Kapitel 2.4.2).

Zur Auswahl stehen dafür vier Modelle. Wobei für die Modelle gilt, dass sie mit zunehmender Modellnummer jeweils Erweiterungen, Ergänzungen und Verbesserungen der vorhergehenden Modelle sind.

Modell 0: Bei diesem Modell wird das Primärspektrum für die Simulation mit Hilfe von einem NASA Code namens HIZ gewonnen. Die Daten dieses Codes beruhen auf experimentellen Daten aus den Jahren um 1985. Mit diesem Code werden Spektren für alle elementaren Gruppen von $Z=1$ bis $Z=28$ berechnet und zu einem all-nucleon Spektrum zusammengefügt. Die Anteile der elementaren Gruppen $Z=1$ (H), $Z=2$ (He), $Z=7$ (N), $Z=14$ (Si) und $Z=28$ (Fe) sind beispielhaft in Abbildung 7-36 dargestellt.

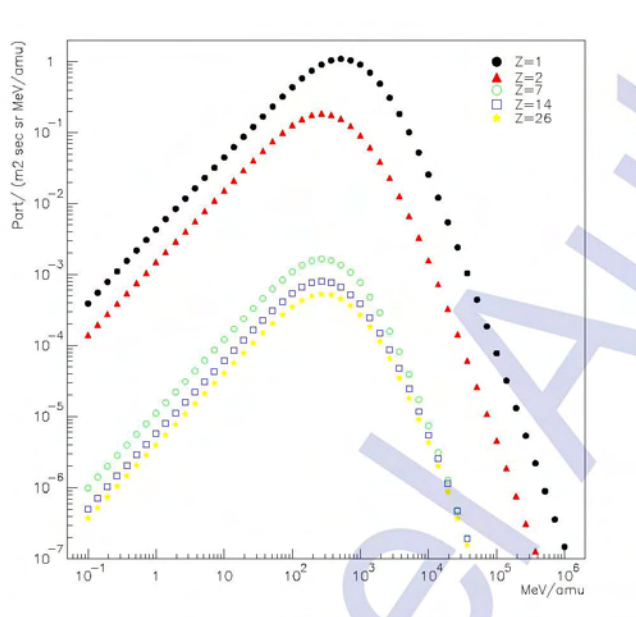


Abbildung 7-36: Anteile der elementaren Gruppen $Z=1$ (H), $Z=2$ (He), $Z=7$ (N), $Z=14$ (Si) und $Z=28$ (Fe) am Primärspektrum für ein SDP von 772 MV.

[Badh1996]

Modell 1 ist eine Erweiterung dieses Modells 0.

Modell 2 basiert auf dem HIZ Code und ist eine Erweiterung und Verbesserung des Modells 1. Für die Verbesserung wurden neuere experimentelle Messdaten verwendet. [Agra1996]

Modell 3: Bei diesem Modell wird der Bartol Fit von 2001 verwendet um den NASA Fluss zu modifizieren. Die experimentellen Daten dafür stammen aus den späten Jahren des letzten Jahrtausends (1997-2000) von Magnetspektrometern [Menn1997], CAPRICE [Boez1999] [Boez2003] und MASS2 [Bell1999]. Der Großteil dieser Messungen bezog sich auf den Protonen- und Heliumfluss und nur wenige Messungen bezogen sich auf Teilchen mit höherer Ordnung. Dieser Fit entspricht der Gleichung 7-1 mit den Parametern der verwendeten Massengruppen in Tabelle 7-10 [Gais2001].

$$\phi(E_K) = K(E_K + b \cdot e^{-c\sqrt{E_K}})^{-\alpha}$$

Gleichung 7-1: Fitfunktion der differenziellen Spektren in kinetischer Energie pro Nukleon [Gais2001].

Tabelle 7-10: Fit Parameter für Gleichung 7-1 [Gais2001].

Massengruppen	α	K	b	c
H	2,74	14900	2,15	0,21
He	2,64	600	1,25	0,14
CNO 14	2,70	62,4	1,78	0,02
Ne-Si 24	2,70	21,4	1,78	0,02
Fe(56)	2,70	5,1	1,78	0,02

Abbildung 7-37 zeigt die Verteilung der einzelnen Massengruppen in Abhängigkeit der kinetischen Energie pro Nukleon, wie sie bei Modell 3 verwendet wird.

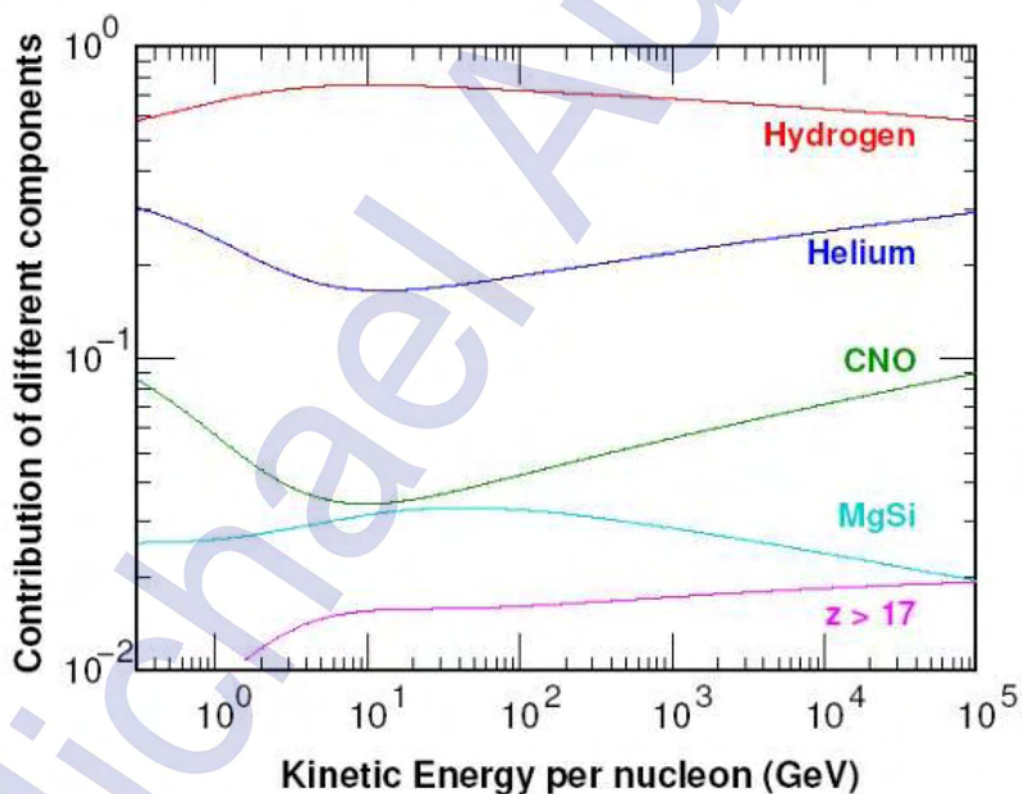


Abbildung 7-37: Anteile der einzelnen Massengruppen als Funktion der kinetischen Energie pro Nukleon bei der Verwendung von Modell 3 [Gais2001].

Die unterschiedlichen Primärspektren der Modelle sind in Abbildung 7-38 für $Z=1$ dargestellt. In Abbildung 7-39 sind die Unterschiede durch multiplizieren mit $E^{2,5}$ besser herausgearbeitet. Abbildung 7-40 zeigt das relative Verhältnis der Modelle 0 bis 2 zum Modell 3.

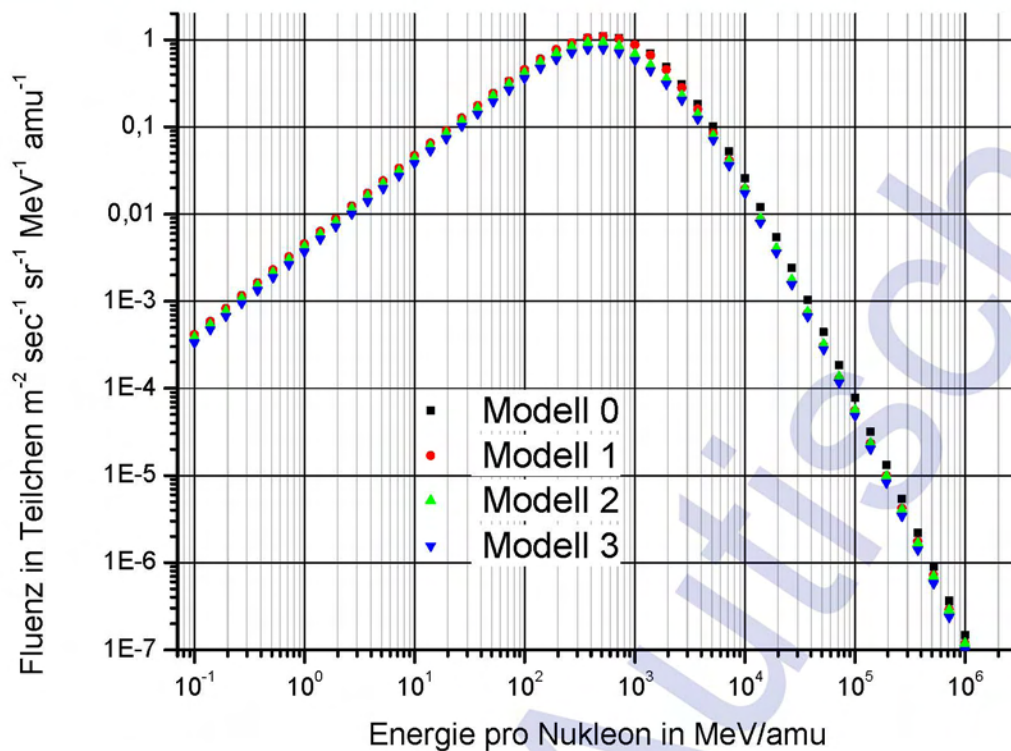


Abbildung 7-38: Primärspektren der unterschiedlichen Modelle für Z=1 bei einem SDP von 772 MV.

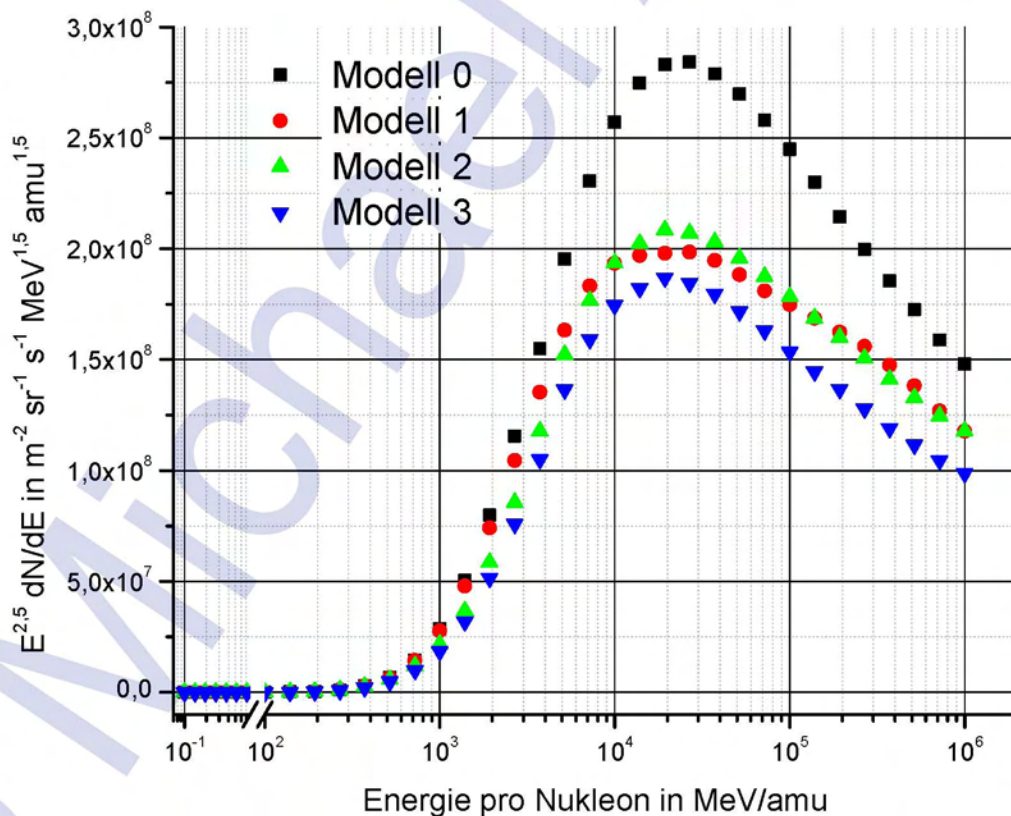


Abbildung 7-39: Primärspektren der unterschiedlichen Modelle für Z=1 bei einem SDP von 772 MV. Zum Aufzeigen der Unterschiede sind die Spektren mit $E^{2,5}$ multipliziert.

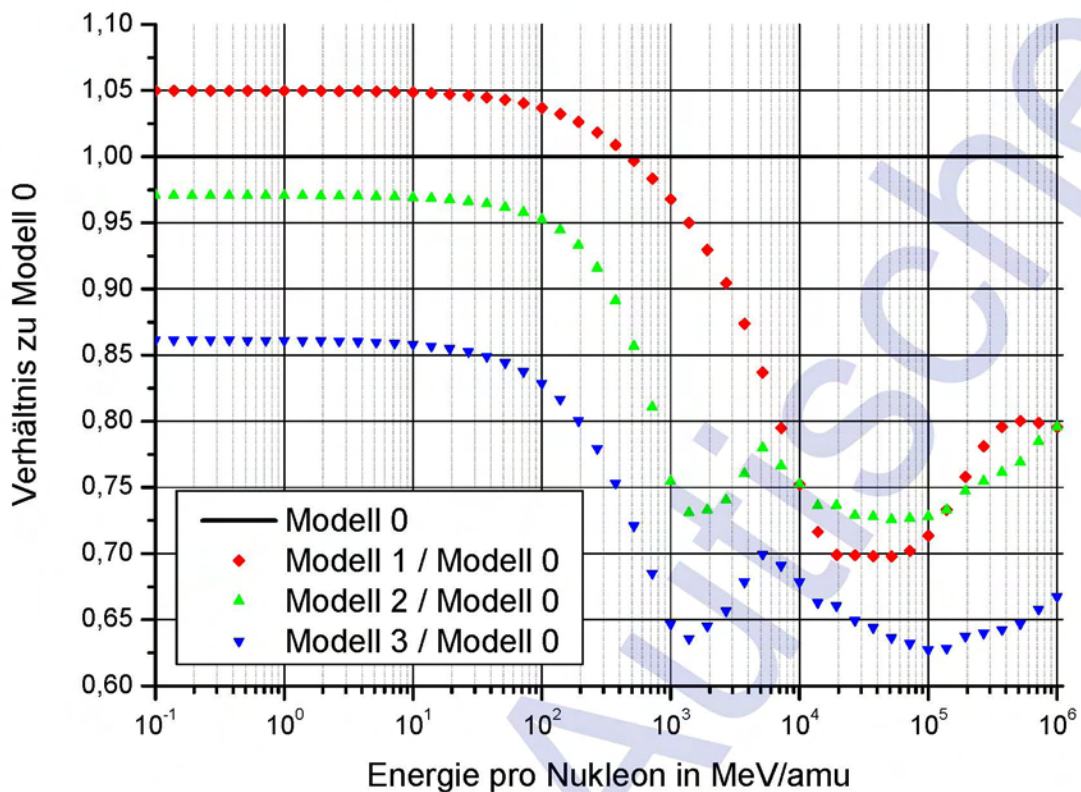


Abbildung 7-40: Verhältnisse der Primärspektren der unterschiedlichen Modelle im Vergleich zu Modell 0 bei einem SDP von 772 MV.

Das Primärspektrum ändert sich auch durch ein verändertes SDP. Hierbei wird dem LIS Spektrum ein Energieverlust wie in Gleichung 7-2 hinzugefügt [Batt2003].

$$E = E_{int} + Z \cdot V(t)$$

Z... Landungszahl

V(t) ... Solarpotenzial

Gleichung 7-2: Primärspektrumskorrektur mit dem Solar Potential [Batt2003].

Das Solarpotenzial hängt in diesem Fall nur von einem Parameter, nämlich der Zeit, ab. Es ist auch nicht nötig, den interstellaren Fluss des LIS Spektrums zu kennen. Wenn der Fluss auf der Erde zu einer bestimmten Zeit bekannt ist, kann mit der relativen Variation des Solarpotentials auf den Fluss zu einem anderen Zeitpunkt zurückgerechnet werden. Für die relative Variation des Solarpotentials werden in diesem Fall Daten (Zählraten) von Neutronen Monitoren herangezogen. Die Variation des Primärspektrums bei unterschiedlichem SDP ist für Z=1 in Abbildung 7-41 dargestellt. Dabei wurden SDP Werte von 450 MV, 772 MV und 1440 MV verwendet.



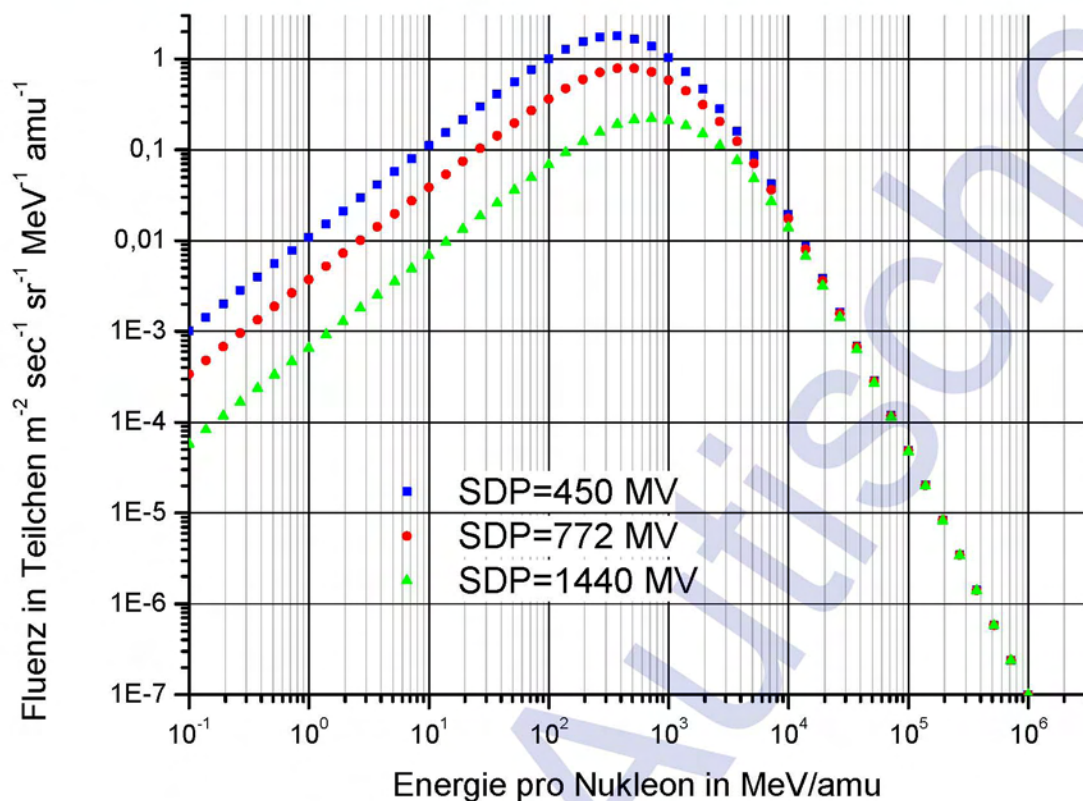


Abbildung 7-41: Primärspektren mit $Z=1$ bei unterschiedlichem SDP von 450MV, 772MV und 1440MV. Dargestellt ist die Fluenz in Abhängigkeit der Energie.

Da das Modell 3 auf den neuesten Messdaten beruht, fand für alle durchgeführten Simulationen dieses Modell Verwendung. Einzig beim dem Vergleich der Flugmessungen in Rom und Aalborg wurden zusätzlich auch die Simulationen mit dem Modell 0 dargestellt, da diese in einer früheren Publikation [Roll2005] angegeben wurden.

7.4.1.2 Geometrie

Geometrisch ist der Aufbau der Atmosphäre in dem Simulationsmodell durch 100 Luftschichten mit nach außen hin abnehmender Dichte verwirklicht. Eine schematische Darstellung mit weniger Schichten ist in Abbildung 7-42 dargestellt. Die Höhen und die korrespondierenden Luftdrücke der verwendeten Schichtgeometrie sind in Tabelle 7-11 eingetragen.

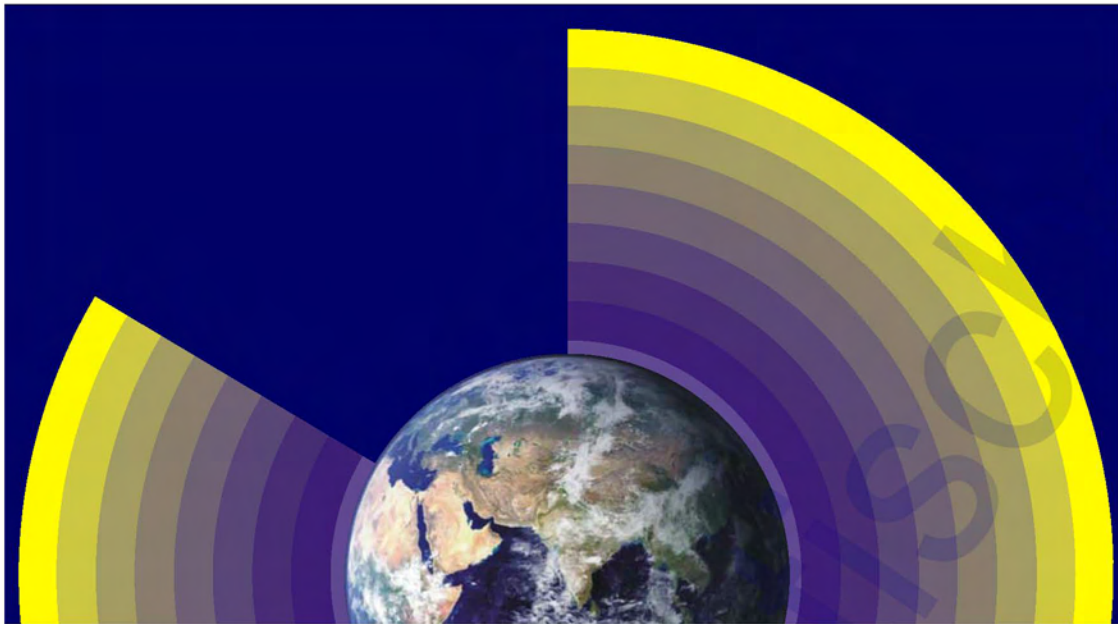


Abbildung 7-42: Schematische Abbildung des verwendeten Atmosphärenmodells.

Um die Simulation zu beschleunigen wird die Geometrie durch einen Kegel, dessen Spitze an dem gewählten Punkt auf der Erdoberfläche sitzt und dessen Achse normal auf die Erdoberfläche in diesem Punkt steht, beschnitten. [Batt2003] Die Öffnung dieses Kegels kann durch den Delta Cutoff Parameter bestimmt werden. Dieser Parameter ist für die Simulation immer abzuwägen. Ein zu groß gewähltes Delta Cutoff verbessert die Genauigkeit, verlängert aber die Simulation um ein Vielfaches, da auch Teilchen, welche sehr weit von der Achse des Zielpunktes entfernt sind weiterverfolgt werden, obwohl sie für das Endergebnis keinen Beitrag mehr leisten können. Wird das Delta CutOff zu klein gewählt, kommen nur sehr wenige Teilchen in die Nähe der Erdoberfläche und damit steigt die Unsicherheit in diesem Bereich stark an.

Tabelle 7-11: Auflistung der in der Simulationsgeometrie enthaltenen Höhen der Luftschichten mit den zugehörigen Luftdrücken.

Nr	Höhe in m	Druck in Pa		Nr	Höhe in m	Druck in Pa
001	71.300	9,0		051	20.500	5.323
002	69.800	10,6		052	19.900	5.862
003	68.300	12,4		053	19.300	6.446
004	66.800	14,3		054	18.700	7.075
005	65.400	16,7		055	18.100	7.753
006	64.000	19,4		056	17.500	8.483
007	62.600	22,6		057	17.000	9.266
008	61.200	26,1		058	16.400	10.101
009	59.900	30,2		059	15.900	11.003
010	58.500	34,9		060	15.300	11.964
011	57.200	40,3		061	14.800	12.984
012	56.000	46,5		062	14.300	14.082
013	54.700	53,5		063	13.700	15.240
014	53.500	61,6		064	13.200	16.475
015	52.300	70,8		065	12.800	17.789
016	51.100	81,2		066	12.300	19.182

Nr	Höhe in m	Druck in Pa	Nr	Höhe in m	Druck in Pa
017	49.900	93,2	067	11.800	20.653
018	48.800	107	068	11.300	22.212
019	47.700	122	069	10.900	23.801
020	46.600	140	070	10.400	25.507
021	45.500	159	071	10.000	27.262
022	44.400	182	072	9.500	29.096
023	43.400	207	073	9.100	30.989
024	42.300	236	074	8.700	32.941
025	41.300	268	075	8.300	34.951
026	40.300	305	076	7.900	37.030
027	39.400	346	077	7.500	39.158
028	38.400	392	078	7.100	41.355
029	37.500	444	079	6.700	43.600
030	36.600	502	080	6.300	45.905
031	35.700	568	081	5.900	48.268
032	34.800	641	082	5.600	50.681
033	33.900	724	083	5.200	53.142
034	33.000	816	084	4.900	55.653
035	32.200	919	085	4.500	58.212
036	31.400	1.034	086	4.200	60.821
037	30.500	1.161	087	3.800	63.478
038	29.700	1.304	088	3.500	66.175
039	29.000	1.464	089	3.200	68.921
040	28.200	1.642	090	2.900	71.696
041	27.400	1.840	091	2.600	74.511
042	26.700	2.059	092	2.300	77.374
043	25.900	2.304	093	2.000	80.258
044	25.200	2.574	094	1.700	83.190
045	24.500	2.872	095	1.400	86.142
046	23.800	3.198	096	1.100	89.133
047	23.100	3.554	097	800	92.143
048	22.500	3.942	098	500	95.183
049	21.800	4.365	099	300	98.165
050	21.200	4.825	100	-	101.303

7.4.2 Simulationen

7.4.2.1 Allgemein

Aus den Simulationen mit dem oben beschriebenen Atmosphärenmodell erhält man die im Folgenden beschriebenen Informationen. Einerseits erhält man für jede der 100 Schichten die Fluenz der Teilchen Photonen, Neutronen, Protonen, Elektronen, Positronen, Myonen und Pionen. Die Fluenz der eben beschriebenen Teilchen ist in Abbildung 7-43 dargestellt. Diese Fluenzverteilung entspricht einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.



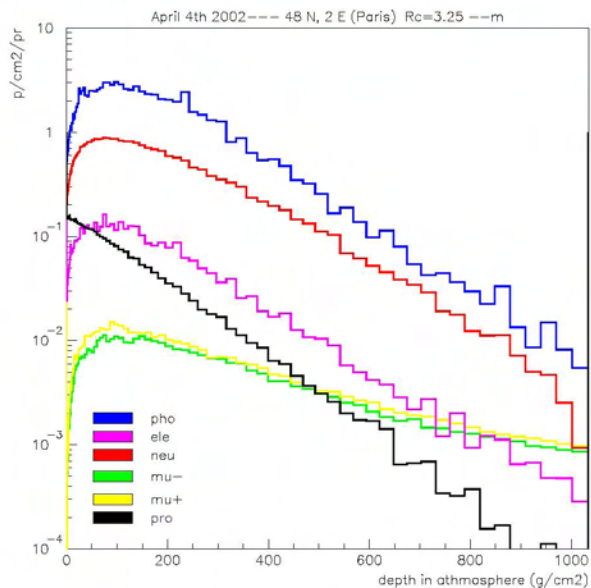


Abbildung 7-43: Relative Fluenz von Photonen, Elektronen, Neutronen, Myonen (positiv und negativ) und Protonen in Abhängigkeit des Luftdrucks bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Zusätzlich zu den Fluenzwerten der einzelnen Komponenten erhält man auch noch für jede Detektorschicht ein Energiespektrum der einzelnen Teilchen. Ein solches Spektrum ist in Abbildung 7-44 für zirka 11.500m Höhe und den Bedingungen der Flugmessung mit dem ÖBH dargestellt.

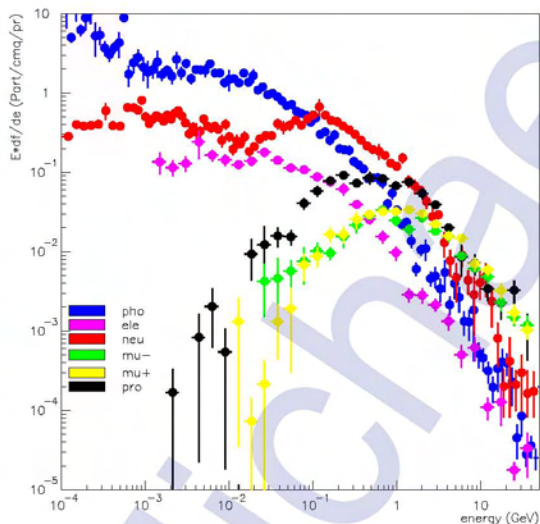


Abbildung 7-44: Relative Energiespektren von Photonen, Elektronen, Neutronen, Myonen (positiv und negativ) und Protonen für 11.500m Höhe, einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Für weiterführende Simulationen müssen diese Spektren in kumulative Spektren umgewandelt werden. Die kumulativen Energiespektren der oben beschriebenen Bedingungen sind in Abbildung 7-45 dargestellt.



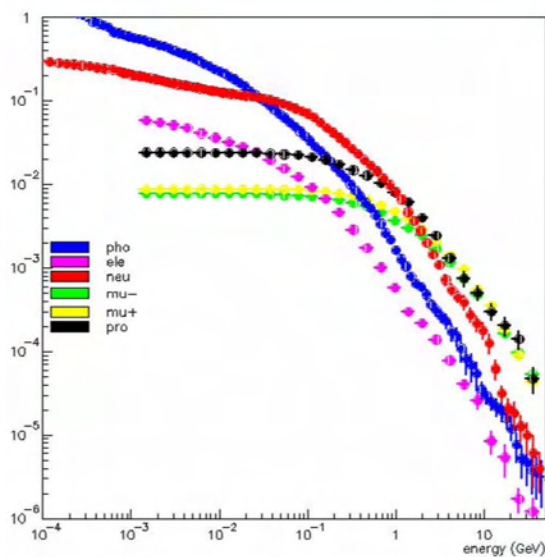


Abbildung 7-45: Relative kumulative Energiespektren von Photonen, Elektronen, Neutronen, Myonen (positiv und negativ) und Protonen für 11.500m Höhe, einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Diese kumulativen Energiespektren können nun für jede einzelne Teilchengruppe an eine der Simulationsgeometrien (HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin) weitergegeben werden. Die auf diese Weise erhaltenen Daten werden in einem späteren Kapitel beschrieben und abgehandelt.

7.4.2.2 Simulation der Flugmessung mit dem ÖBH

Bei der Simulation der Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer wurden die zuvor beschriebenen Teilschritte durchgeführt. Die Teilergebnisse sind auch in den Abbildung 7-43 bis Abbildung 7-45 im Einführungskapitel über die Simulation mit dem Atmosphärenmodell für genau diese Bedingungen (CutOff = 4,55 GV und SDP = 772 MV) aufgeführt. Für die zwei Höhen von 7000m und 11500m sind die prozentmäßigen Anteile der einzelnen Partikel an der Energiedosisleistung in Tabelle 7-12 eingetragen und in Abbildung 7-46 dargestellt.

Tabelle 7-12: Energiedosisanteile der einzelnen Teilchen bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Teilchen	% Anteil an der Dosis in 7000m (FL230)	% Anteil an der Dosis in 11500m (FL380)
Protonen	8,09 ± 0,06	9,85 ± 0,06
Photonen	72,5 ± 1,2	77,9 ± 1,2
Neutronen	19,7 ± 0,6	14,5 ± 0,4
Elektronen	2,9 ± 0,3	3,7 ± 0,2
Positronen	1,8 ± 0,2	2,0 ± 0,2
Myonen +	0,79 ± 0,04	0,50 ± 0,03
Myonen -	0,67 ± 0,05	0,38 ± 0,03
Pionen +	0,0028 ± 0,0007	0,0036 ± 0,0006
Pionen -	0,0039 ± 0,0008	0,0049 ± 0,0006

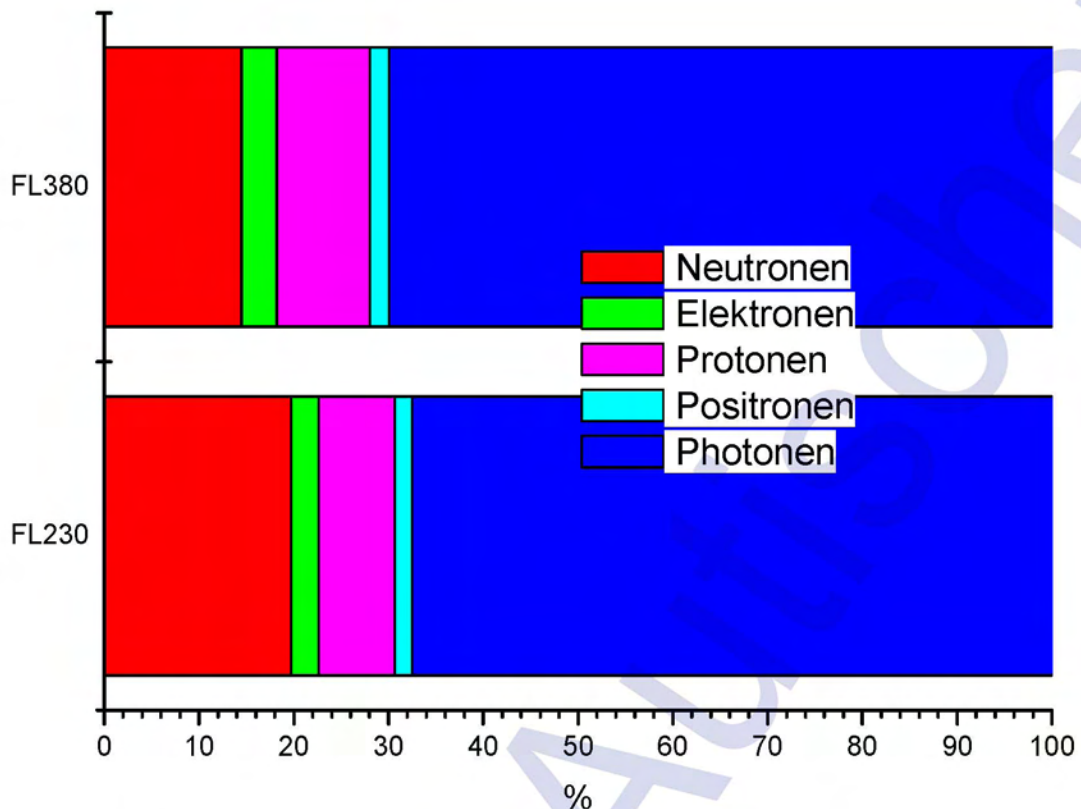


Abbildung 7-46: Relativer Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Energiedosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhe bei 7000m (FL230) und bei 11500m (FL380).

Aus den Fluenzwerten in den einzelnen Detektorschichten kann durch multiplizieren mit den Pelliccioni-Faktoren die Äquivalentdosisleistung in der jeweiligen Schicht berechnet werden [Pell2000]. Abbildung 7-47 zeigt wiederum für die oben beschriebenen Bedingungen (CutOff = 4,55 GV und SDP = 772 MV) das Ergebnis der Auswertung mit den Pelliccioni-Faktoren [Pell2000]. Die Darstellung zeigt den Verlauf der Äquivalentdosisleistung über den gesamten Simulationsbereich von 0 m bis 71 km Höhe. Erkennbar ist dabei das Pfotzermaximum [Allk1975] bei 18.700 m Höhe. Hier erreicht die Äquivalentdosisleistung einen Maximalwert von $6,5 \pm 0,1 \mu\text{Sv/h}$.

In Tabelle 7-13 sind die relativen Dosisanteile der einzelnen Teilchen eingetragen. Mit Hilfe dieser Werte ist es möglich, die Absolutanteile dosisleistungsmäßig aufzutragen. Damit erhält man das resultierende mikrodosimetrische Spektrum $y_h(y)$ in der jeweiligen Flughöhe. Dies ist in Abbildung 7-56 für FL230 und in Abbildung 7-57 für 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV dargestellt.

Die Abbildung 7-48 zeigt die relativen Anteile an der Äquivalentdosisleistung der simulierten Partikel für die beiden Flughöhen bei 7000m und 11500m. Markant in der Darstellung ist, dass über 50% der Äquivalentdosisleistung durch Neutronen hervorgerufen wird. Die nächsthöheren Anteile entfallen auf Protonen und Elektronen. Die restlichen Teilchenarten bewegen sich im einstelligen Prozentbereich oder darunter. Speziell der Einfluss der Pionen ist sehr gering im hundertstel Prozentbereich.

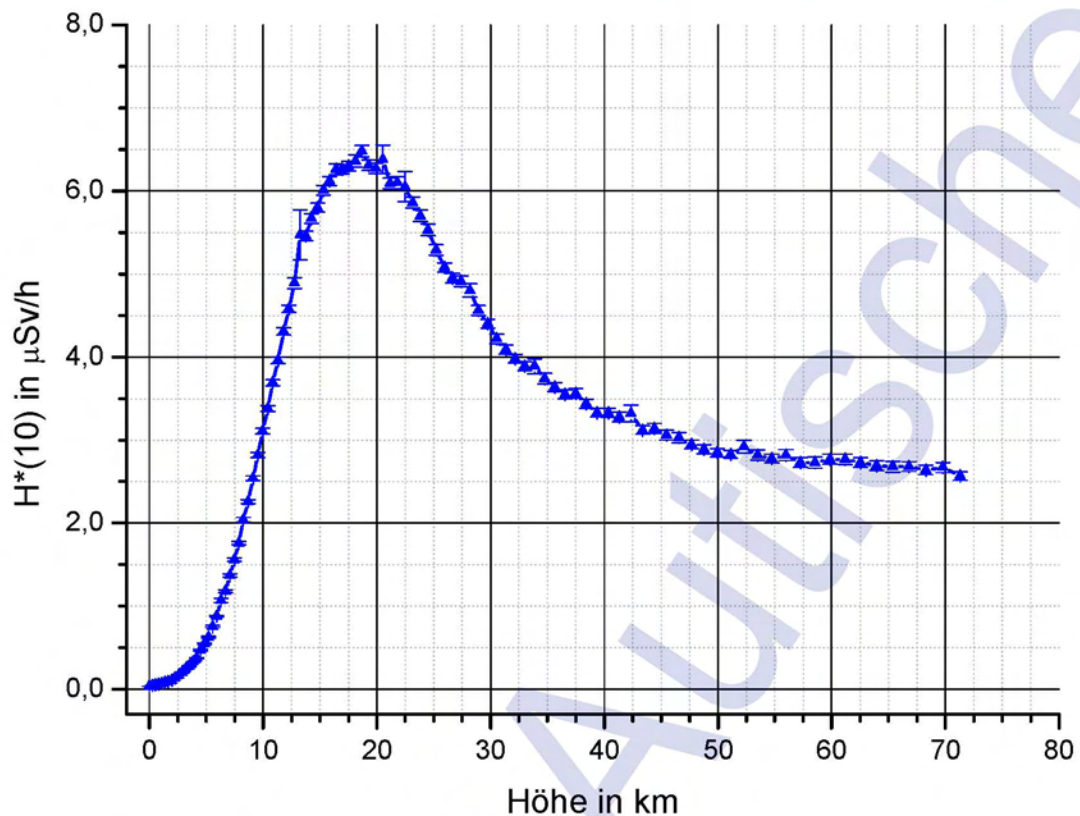


Abbildung 7-47: Simulierter Verlauf der Äquivalentdosisleistung in Abhängigkeit der Flughöhe für einen CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Tabelle 7-13: Äquivalentdosisleistungsanteile der einzelnen Teilchen für die beiden Simulationshöhen von 7000m und 11500m bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Teilchen	% Anteil an der Dosis in 7000m (FL230)	% Anteil an der Dosis in 11500m (FL380)
Protonen	12,8 ± 0,6	16,0 ± 0,6
Photonen	4,6 ± 0,1	5,2 ± 0,1
Neutronen	56,4 ± 1,0	50,7 ± 0,6
Elektronen	13,3 ± 0,8	15,4 ± 0,4
Positronen	6,9 ± 0,3	8,7 ± 0,3
Myonen pos	3,07 ± 0,08	2,07 ± 0,07
Myonen neg	2,79 ± 0,07	1,80 ± 0,04
Pionen pos	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,01
Pionen neg	0,05 ± 0,01	0,06 ± 0,01

Äquivalent zu den relativen Verhältnissen zeigt die Abbildung 7-49 die Anteile in absoluten Werten der Äquivalentdosisleistung. Grundsätzlich ist dabei erkennbar, dass die Äquivalentdosisleistung für alle Teilchenarten ansteigt. Hervorstechend dabei ist die starke Zunahme der Äquivalentdosisleistung, hervorgerufen durch Neutronen.

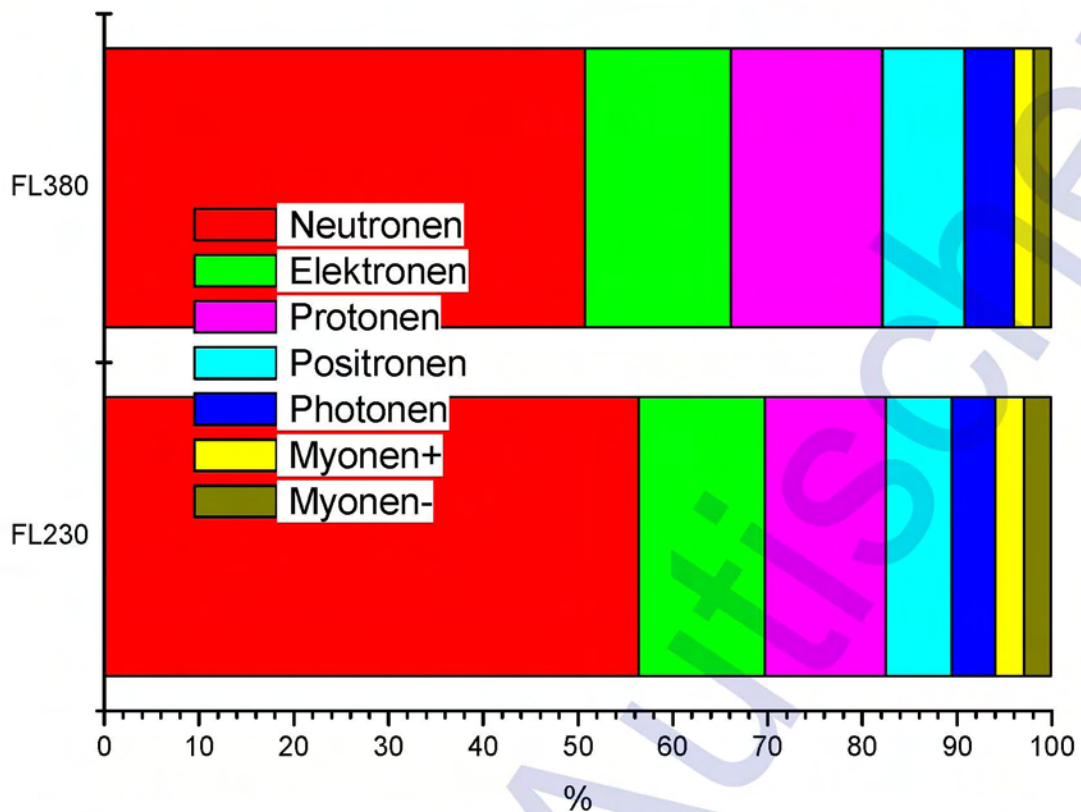


Abbildung 7-48: Relativer Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhe bei FL 230 (7000m) und bei FL380 (11500m).

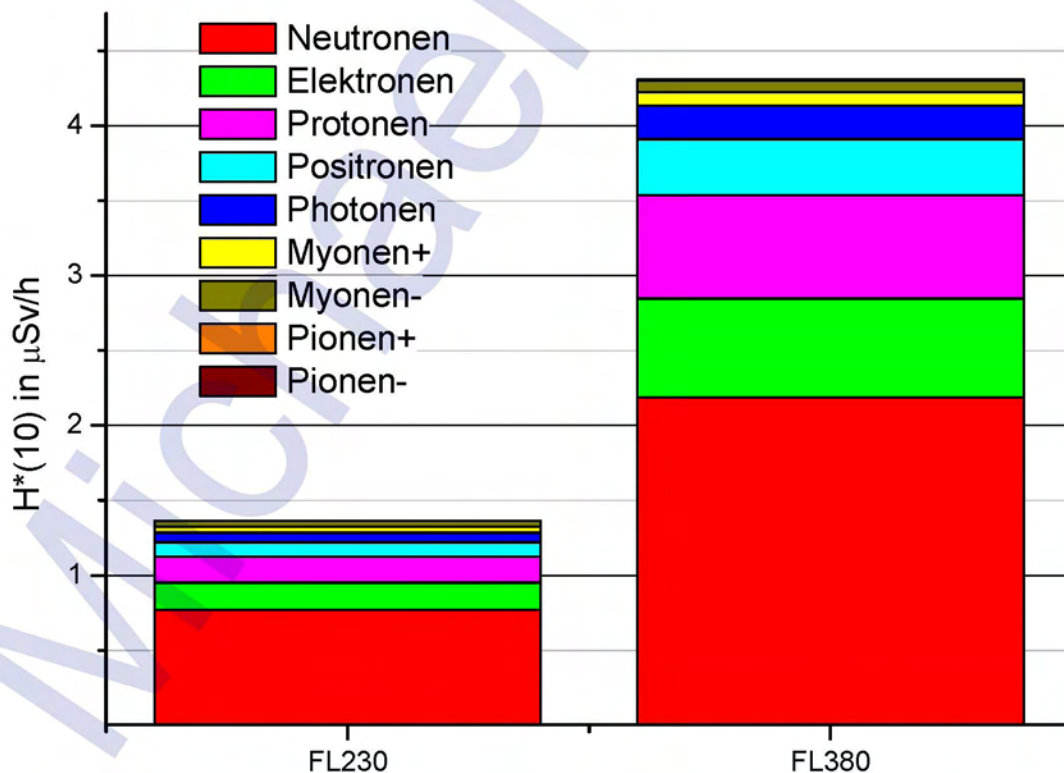


Abbildung 7-49: Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhe bei FL 230 (7000m) und bei FL380 (11500m).

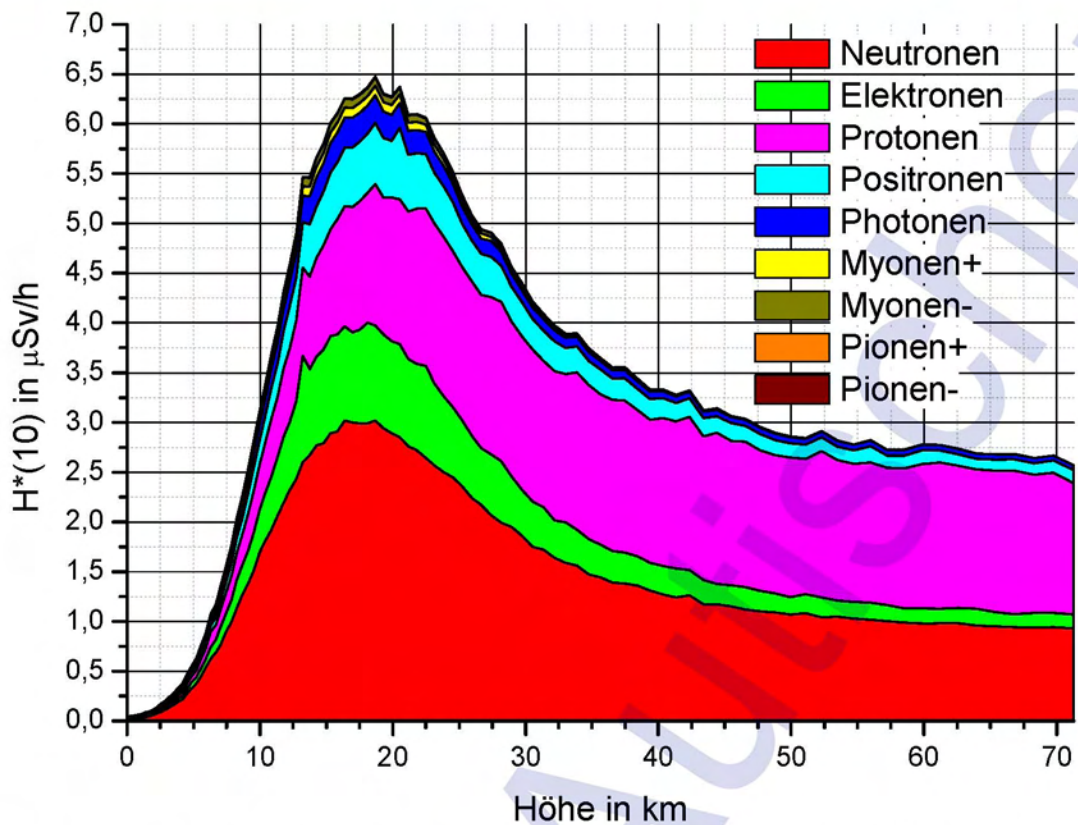


Abbildung 7-50: Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhen von 0-70km.

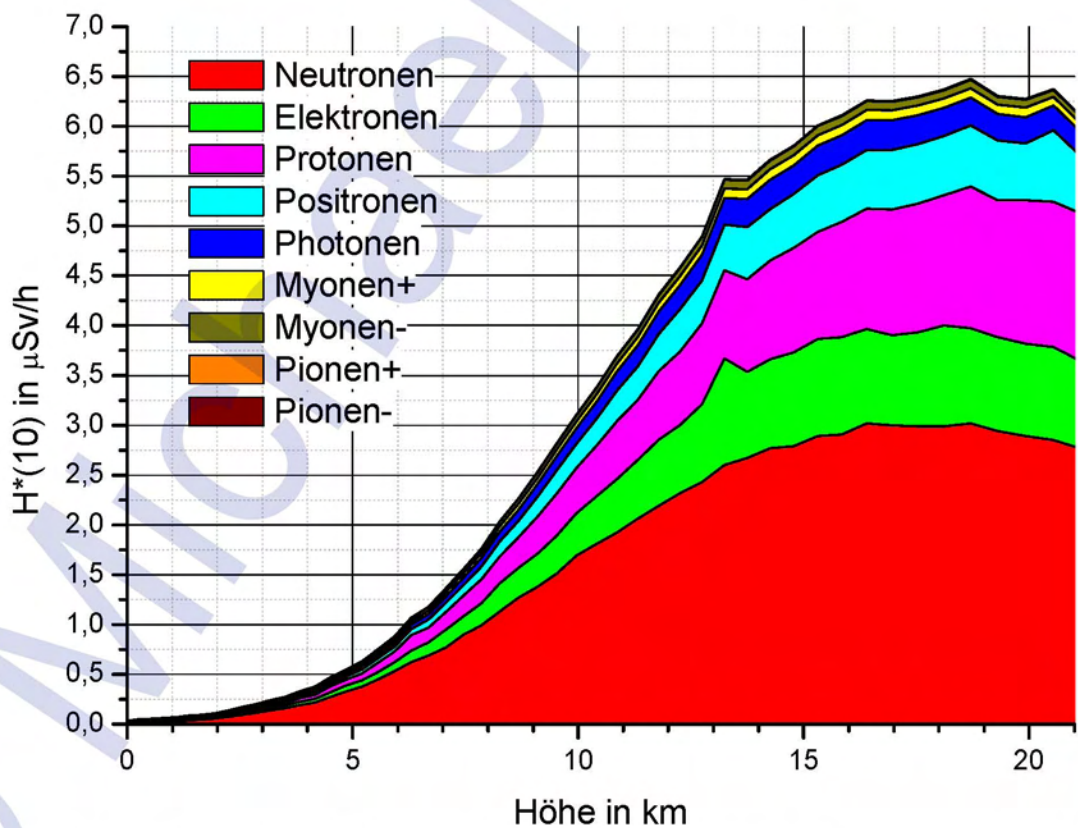


Abbildung 7-51: Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhen von 0-20km.

Übergibt man die kumulativen Energiespektren an eine der in dieser Arbeit beschriebenen Simulationsgeometrie, so erhält man durch Simulation jeder Teilchengruppe die mikrodosimetrischen Spektren der Einzelteilchen. Diese mikrodosimetrischen Spektren sind in Abbildung 7-52 für FL230 und in Abbildung 7-53 für 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV dargestellt. In der darauffolgenden Abbildung 7-54 und in der Abbildung 7-55 sind die resultierenden mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot d(y)$ mit den jeweiligen Anteilen der Teilchenarten am normierten Summenspektrum dargestellt.

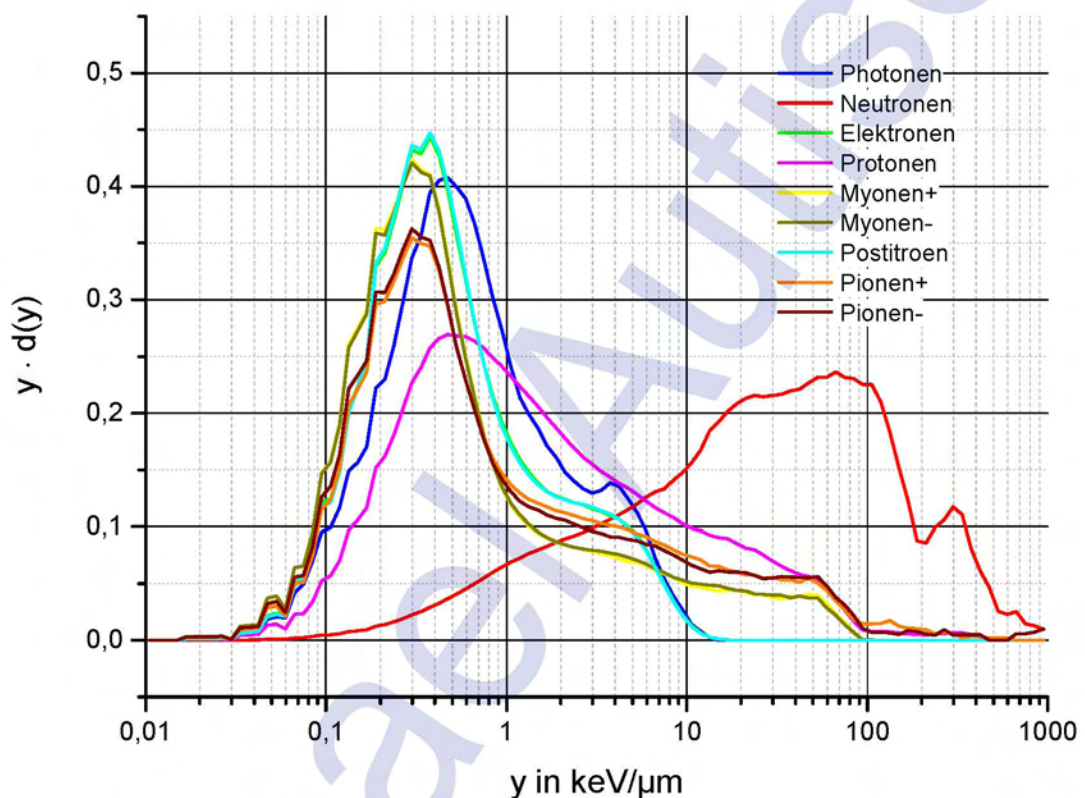


Abbildung 7-52: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Abbildung 7-56 und Abbildung 7-57 zeigen die mikrodosimetrischen Spektren, mit den jeweiligen Anteilen der Teilchenarten, in absoluten Werten der Äquivalentdosisleistung für die beiden Flughöhen.



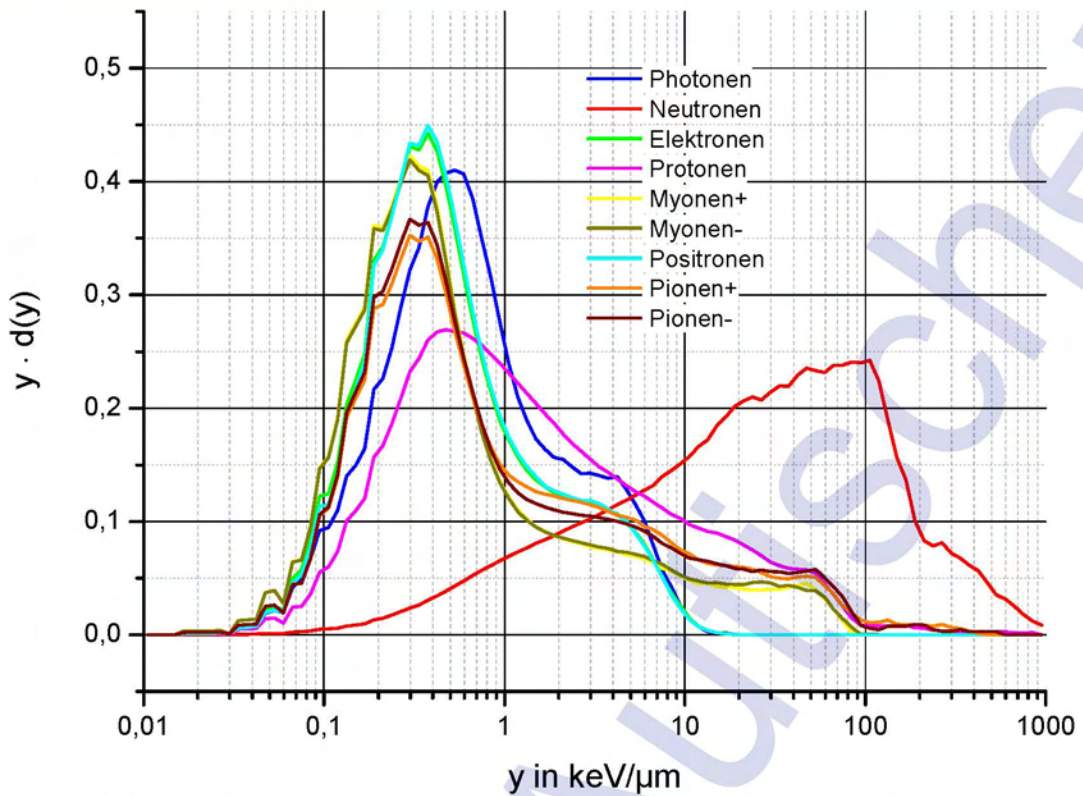


Abbildung 7-53: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

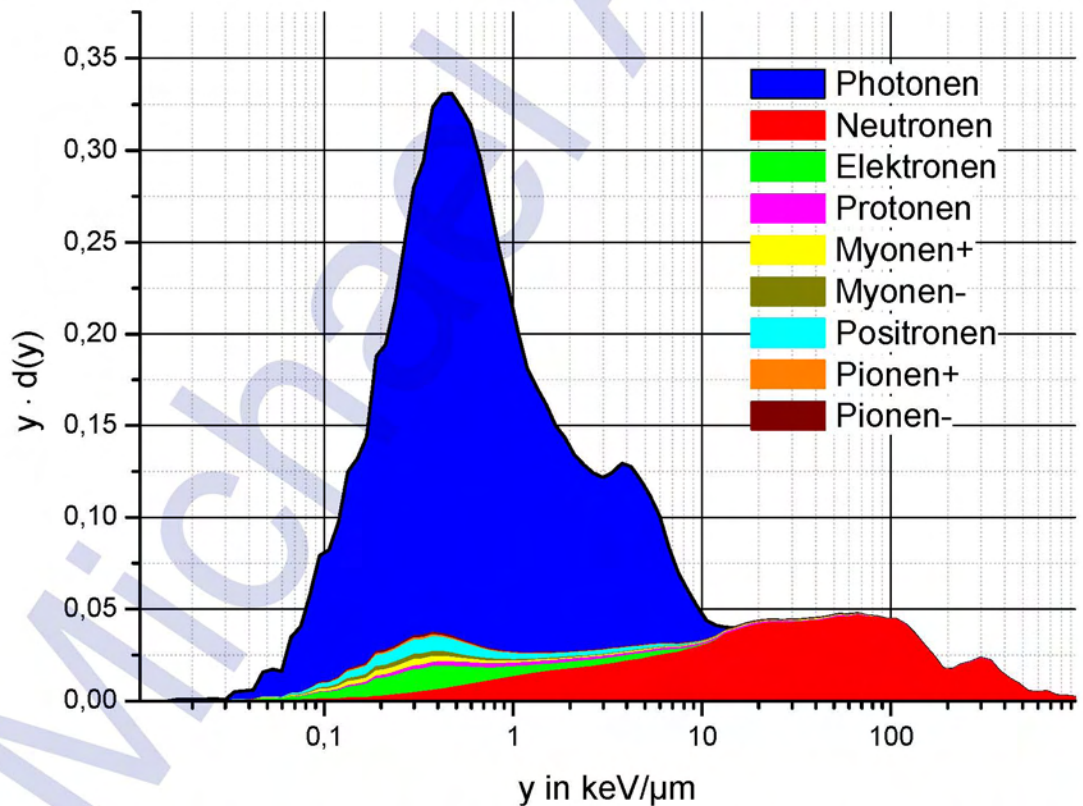


Abbildung 7-54: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

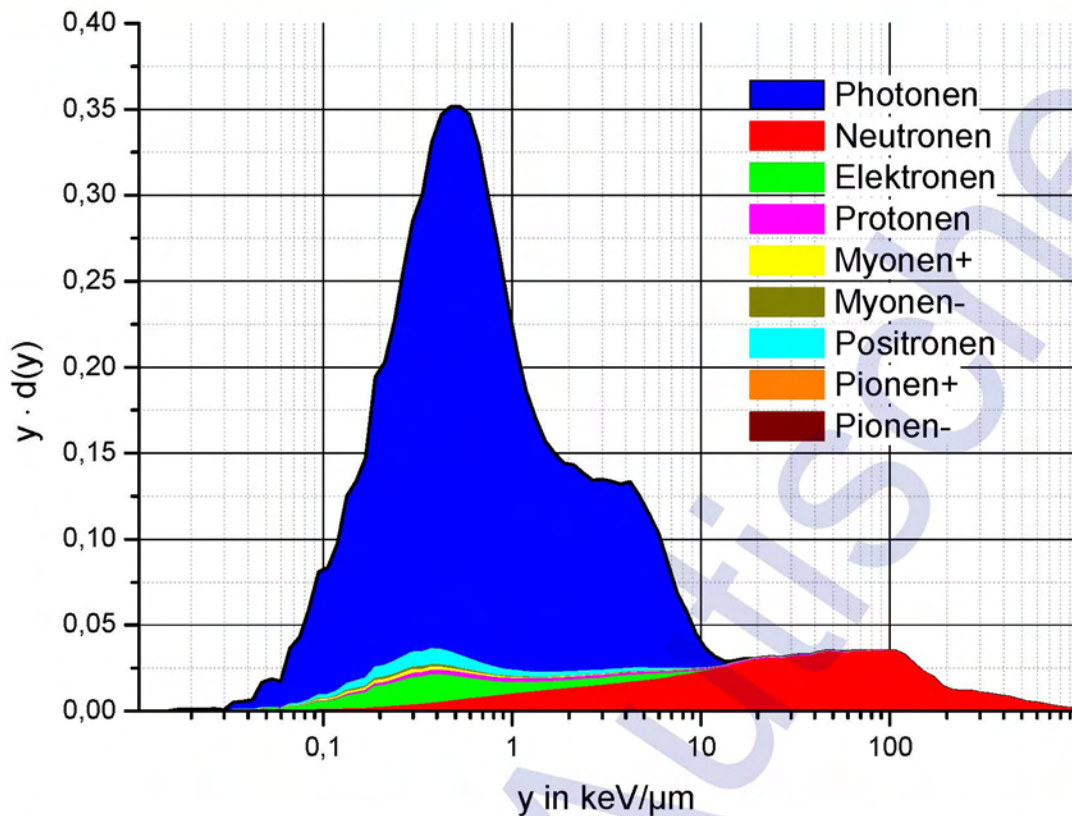


Abbildung 7-55: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

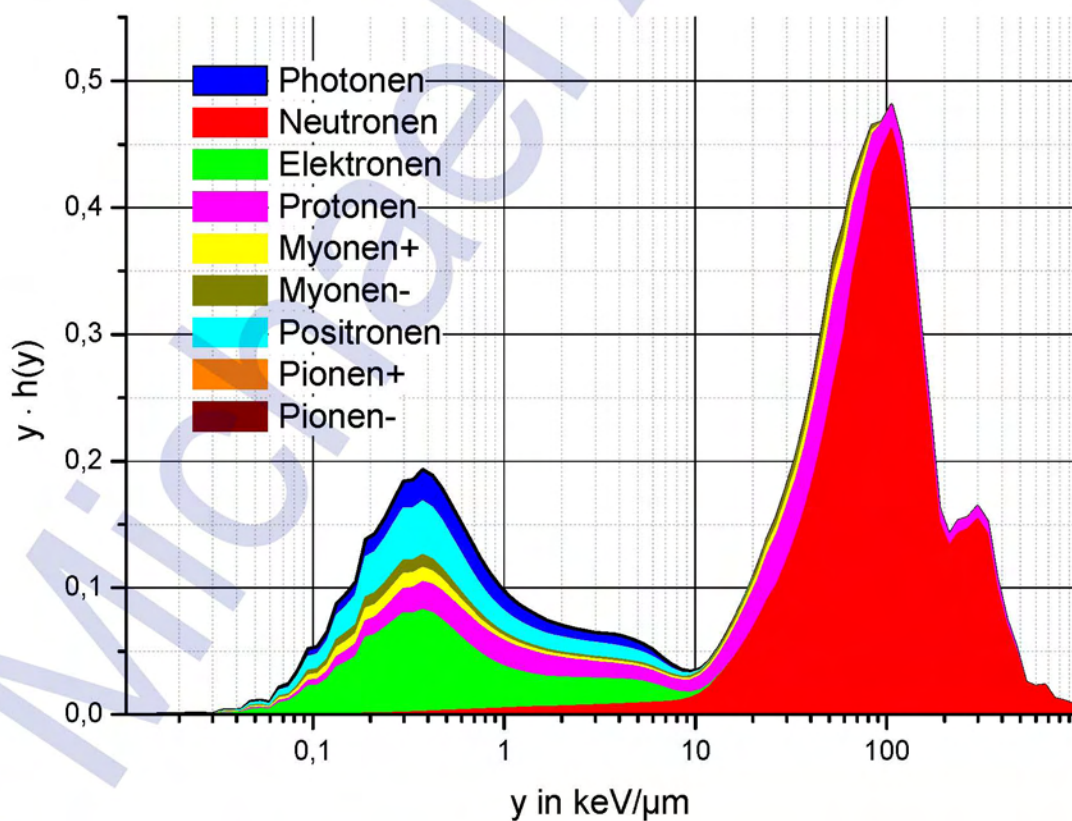


Abbildung 7-56: Simulierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot h(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m mit dem einhüllenden resultierenden dosisnormierten Spektrum bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

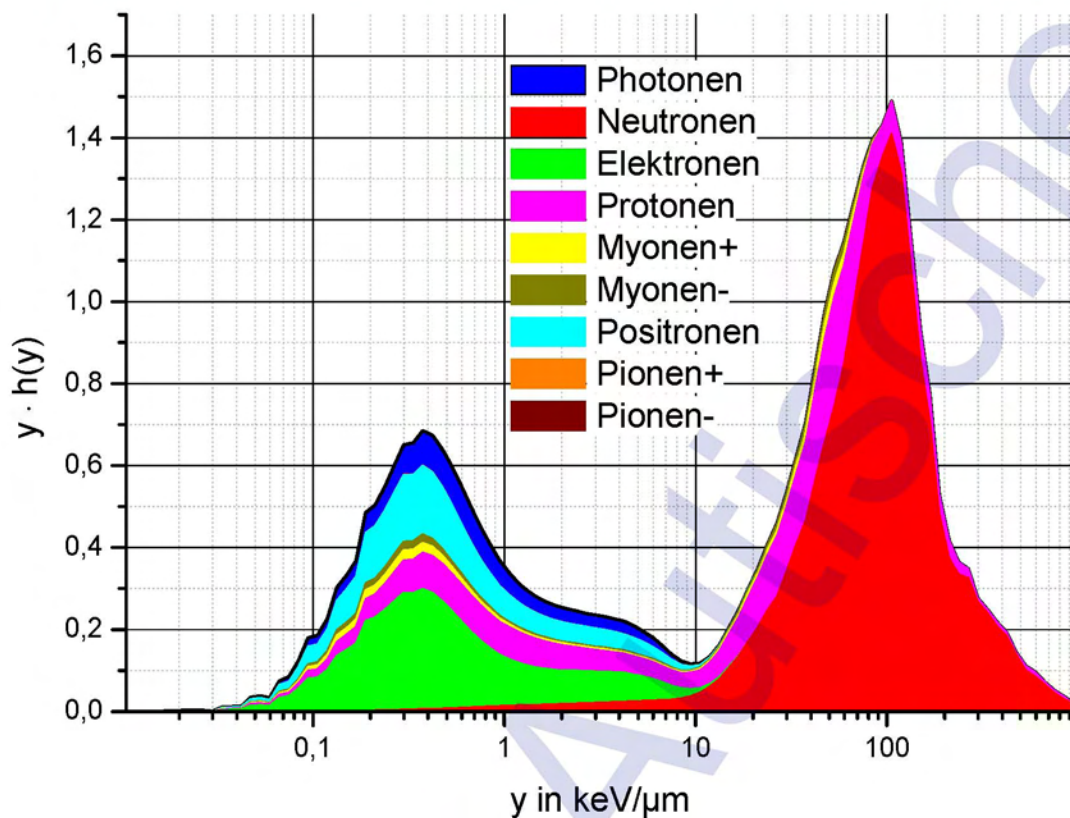


Abbildung 7-57: Simulierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot h(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m mit dem einhüllenden resultierenden dosisnormierten Spektrum und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

Mit Hilfe des Simulationscodes Fluka wurden für dieselben Bedingungen auch Simulationen mit den Geometrien des HAWK-SEPC und des LiuLin durchgeführt. Für den HAWK-SEPC sind die normierten mikrodosimetrischen Spektren der einzelnen Teilchen in Abbildung 7-58 für FL230 und in Abbildung 7-59 für FL380 dargestellt. Zusätzlich zu den normierten Anteilen sind auch die Anteile der Teilchen am gesamt resultieren Spektrum angegeben. Diese sind für die Simulation auf FL230 in Abbildung 7-60 und für FL380 in Abbildung 7-61 dargestellt.

Für LiuLin sind die mikrodosimetrischen Spektren der einzelnen Teilchen in Abbildung 7-62 für FL230 und in Abbildung 7-63 für FL380 dargestellt. Zusätzlich zu den normierten Anteilen sind auch die Anteile der Teilchen am Gesamtspektrum angegeben. Diese sind für die Simulation auf FL230 in Abbildung 7-64 und für FL380 in Abbildung 7-65 dargestellt.



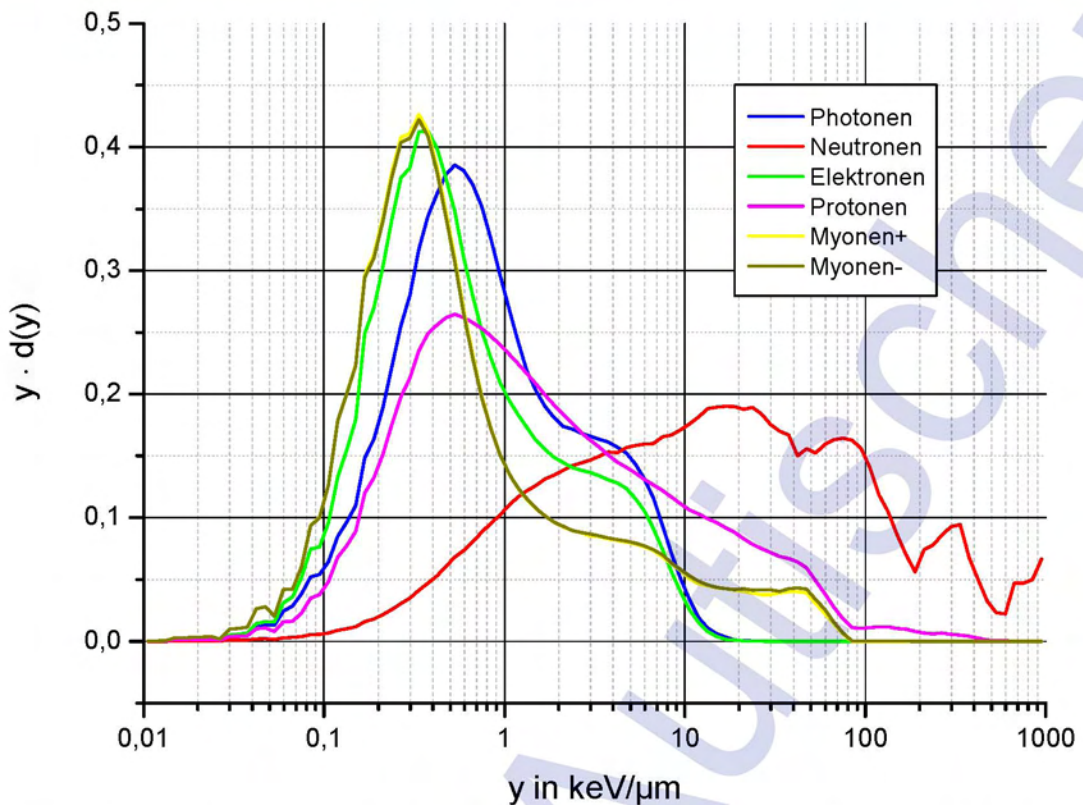


Abbildung 7-58: Simulierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

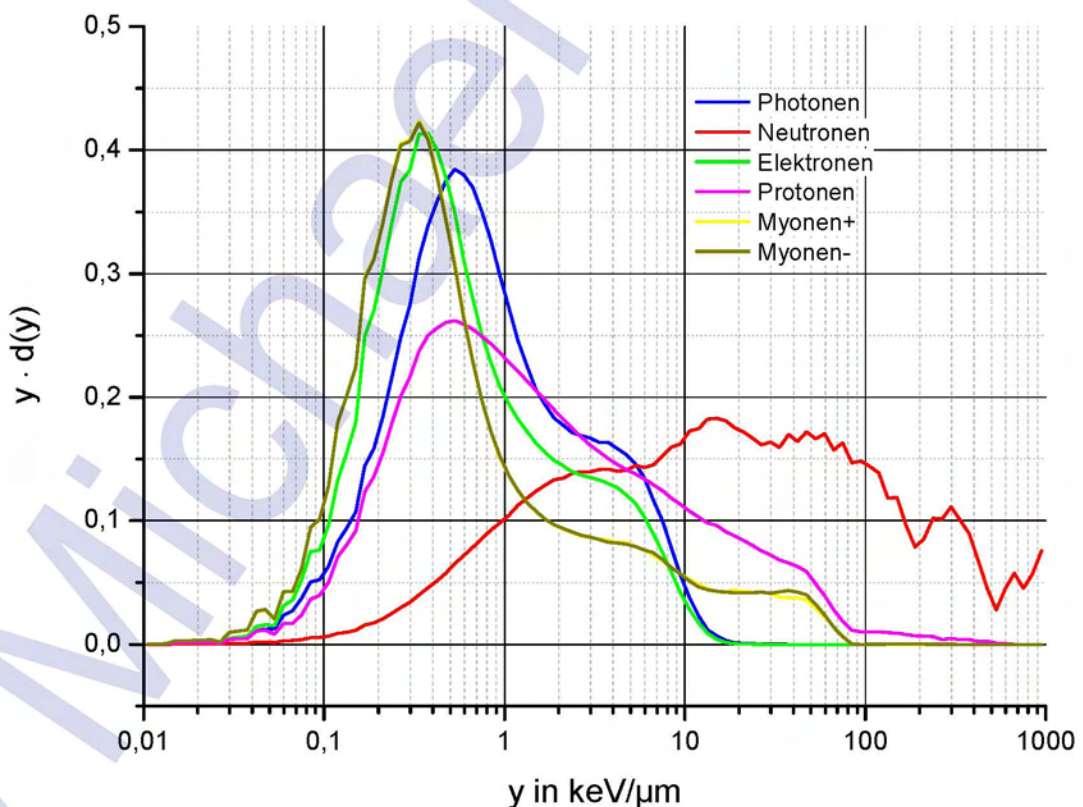


Abbildung 7-59: Mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

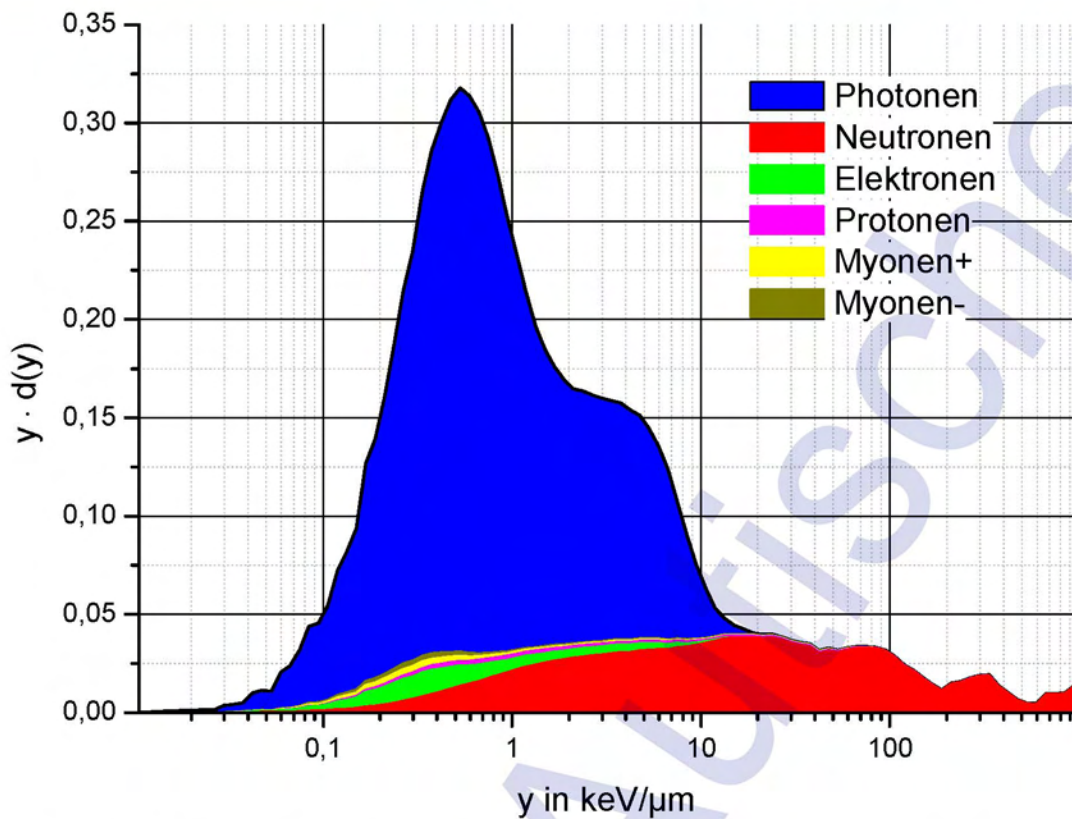


Abbildung 7-60: Mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

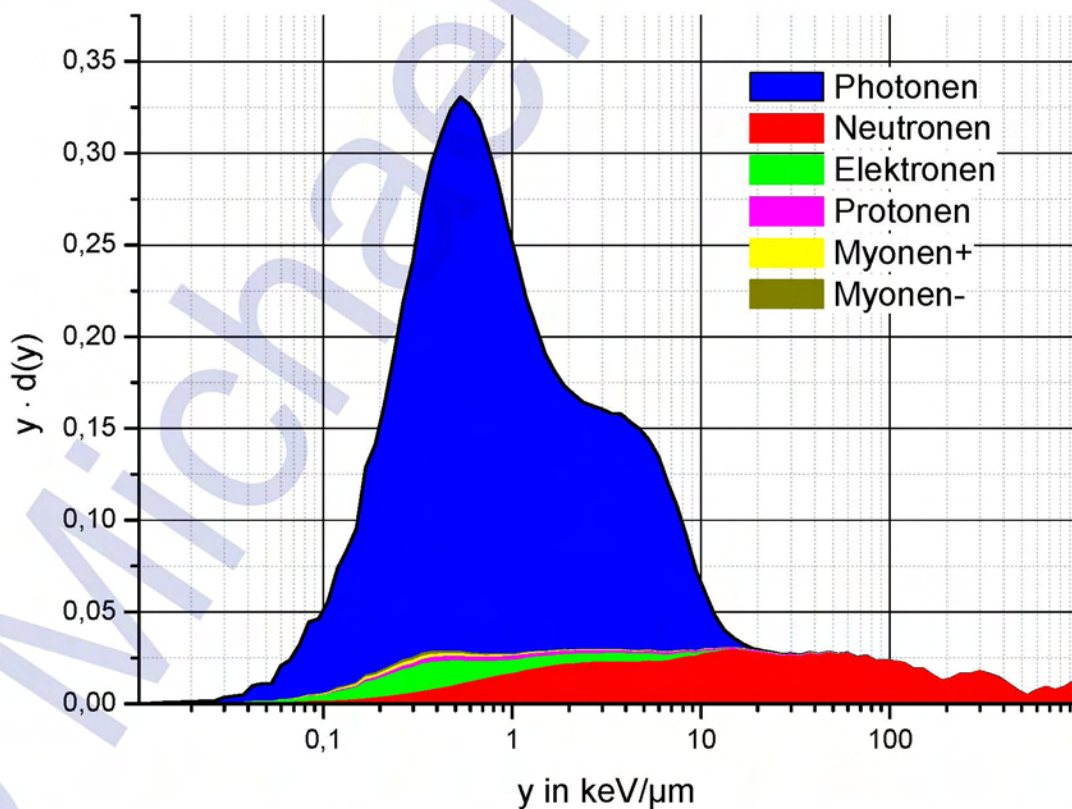


Abbildung 7-61: Mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

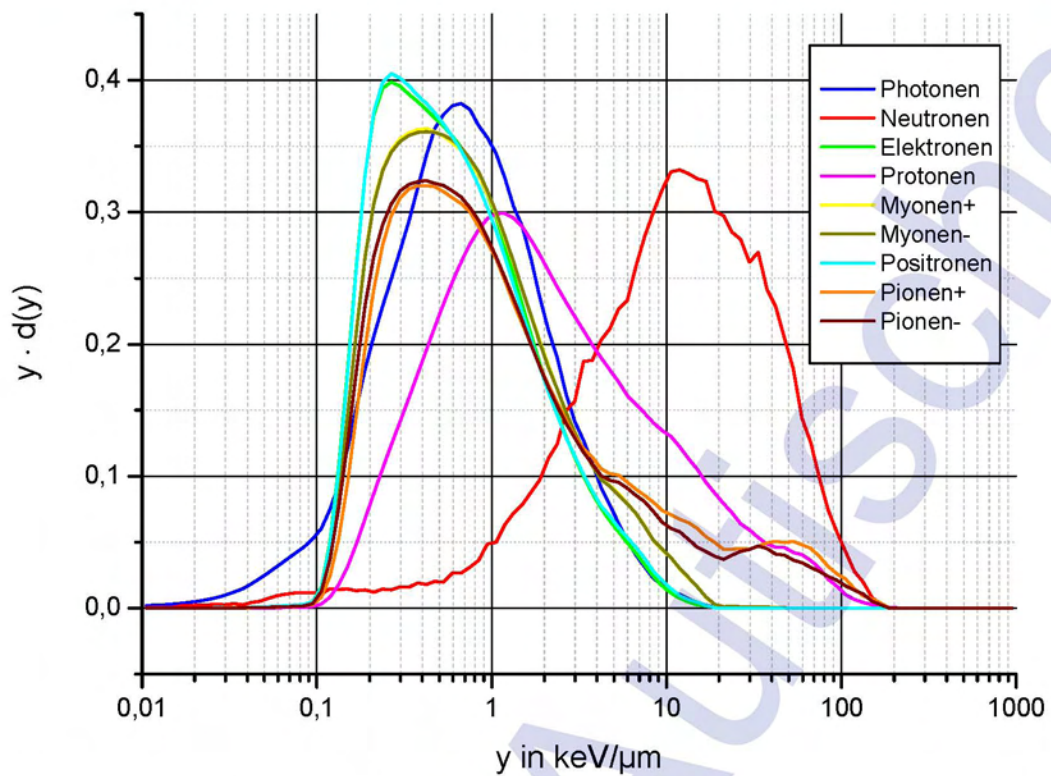


Abbildung 7-62: Mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

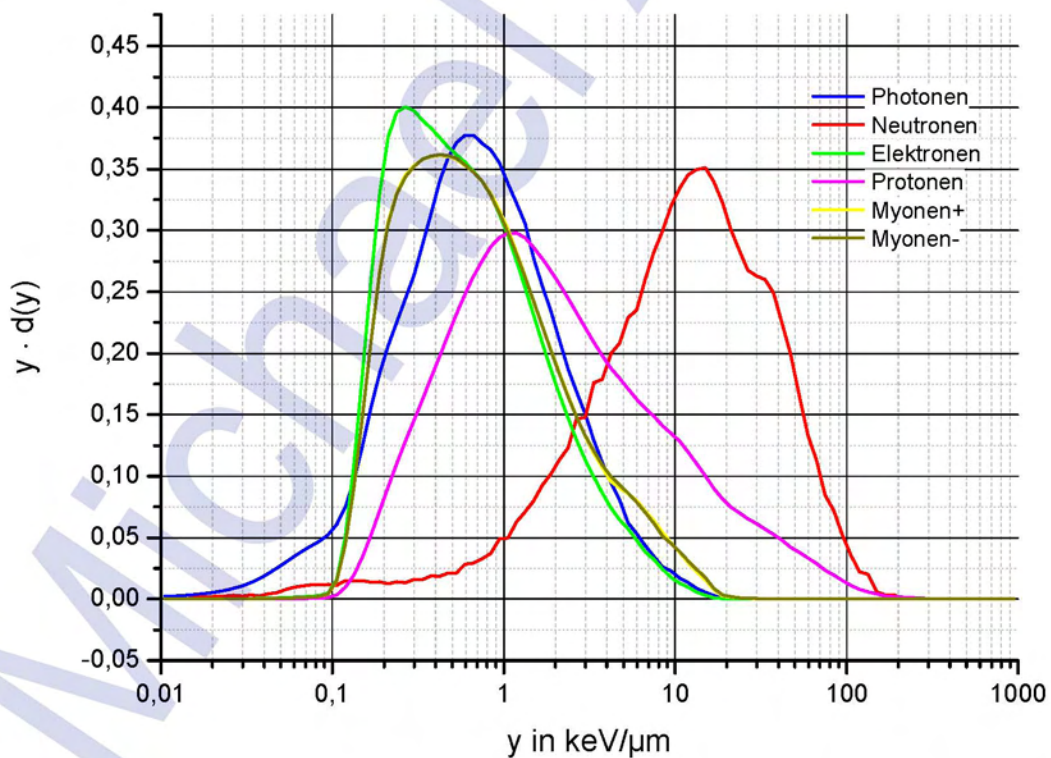


Abbildung 7-63: Mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

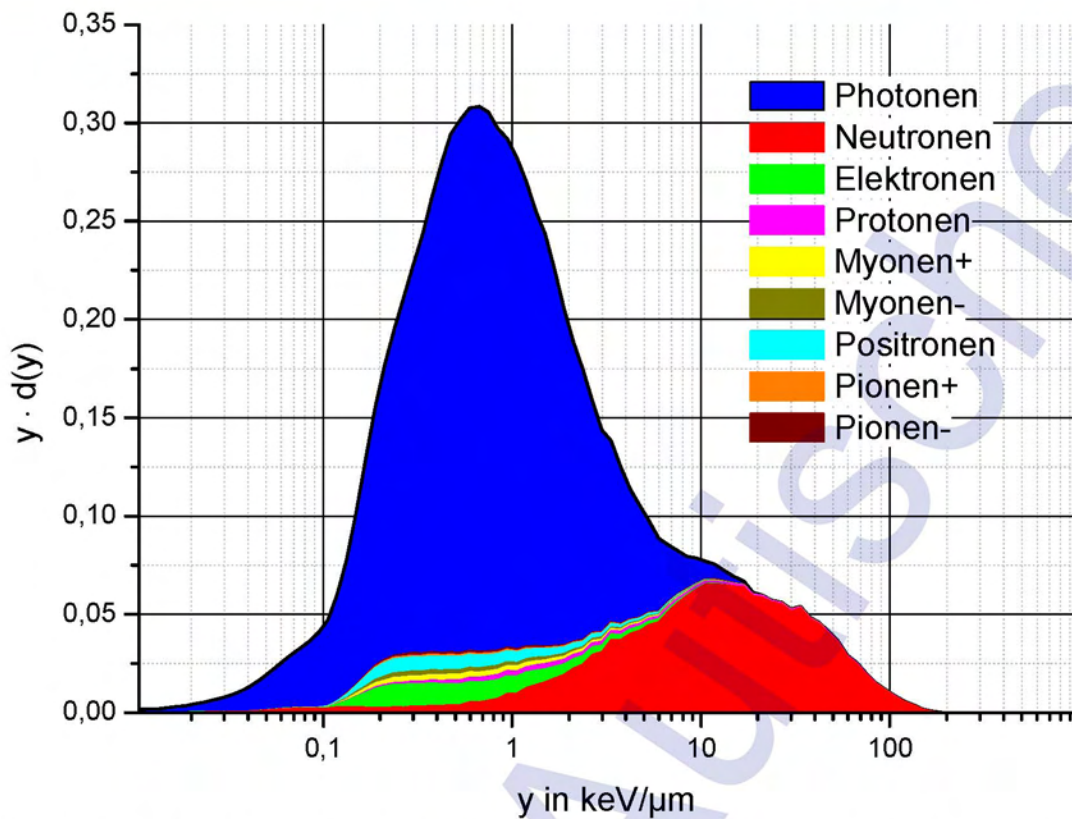


Abbildung 7-64: Mikrodosimetrische Liulin Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

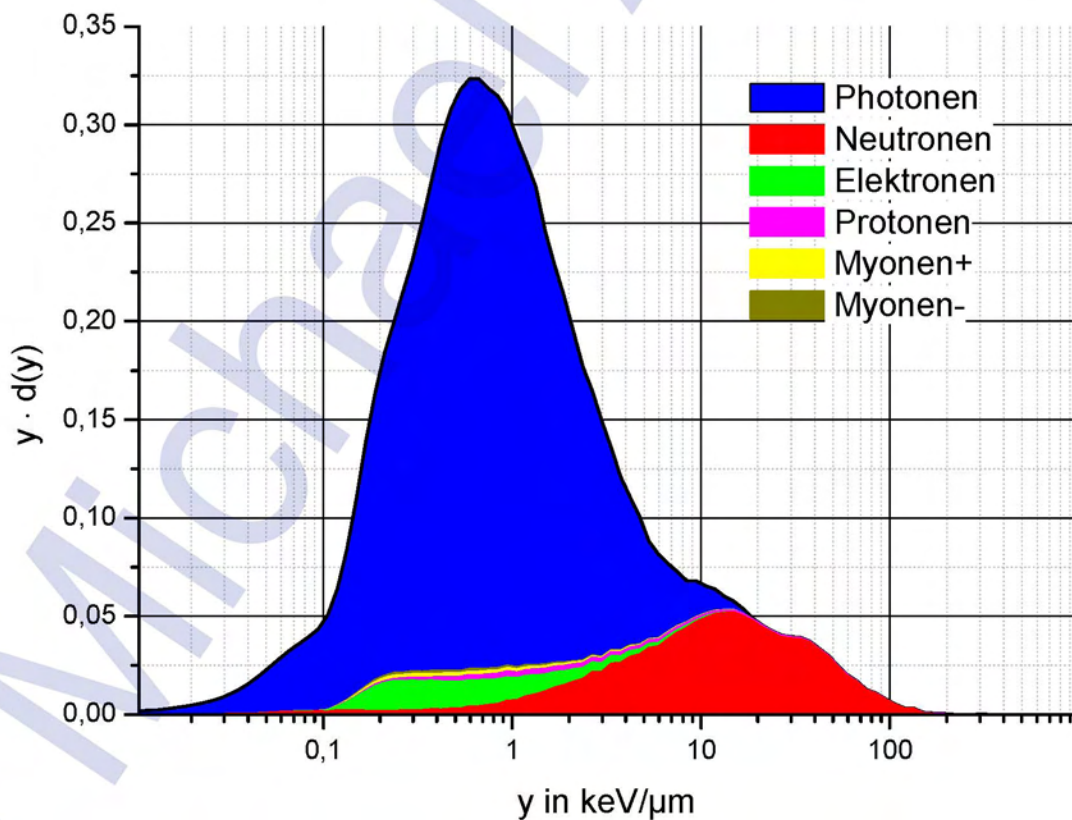


Abbildung 7-65: Mikrodosimetrische Liulin Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.

7.4.2.3 Simulationen unter Extrembedingungen

Zur Abschätzung des Gesamtproblems der Kosmischen Strahlung wurden Simulationen in Konstellationen mit Extrembedingungen von SDP und Cutoff Rigidity durchgeführt. Die Konstellation Max (maximal zu erwartende Dosisleistung) wurde so gewählt, dass die Abschirmung der Kosmischen Strahlung minimal ist. Die dafür gewählten Werte sind eine Cutoff Rigidity von 0,16 GV, was geografisch einer Region an einem der beiden Erdpolen entspricht und ein SDP von 450 MV. Die Konstellation Min (geringste zu erwartende Dosisleistung) wurde genau umgekehrt gewählt, sodass die Abschirmung von der Kosmischen Strahlung maximal angenommen werden kann. Dafür wurden eine Cutoff Rigidity von 18 GV, welche einer Erdregion im Bereich des Äquators entspricht und ein SDP von 1440 MV angenommen. Die verwendeten Werte für diese Simulationen sind in Tabelle 7-14 festgehalten.

Tabelle 7-14: Aufstellung der verwendeten SDP und Cutoff Rigidity Werte für die Simulationen der Konstellationen Min und Max.

	SDP in MV	Cutoff Rigidity in GV
Konstellation Min	1440	18
Konstellation Max	450	0,16

Die ermittelten Äquivalentdosisleistungen in Abhängigkeit der Höhe sind in Abbildung 7-66 für den gesamten Simulationsbereich von 0m bis 70km Höhe dargestellt. In Abbildung 7-67 ist daraus der für die Luftfahrt interessante Bereich von 0m bis 20km entnommen. Die von den beiden Kurven eingeschlossene Fläche gibt den Bereich wieder, der bei unterschiedlichen Simulationsbedingungen erreicht werden kann. Das Pftzermaximum liegt dabei für die Konstellation Max in einer Höhe von 23km, bei der Konstellation Min liegt es bei 18km Höhe. Die maximale Äquivalentdosisleistung am Pftzermaximum liegt in der Konstellation Max bei ca. 16 $\mu\text{Sv/h}$ und bei der Konstellation Min bei ca. 2 $\mu\text{Sv/h}$.

In Tabelle 7-12 sind die Anteile der Teilchenarten an der Äquivalentdosisleistung für beide Konstellationen bei einer Flughöhe von 11500m eingetragen. Diese Höhe entspricht der höheren Messung mit Österreichischen Bundesheer und kann somit auch damit verglichen werden. Ablesbar ist dabei, dass die relativen Anteile von Neutronen und Protonen bei der Konstellation Max deutlich höher sind, aber im Gegenzug Elektronen, Positronen, Photonen und Myonen bei dieser Konstellation geringer sind. Die Pionen leisten wiederum nur einen sehr geringen Anteil zur Gesamtdosisleistung.

Abbildung 7-68 zeigt die Anteile der Teilchenarten an der Äquivalentdosisleistung für beide Konstellationen bei einer Flughöhe von 11500m grafisch. Hier sticht der oben beschriebene Effekt deutlich hervor. Sehr gut ersichtlich ist dabei auch, dass bei der Konstellation Max fast 60% der Äquivalentdosisleistung durch Neutronen verursacht wird. Im Gegensatz dazu, sind bei der Konstellation Min nur 36% der Dosisleistung auf Neutronen zurückzuführen. Ebenso wie bei Neutronen verhält es sich auch bei den Protonen, auch wenn die Änderung nur 8 Prozentpunkte ausmacht.

Der Anteil der Elektronen steigt von der Konstellation Max zu Min in Prozentpunkten am stärksten an, von 10% auf 25%.

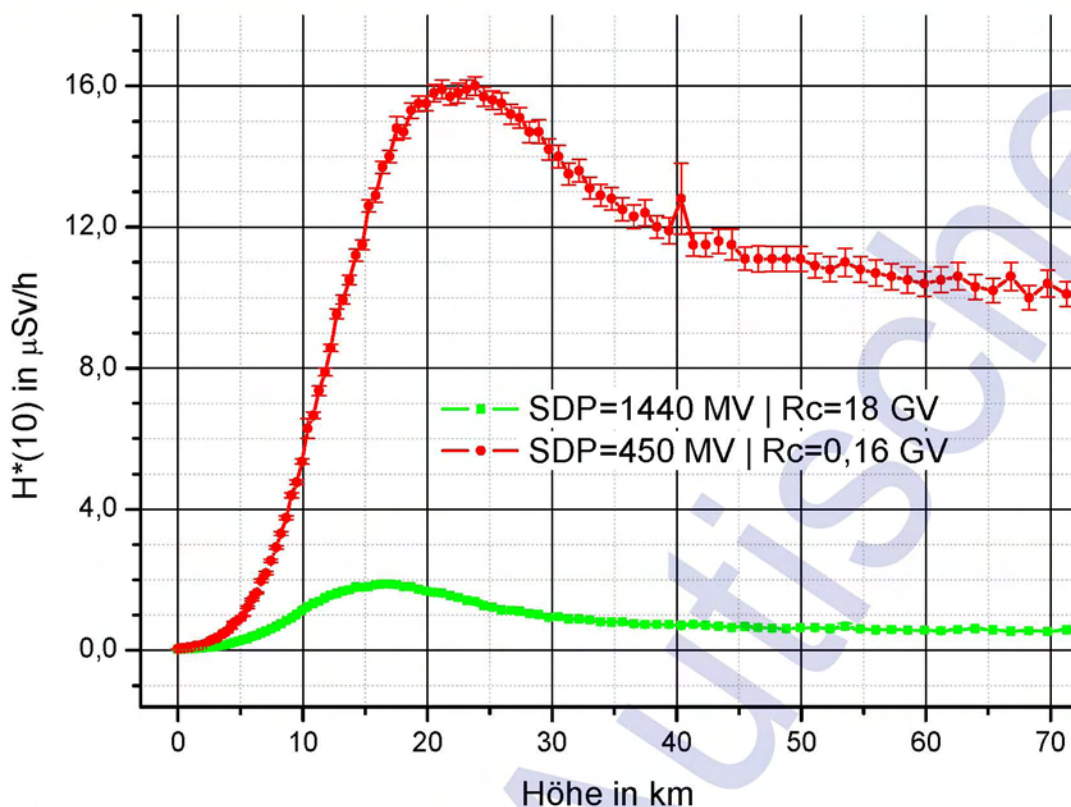


Abbildung 7-66: Äquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellationen Min (CutOff=18GV und SDP=1440 MV) und Max (CutOff=0,16GV und SDP=450MV) bei Höhen von 0-70km.

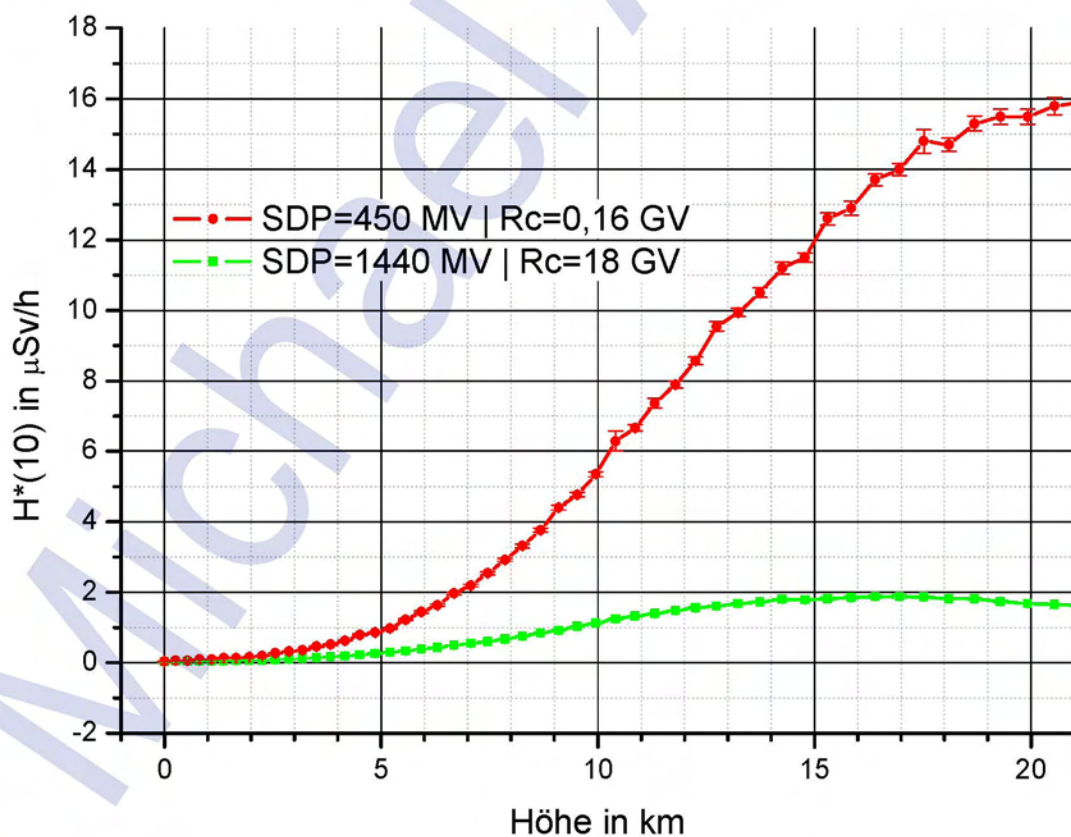


Abbildung 7-67: Äquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellationen Min (CutOff=18GV und SDP=1440 MV) und Max (CutOff=0,16GV und SDP=450MV) bei Höhen von 0-20km.

Tabelle 7-15: Äquivalentdosisanteile der einzelnen Teilchen bei einer Flughöhe von 11500m für die beiden Konstellationen.

Teilchen	% Anteil an der Dosis CutOff=18GV SDP=1440MV	% Anteil an der Dosis CutOff=0,16GV SDP=450MV
Protonen	11,0 ± 0,7	19 ± 1
Photonen	8,2 ± 0,2	3,6 ± 0,1
Neutronen	35,8 ± 0,5	59,7 ± 0,8
Elektronen	24,8 ± 0,6	9,6 ± 0,3
Positronen	14,2 ± 0,4	5,4 ± 0,2
Myonen +	2,97 ± 0,06	1,46 ± 0,06
Myonen -	2,72 ± 0,05	1,27 ± 0,08
Pionen +	0,12 ± 0,01	0,03 ± 0,01
Pionen -	0,10 ± 0,01	0,07 ± 0,03

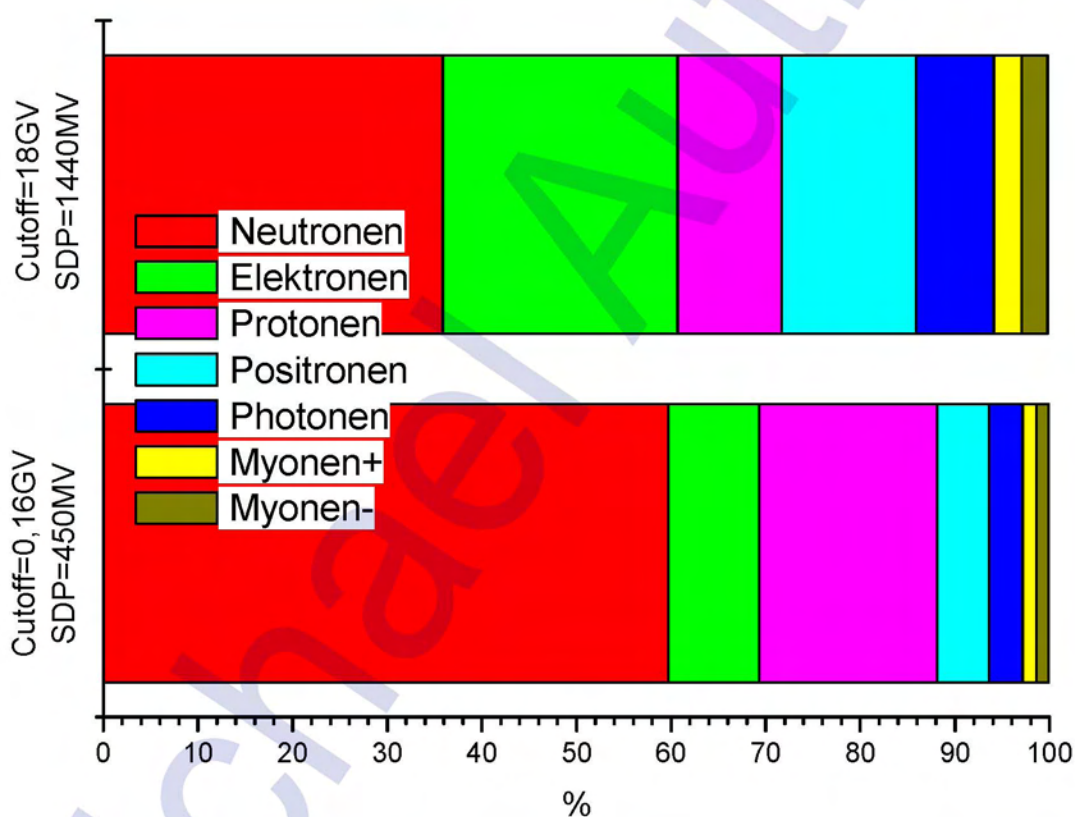


Abbildung 7-68: Relativer Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einer Flughöhe von 11500m bei den beiden Konstellationen CutOff von 0,16GV und SDP von 450 MV sowie CutOff von 18GV und SDP von 1440 MV.

Die absoluten Anteile an der Äquivalentdosisleistung sind in Abbildung 7-69 dargestellt. Bei der Konstellation Max (CutOff=0,16GV und SDP=450 MV) zeigt sich, dass der Anteil der Neutronen an der Äquivalentdosisleistung, mehr als drei Mal so hoch ist als die gesamte Äquivalentdosisleistung in der Konstellation Min (CutOff=18GV und SDP=1440MV).

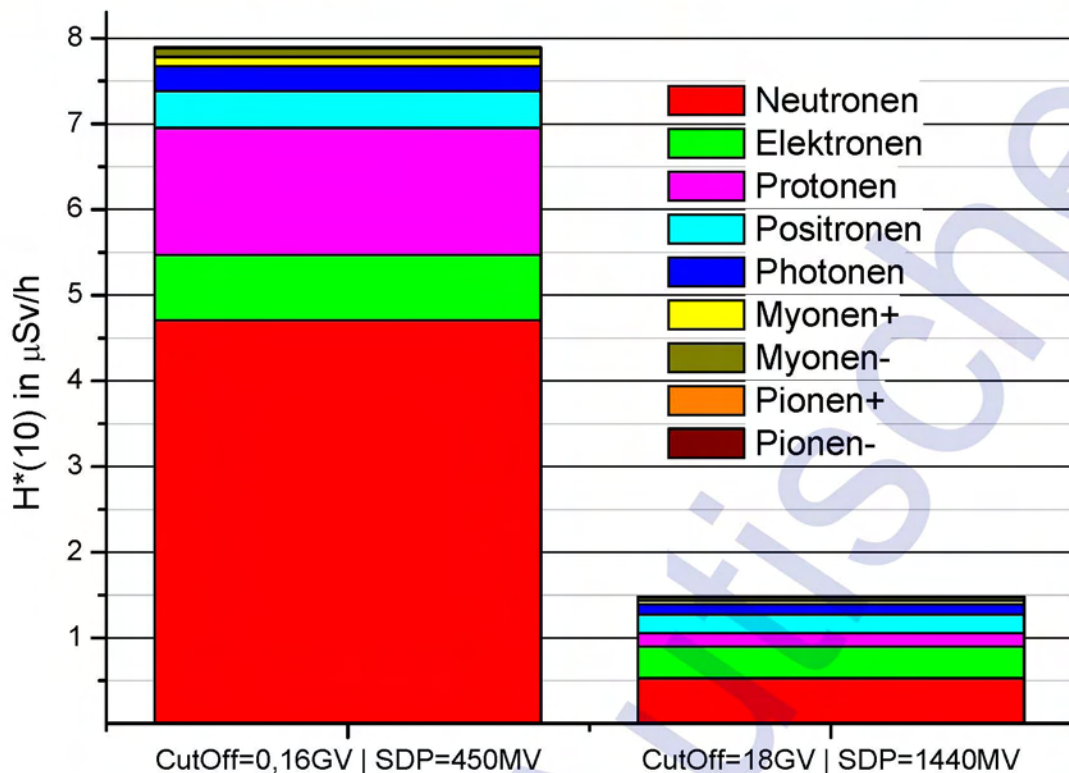


Abbildung 7-69: Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einer Flughöhe von 11500m bei den beiden Konstellationen CutOff von 0,16GV und SDP von 450 MV, sowie CutOff von 18GV und SDP von 1440 MV.

Des Weiteren wurden für diese beiden Konstellationen auch noch die mikrodosimetrischen Spektren bestimmt. Für den Vergleich der Spektren wurde ebenfalls eine Höhe von 11500m (FL380) herangezogen.

Für die beiden Konstellationen (Min: CutOff=18GV und SDP=1440MV, Max: CutOff=0,16GV und SDP=450 MV) sind diese Spektrenauswertungen in Abbildung 7-70 bis Abbildung 7-75 dargestellt.

In Abbildung 7-70 sind die Spektren der anteiligen Teilchen von Photonen, Neutronen, Protonen, Elektronen, Positronen, Myonen und Pionen für die HAWK-TEPC Geometrie bei der Konstellation Min dargestellt. Abbildung 7-71 zeigt die gleiche Darstellung für die Konstellation Max. Abbildung 7-72 zeigt das mikrodosimetrische Summenspektrum für die Konstellation Min in einer Höhe von 11500m mit den jeweiligen Anteilen der verschiedenen Teilchenarten. In Abbildung 7-73 ist analog dazu wiederum das Summenspektrum für die Konstellation Max dargestellt. Die resultierenden mikrodosimetrischen $y_h(y)$ Spektren sind in der Abbildung 7-74 für die Konstellation Min und in der Abbildung 7-75 für die Konstellation Max dargestellt.

Für die weitere Simulationsgeometrie des HAWK-SEPC sind die normierten mikrodosimetrischen Spektren der einzelnen Teilchenarten für die Konstellation Min in Abbildung 7-76 und für die Konstellation Max in Abbildung 7-77 gezeigt. Die Summenspektren sind in den darauffolgenden Abbildungen dargestellt. (In Abbildung 7-78 für die Konstellation Min und Abbildung 7-79 für die Konstellation Max).

Für die Simulationsgeometrie des LiuLin sind die normierten mikrodosimetrischen Spektren der einzelnen Teilchenarten für die Konstellation Min in Abbildung 7-80 und für die Konstellation Max in Abbildung 7-81 gezeigt. Die Summenspektren sind in den darauffolgenden Abbildungen dargestellt. (In Abbildung 7-82 für die Konstellation Min und Abbildung 7-83 für die Konstellation Max).

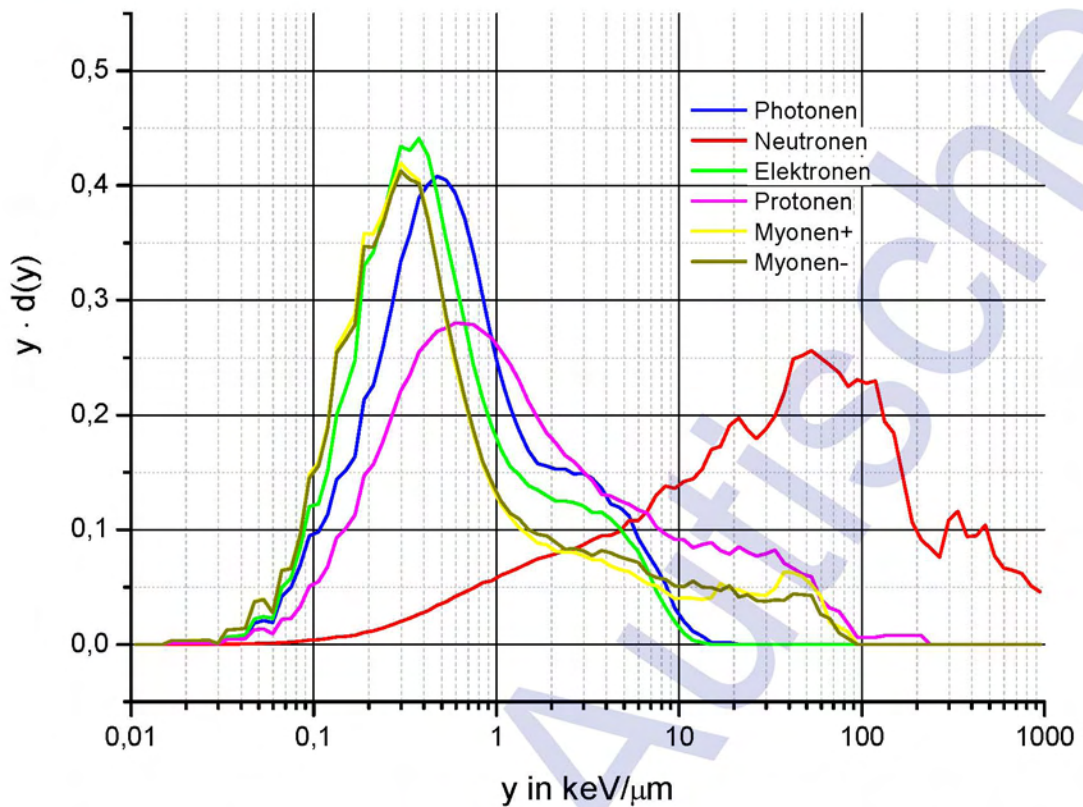


Abbildung 7-70: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

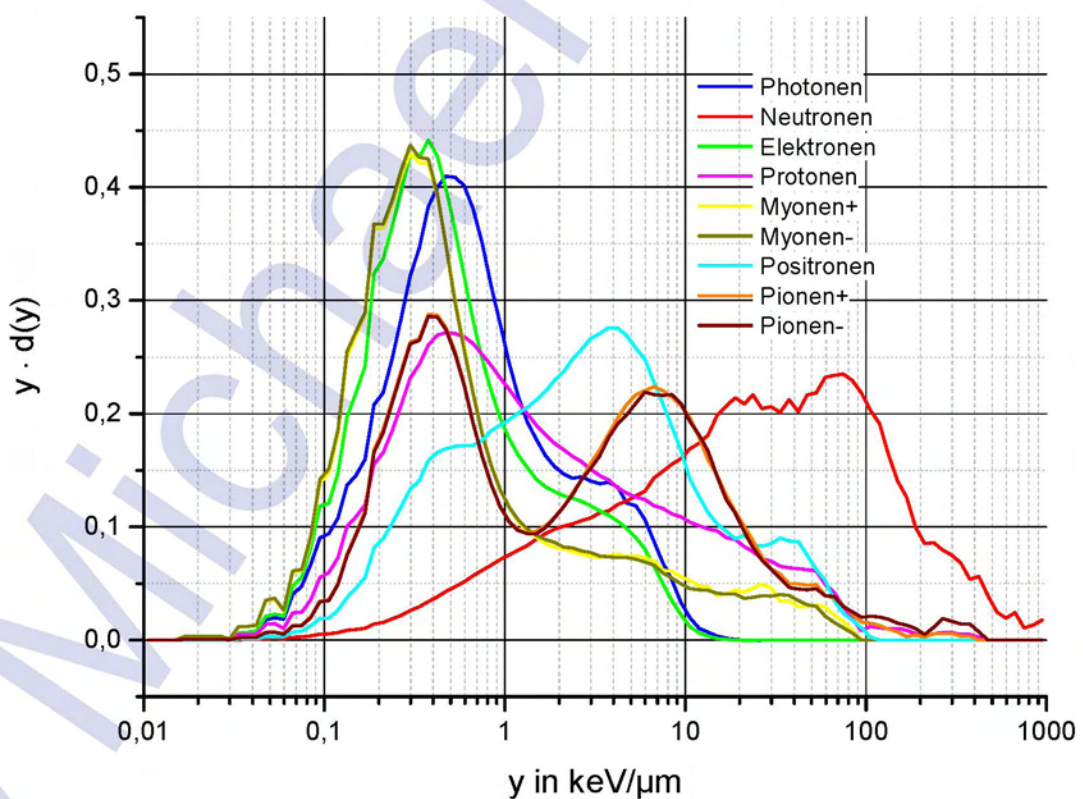


Abbildung 7-71: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

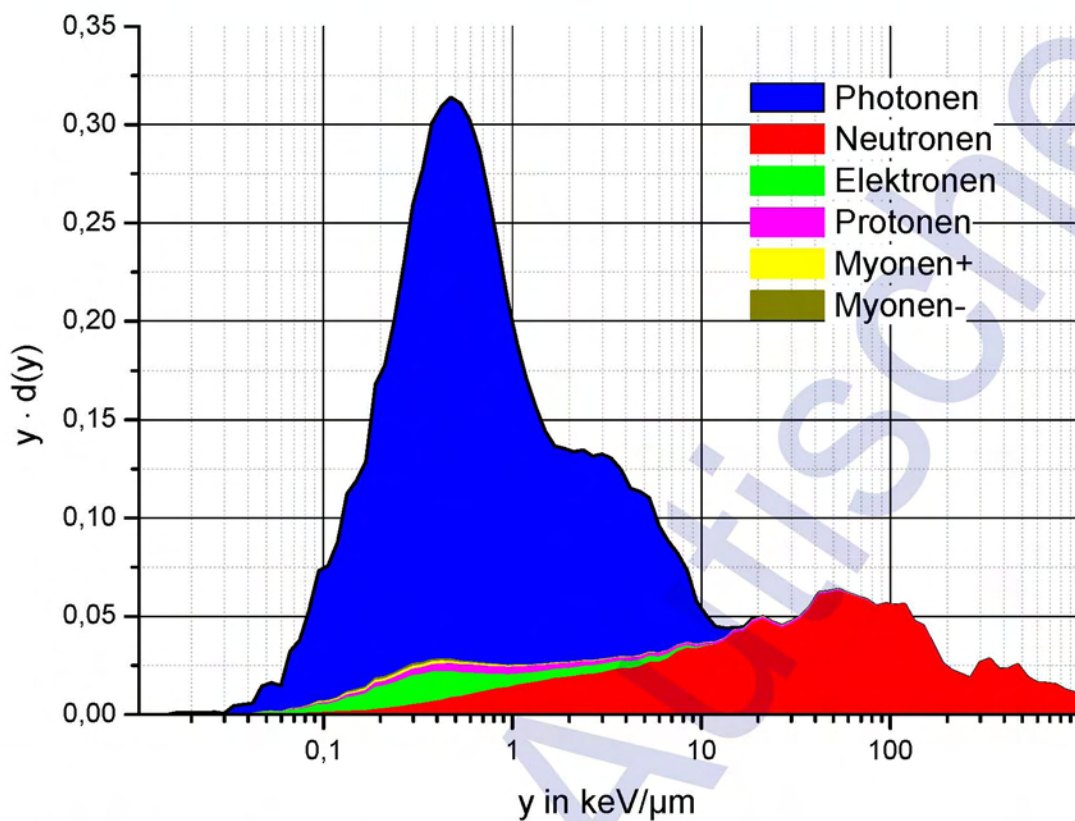


Abbildung 7-72: Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

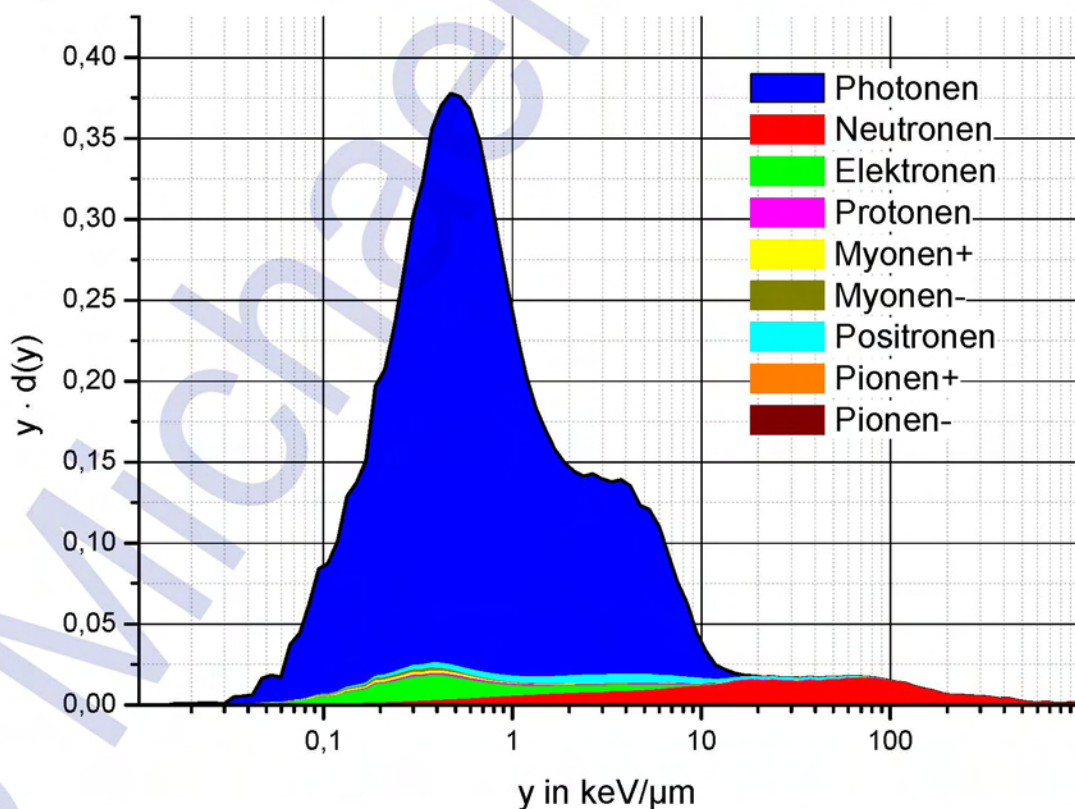


Abbildung 7-73: Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

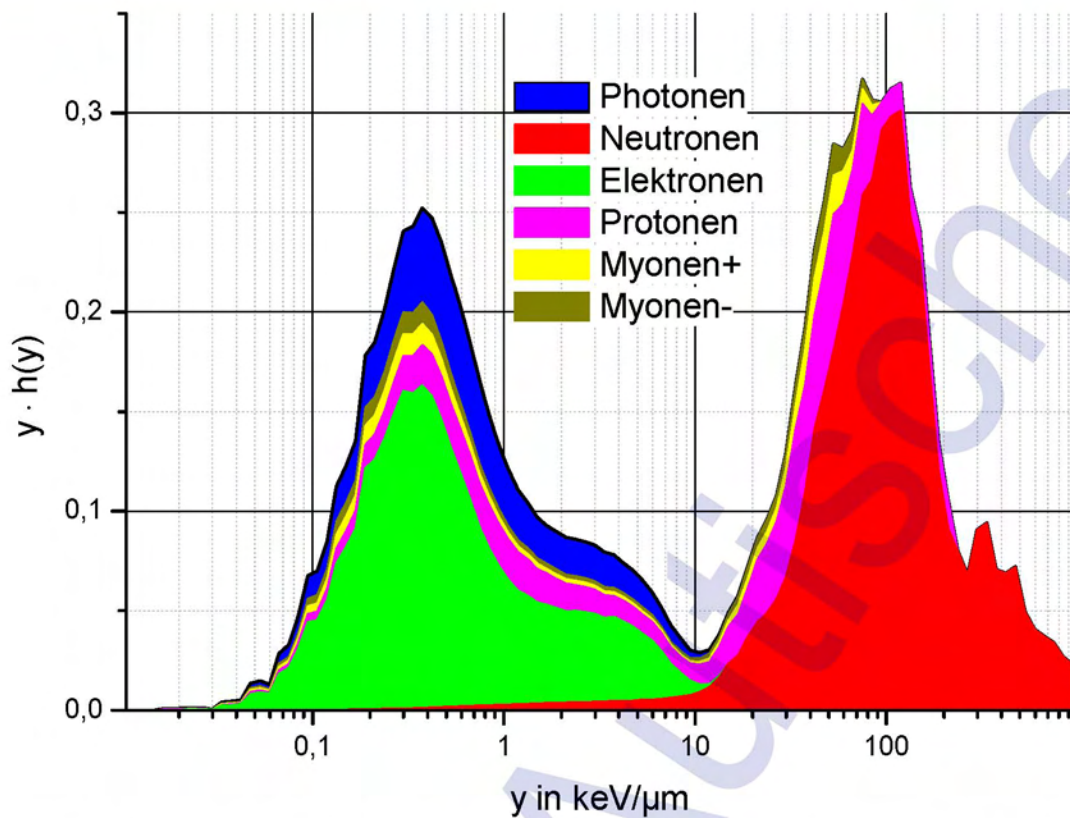


Abbildung 7-74: Simuliertes dosisnormiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y \cdot h(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

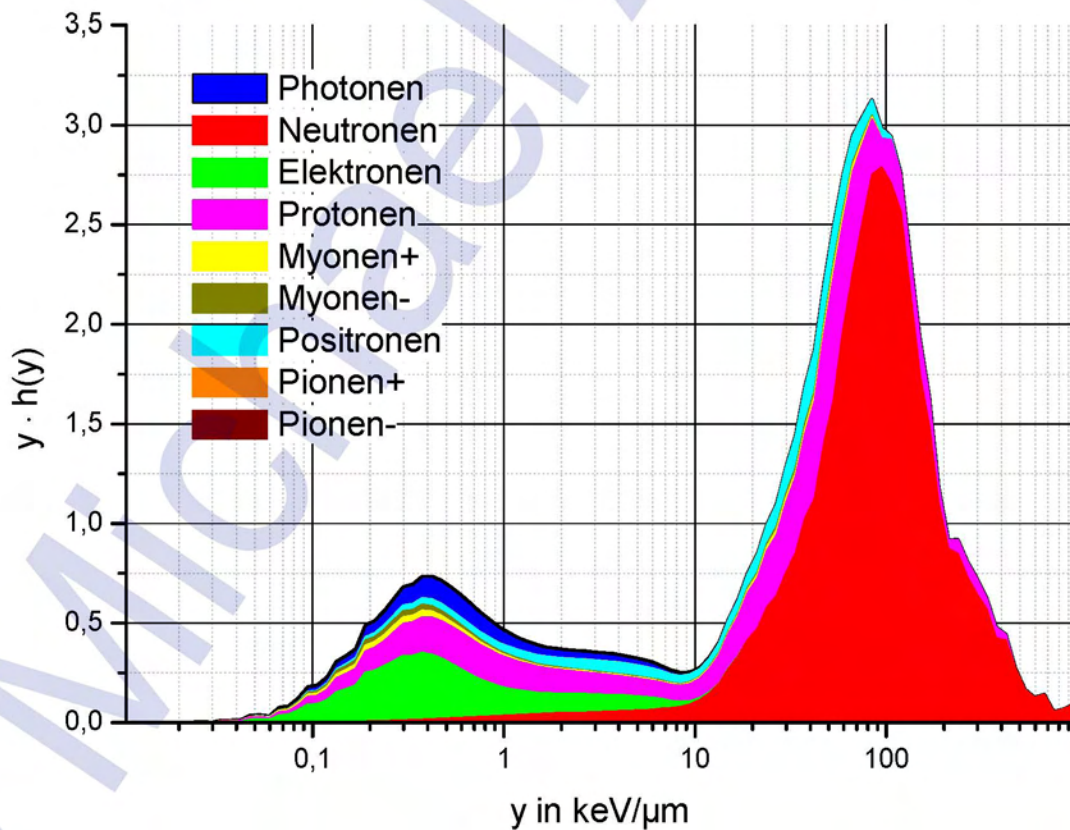


Abbildung 7-75: Simuliertes dosisnormiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y \cdot h(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

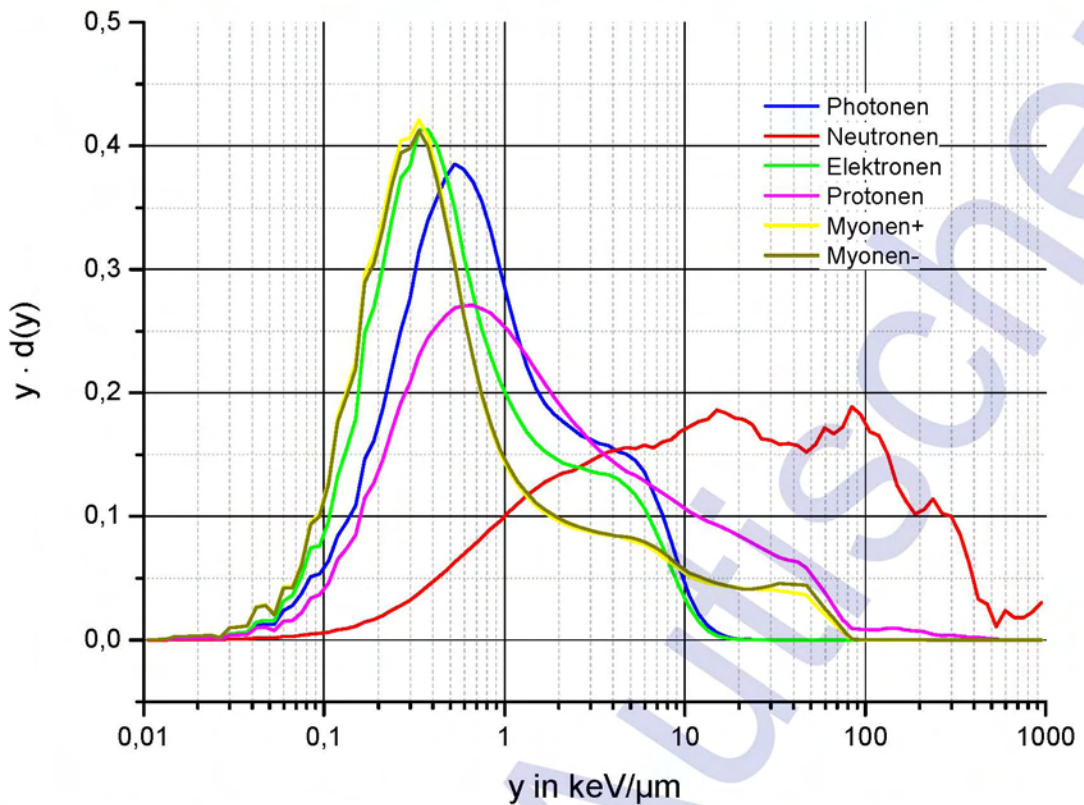


Abbildung 7-76: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

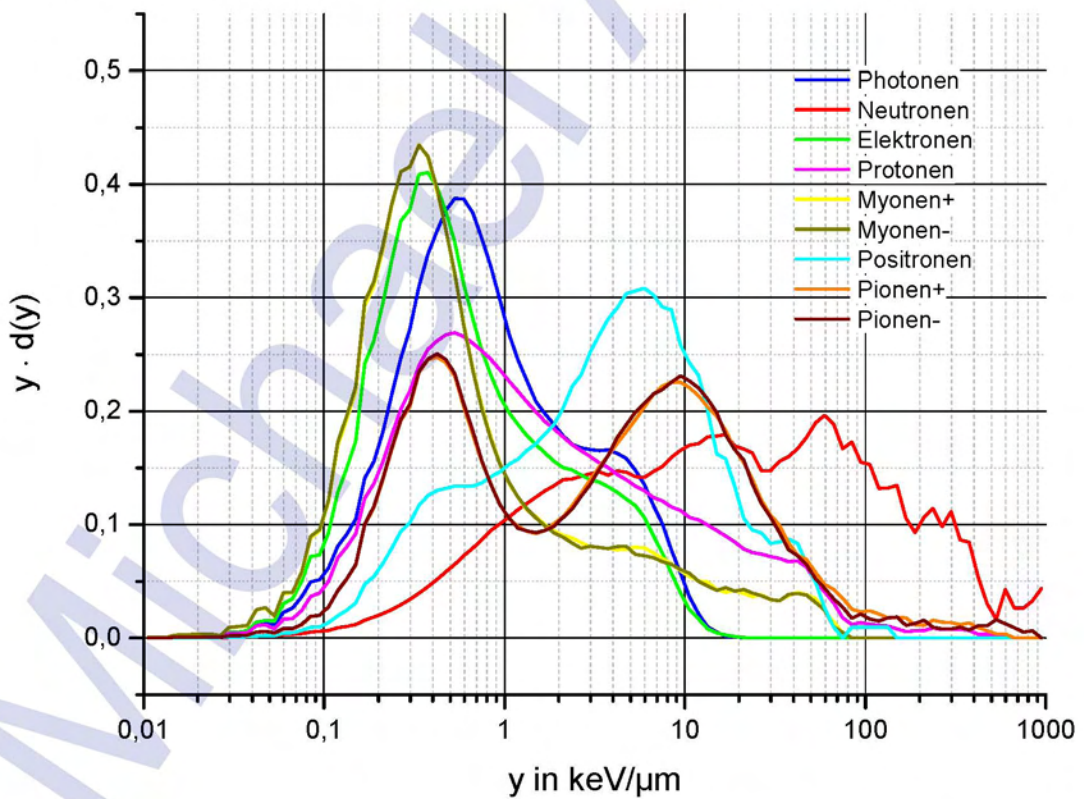


Abbildung 7-77: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

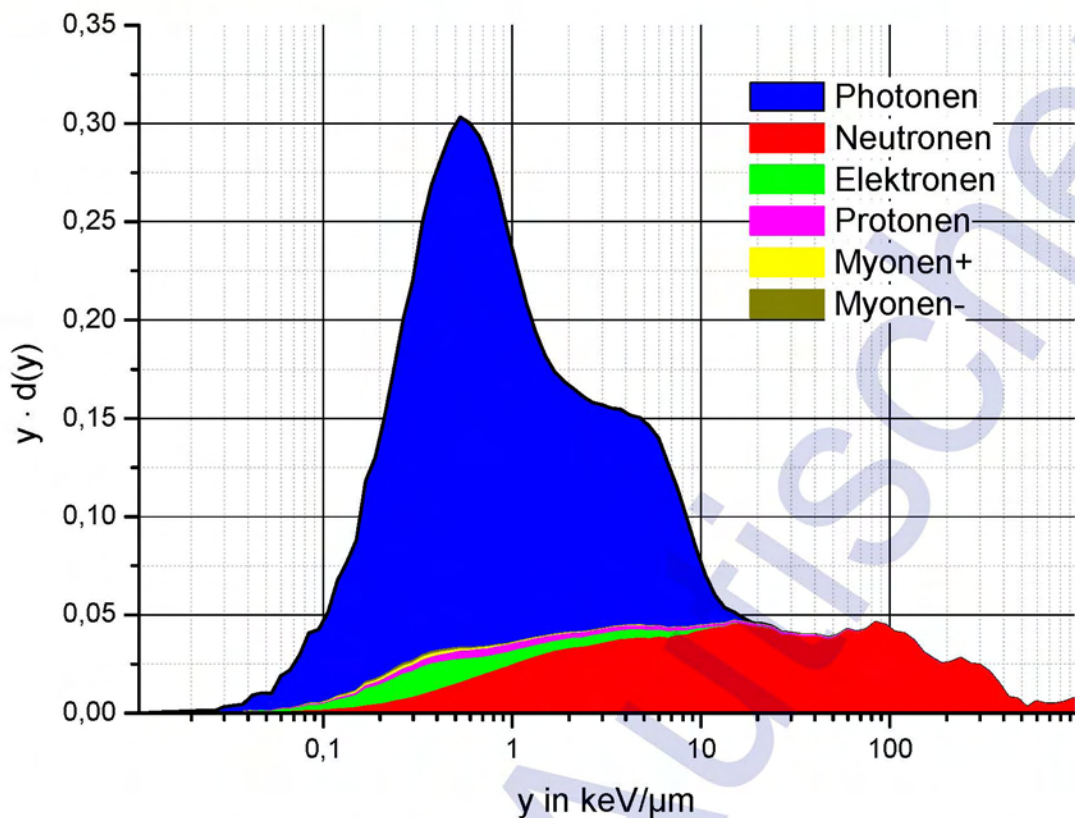


Abbildung 7-78: Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-SEPC Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

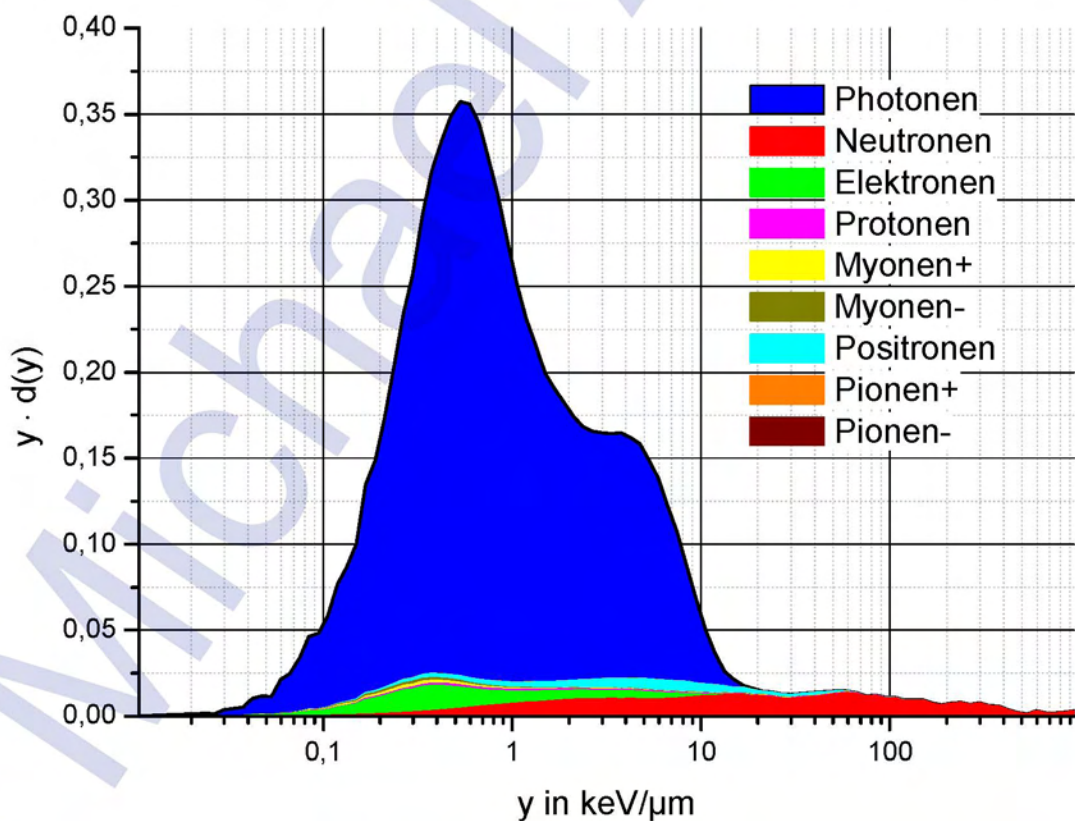


Abbildung 7-79: Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-SEPC Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

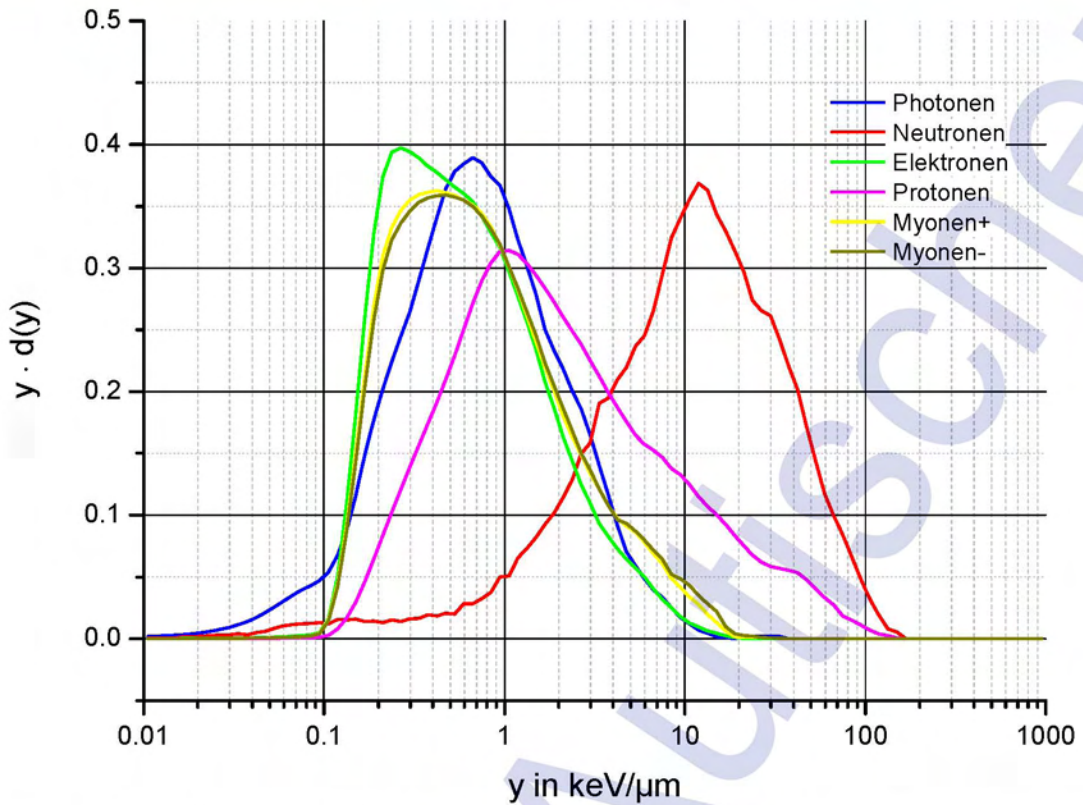


Abbildung 7-80: Simulierte normierte mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

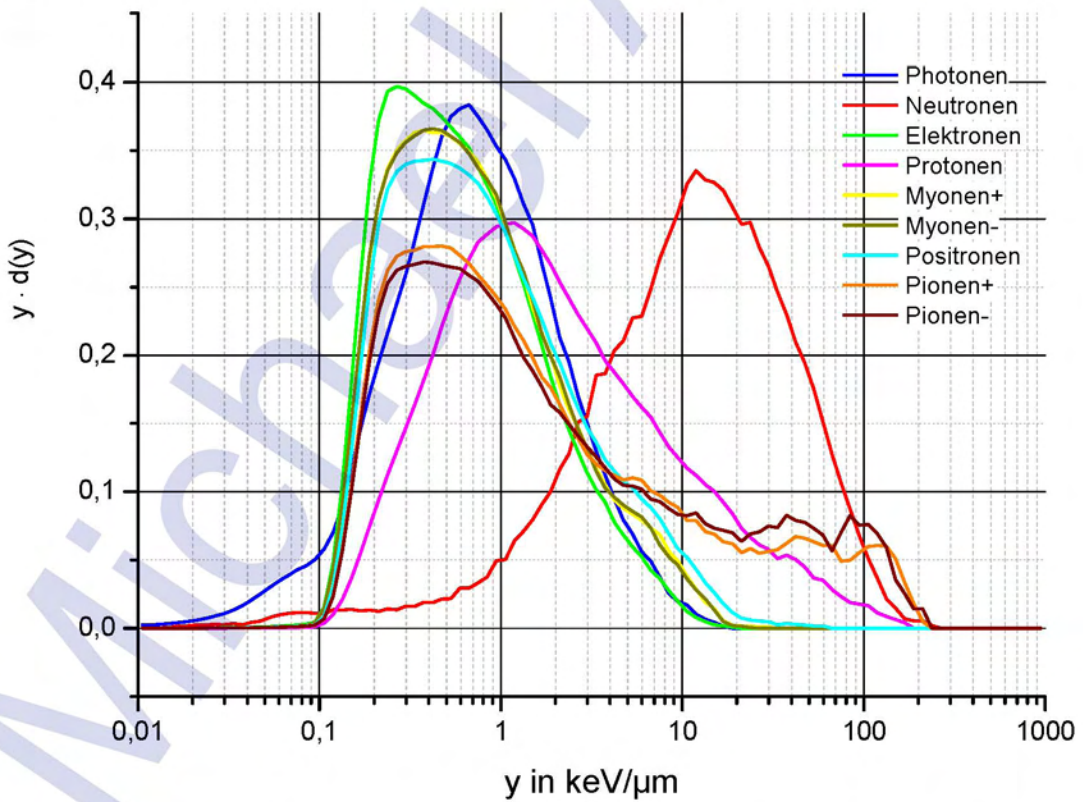


Abbildung 7-81: Simulierte normierte mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y \cdot d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

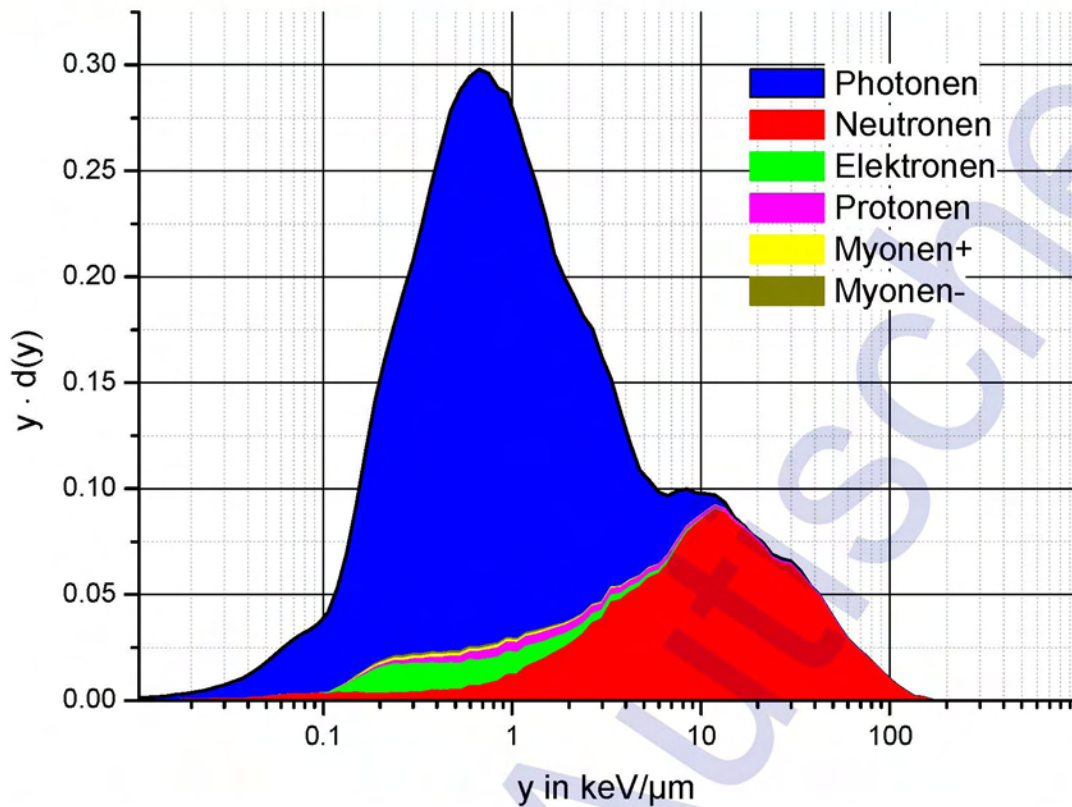


Abbildung 7-82: Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches Liulin Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).

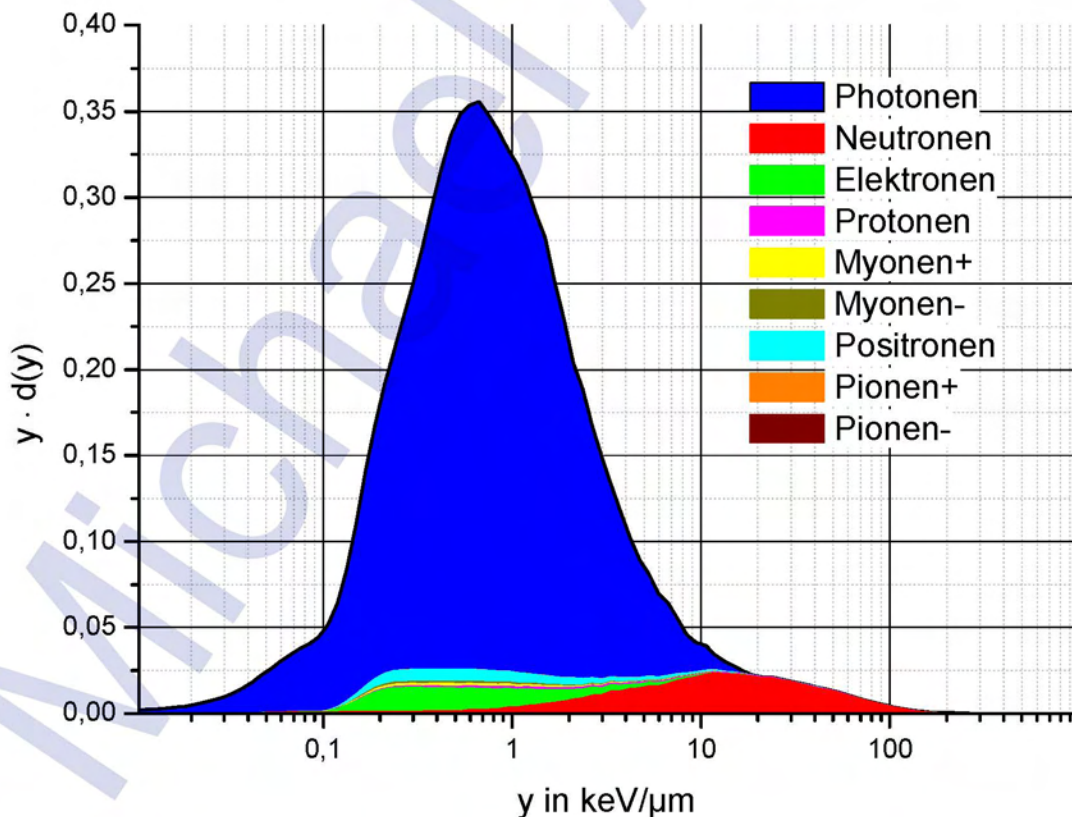


Abbildung 7-83: Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches Liulin Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).

Für die Konstellation Max und Min ist der Vergleich der resultierenden normierten mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot d(y)$ in Abbildung 7-84 dargestellt. Abbildung 7-85 zeigt den selben Vergleich für die absoluten mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot h(y)$. In dieser Darstellung ist vor allem die starke Veränderung im High-LET Bereich erkennbar. Im Low-LET Bereich ist die Fläche unter der Kurve der Konstellation Max ungefähr drei Mal höher als bei der Konstellation Min. Sieht man sich den High-LET Bereich an, so ist die Fläche der Konstellation Max hier mehr als acht Mal so groß wie bei der Konstellation Min. Da die gerade beschriebenen Flächen der Äquivalentdosisleistung entsprechen, erkennt man hierbei, dass ein großer Anteil der Dosisleistungszunahme aus der Veränderung im High-LET Bereich resultiert.

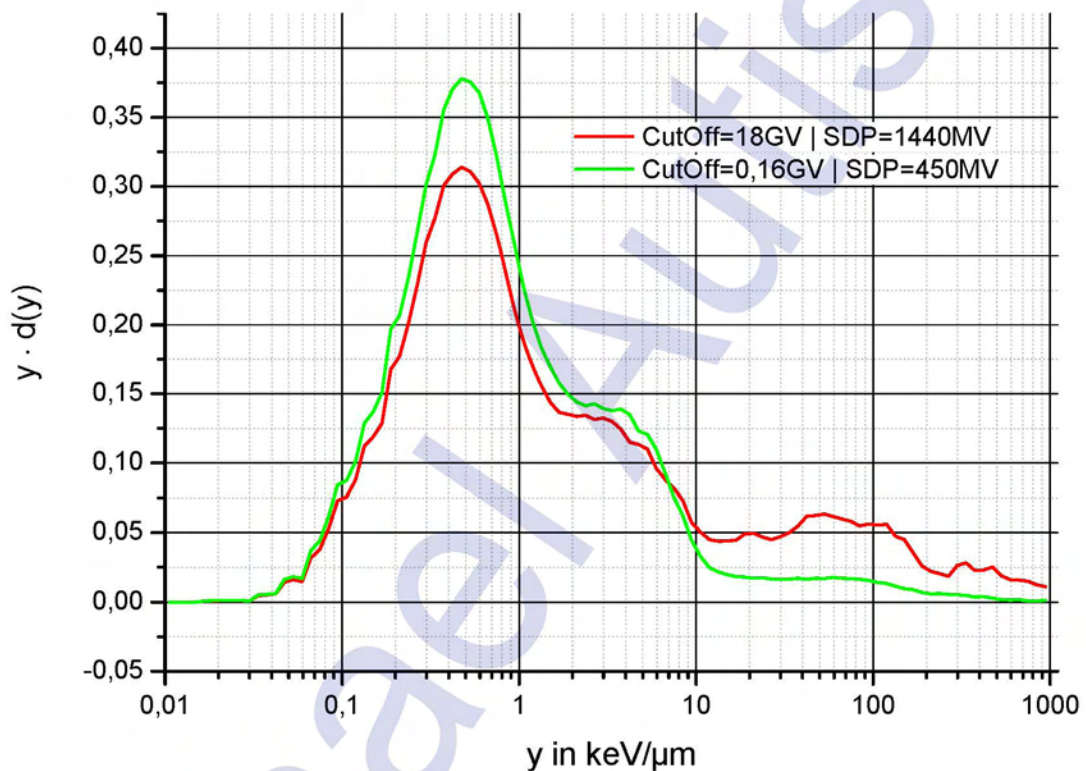


Abbildung 7-84: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV.

In Abbildung 7-86 sind die normierten mikrodosimetrischen Spektren der beiden Konstellationen Min und Max für die Simulationsgeometrie des HAWK-SEPC dargestellt. Der Verlauf und die Änderungen in den Spektren sind sehr ähnlich zu dem Vergleich mit der HAWK-TEPC Geometrie in Abbildung 7-84.

Der selbe Vergleich ist in Abbildung 7-87 für die Simulationsgeometrie des LiuLin dargestellt.

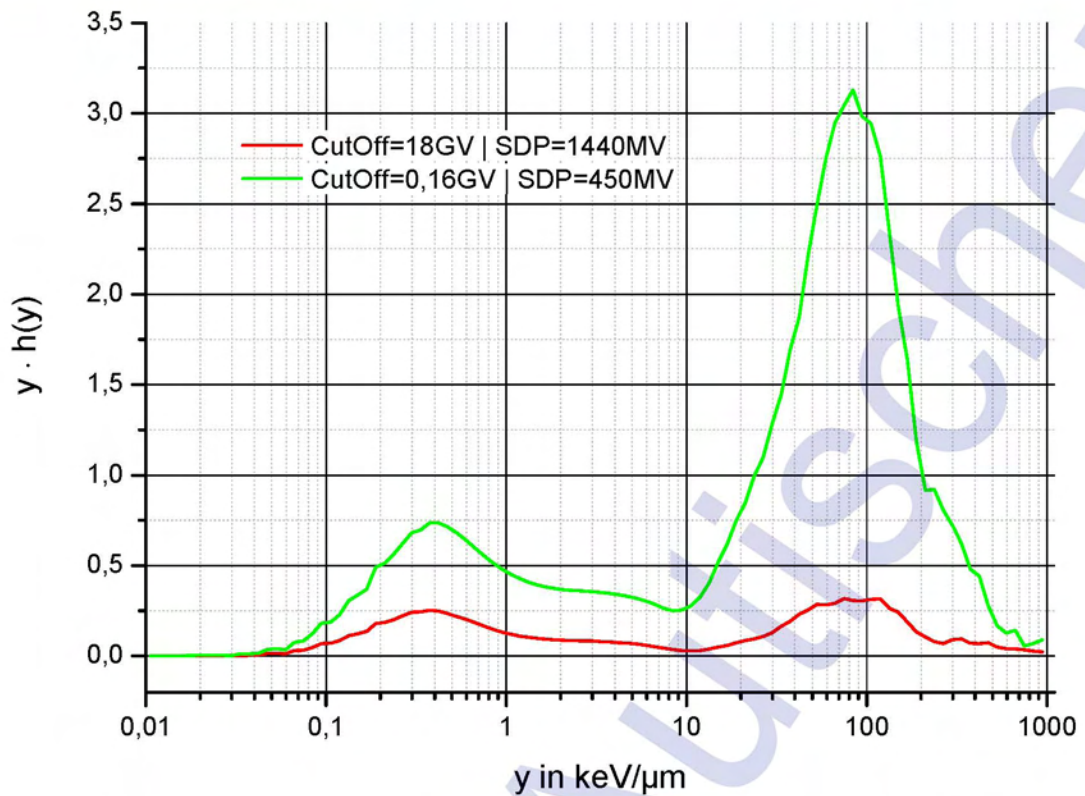


Abbildung 7-85: Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV.

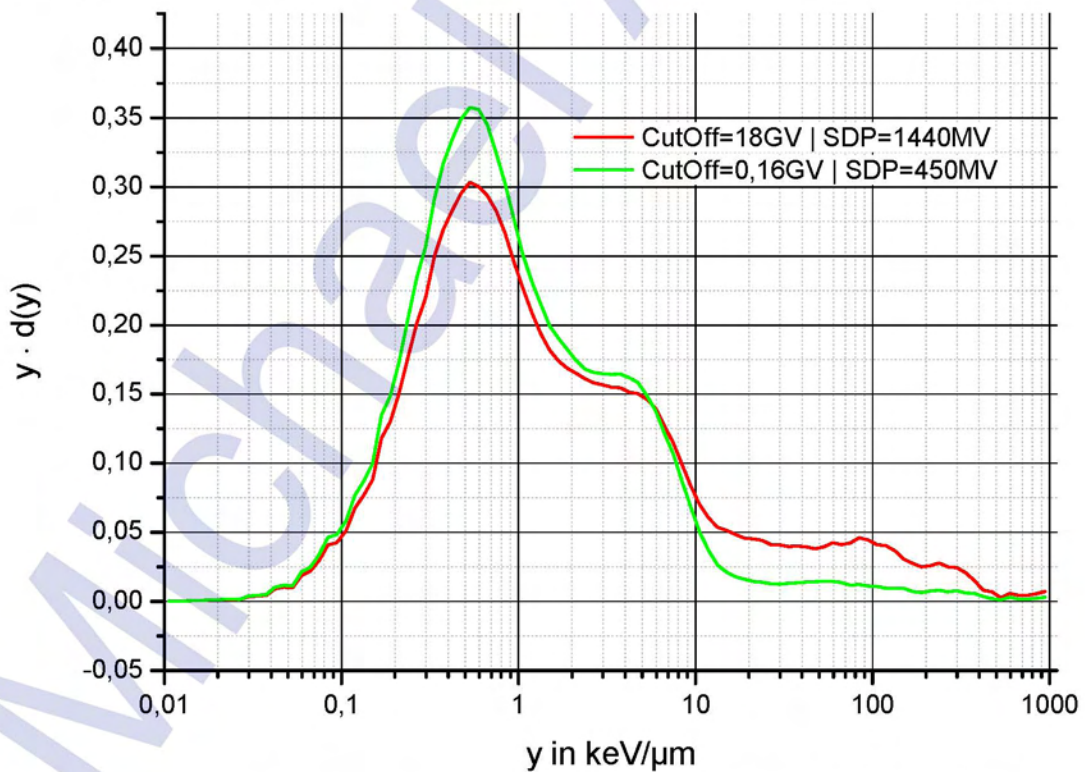


Abbildung 7-86: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV.

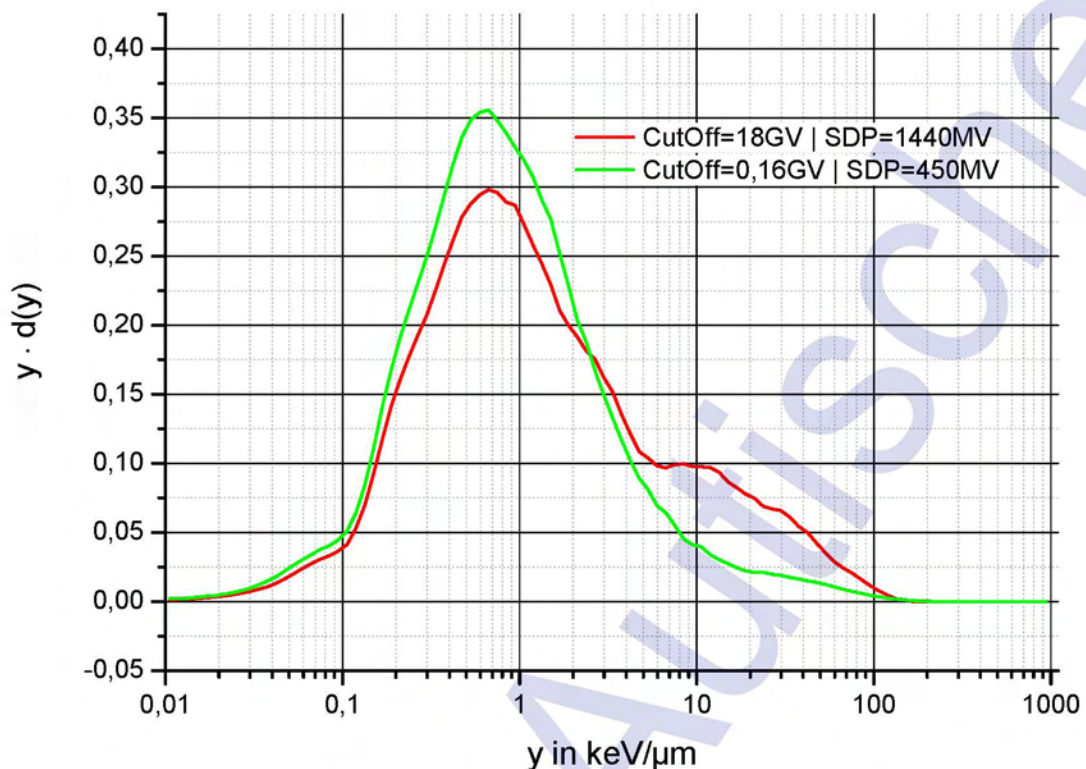


Abbildung 7-87: Simulierte normierte mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV.

Ein weiterer Aspekt ist der Vergleich der einzelnen Teilchenspektren in den beiden Konstellationen Min und Max. Für die HAWK-TEPC Geometrie ist der Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren in Abbildung 7-88 dargestellt. Da hier bei der Form der beiden Spektren keine deutliche Veränderung erkennbar ist, wurden in der weiteren Folge die Vergleiche der absoluten mikrodosimetrischen Spektren $y_h(y)$ durchgeführt. Diese Vergleiche sind für Photonen, Neutronen, Protonen, Elektronen und Myonen in Abbildung 7-89 bis Abbildung 7-93 dargestellt. Die Form der Spektren ist hierbei für die beiden Konstellationen wiederum sehr ähnlich, jedoch die Veränderung in der Fläche zeigt deutliche Unterschiede der Teilchenarten. So ist die größte Veränderung bei den Neutronen in Abbildung 7-90 ersichtlich. Die geringste Veränderung in der Fläche und somit auch in der Äquivalentdosisleistung zeigen die Myonen in Abbildung 7-93 auf.



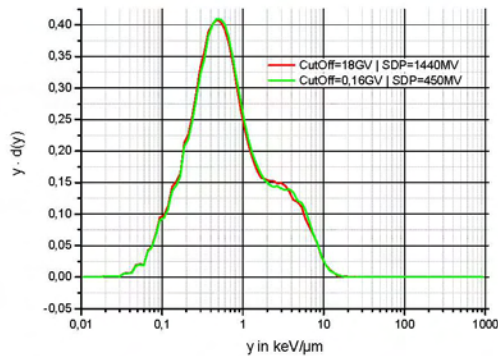


Abbildung 7-88: Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Photonen Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV bei 11.500m.

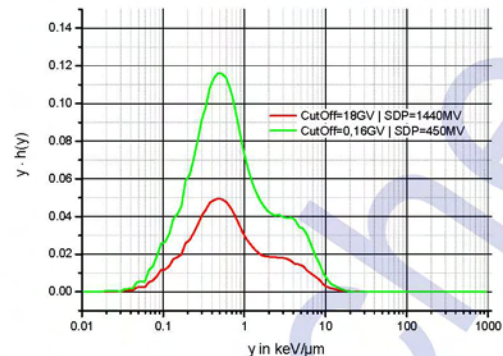


Abbildung 7-89: Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Photonen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV bei 11.500m.

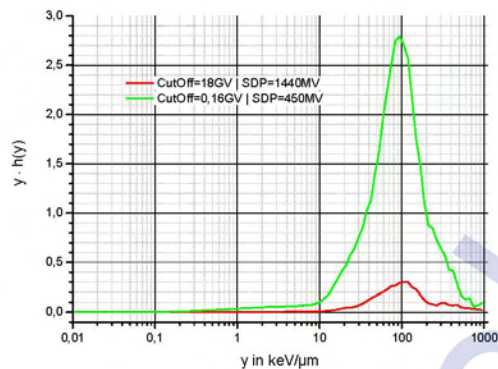


Abbildung 7-90: Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Neutronen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV bei 11.500m.

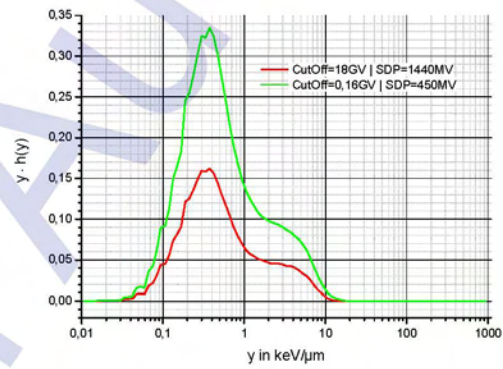


Abbildung 7-91: Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Elektronen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV bei 11.500m.

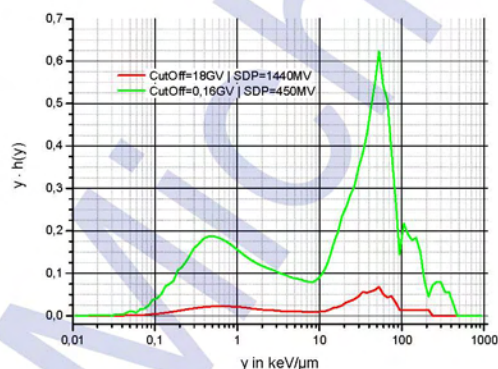


Abbildung 7-92: Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Protonen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV bei 11.500m.

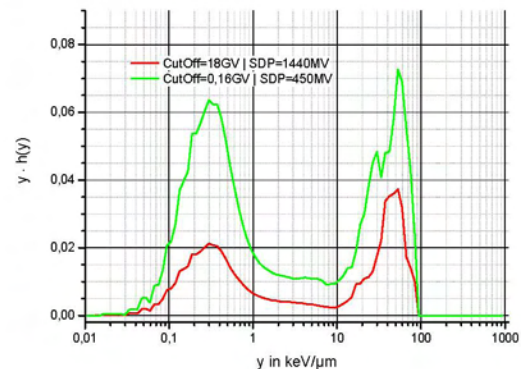


Abbildung 7-93: Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Myonen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV | SDP=450MV und CutOff=18GV | SDP=1440MV bei 11.500m.

8 Vergleich von Simulationen und Messungen

Ein Vergleich von Simulationen und dazugehörigen Messungen wurde durchgeführt, um die Simulationen zu evaluieren. Auf Grund dessen, dass das LiuLin Instrument erst nach Fertigstellung sämtlicher Simulationen bereitstand, war es nicht möglich die Vergleiche für alle durchzuführen. Zur Veranschaulichung der Übereinstimmung der Simulationen wurden aber nachträglich noch Messungen von meinen Kollegen mit dem Gerät durchgeführt. Ein solcher Vergleich ist für ^{60}Co und ^{137}Cs in Kapitel 8.1.1 und Kapitel 8.1.2 dargestellt.

8.1 Photonen

Die Messungen mit Photonen wurden in der Referenzstrahlenanlage in der ARC Seibersdorf GmbH durchgeführt. Die zum Vergleich durchgeführten Simulationen wurden bei Idealbedingungen durchgeführt. Somit sind Streuungen von den Wänden, die bei den realen Messungen vorhanden sind, nicht berücksichtigt. Um diesen Einfluss möglichst klein zu halten, wurden für die Messungen große Dosisleistungen im Bereich von $300\mu\text{Sv/h}$ verwendet. Die Vergleiche der normierten mikrodosimetrischen Spektren für alle drei Simulationsgeometrien sind in Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-3 für ^{137}Cs und in Abbildung 8-4 bis Abbildung 8-6 für ^{60}Co dargestellt. Zum Abschluss wurde auch noch die gemessene und simulierte Winkelabhängigkeit des HAWK-TEPC verglichen. Abbildung 8-7 zeigt diese Gegenüberstellung.

8.1.1 662 keV (^{137}Cs)

Abbildung 8-1 zeigt den Vergleich der mikrodosimetrischen Spektren von Messung und Simulation der HAWK-TEPC Geometrie bei einer Bestrahlung mit ^{137}Cs . Qualitativ zeigen die beiden Spektren doch eine etwas unterschiedliche Form, jedoch ist dabei zu beachten, dass Unterschiede unterhalb von $0,5\text{ keV}/\mu\text{m}$ vom verwendeten ^{60}Co -Fit des Messgerätes liegen (siehe auch Abbildung 4-2).

In Abbildung 8-2 ist der Vergleich für die HAWK-SEPC Geometrie dargestellt. Die Form der Spektren ist hier sehr ähnlich. In der Abbildung ist das normierte mikrodosimetrische Spektrum der Simulation dargestellt. Die Messung wurde aufgrund der vom Messgerät unterdrückten Messwerte unter $0,5\text{keV}/\mu\text{m}$ nicht normiert sondern am grünen Punkt bei $0,8\text{keV}/\mu\text{m}$ eingesetzt. Der Vergleich für die LiuLin Geometrie zeigt eine sehr gute Übereinstimmung des gemessenen und simulierten Spektrums und ist in Abbildung 8-3 dargestellt. Der Unterschied im Bereich von $0,01\text{ keV}/\mu\text{m}$ bis $0,4\text{ keV}/\mu\text{m}$ liegt daran, dass hier keine weitere Energieauflösung des Messgeräts möglich ist [LiuL2004]. Durch diesen Umstand und wegen der durchgeführten Normierung ergibt sich die Differenz in der Höhe der Spektren.



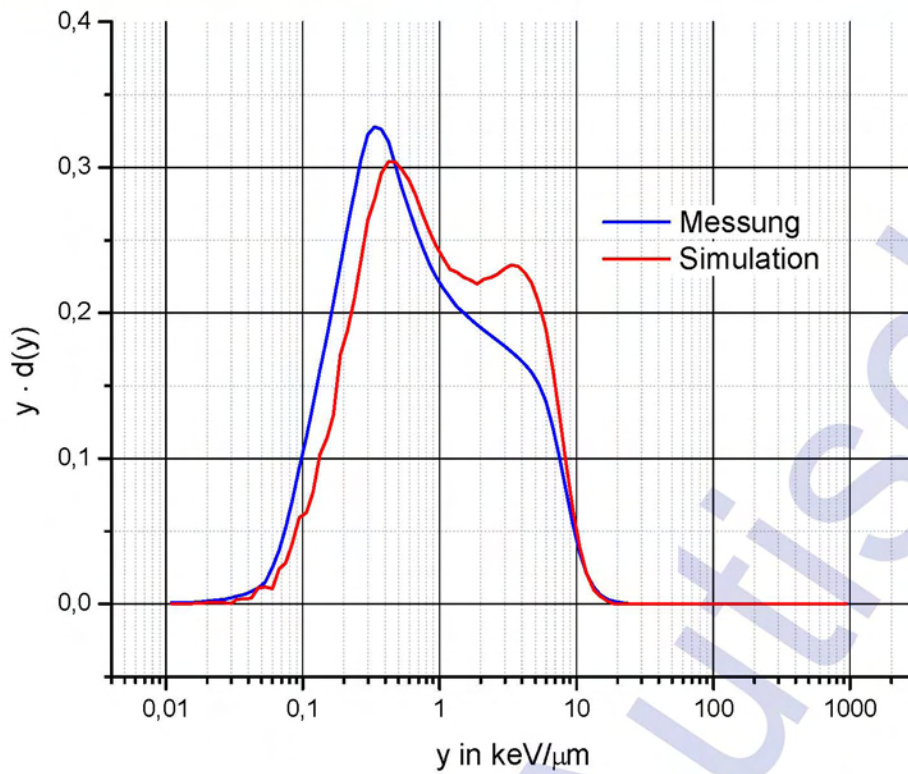


Abbildung 8-1: Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für ^{137}Cs . Vergleich von Messung und Simulation.

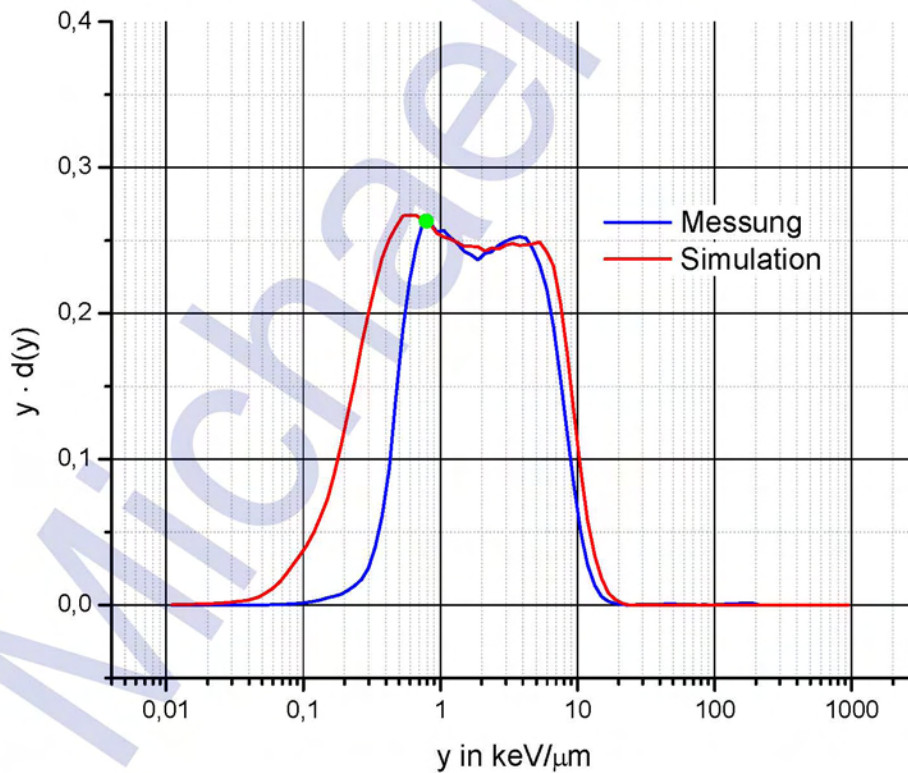


Abbildung 8-2: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-SEPC für ^{137}Cs . Vergleich der normierten Simulation und der Messung, die am grünen Punkt bei $0,8 \text{ keV}/\mu\text{m}$ eingefügt wurde.

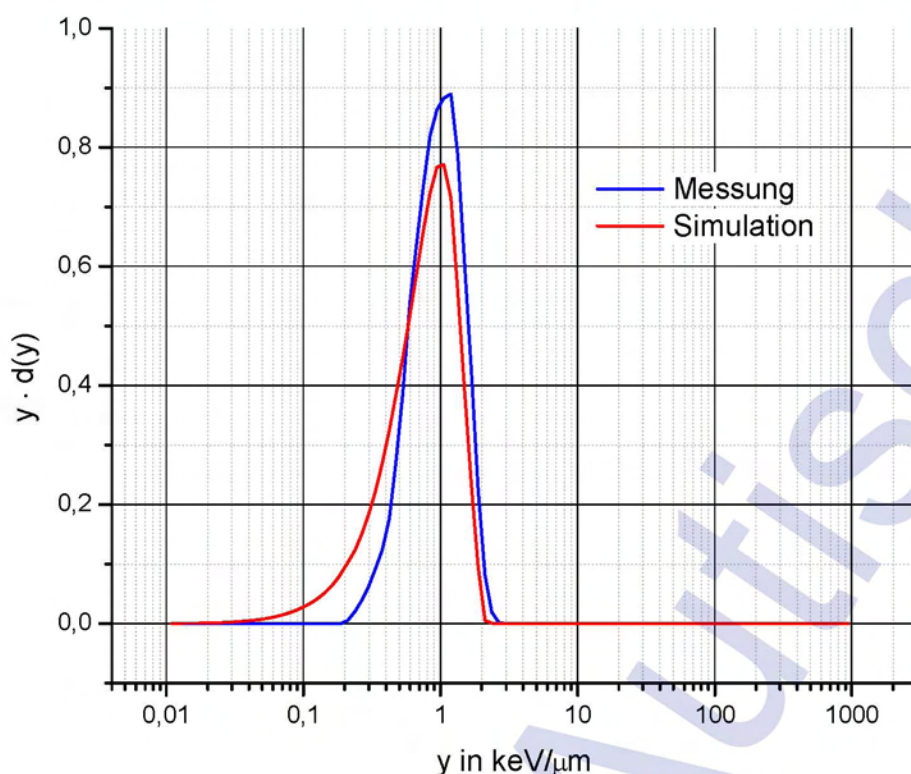


Abbildung 8-3: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des LiuLin für ^{137}Cs . Vergleich von Messung und Simulation.

8.1.2 1,2 MeV (^{60}Co)

Die Vergleiche der Simulationen mit den ^{60}Co Messungen werden in diesem Abschnitt für die drei unterschiedlichen Messgeräte dokumentiert. Abbildung 8-4 zeigt den Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren für die HAWK-TEPC Geometrie. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung. In Abbildung 8-5 ist die Gegenüberstellung von Messung und Simulation für das HAWK-SEPC Messgerät dargestellt. Die Abbildung zeigt das normierte mikrodosimetrische Spektrum der Simulation. Die Messung wurde aufgrund der vom Messgerät unterdrückten Messwerte unter $0,5\text{keV}/\mu\text{m}$ nicht normiert sondern am grünen Punkt bei $0,8\text{keV}/\mu\text{m}$ eingesetzt. Für diesen Vergleich ist, wie man der Abbildung entnehmen kann, eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation gegeben.

Auch für die LiuLin Simulationsgeometrie wurde ein Vergleich der mikrodosimetrischen Spektren bei Bestrahlung mit einer ^{60}Co Quelle durchgeführt. Die Spektren zeigen, wie auch schon beim Vergleich mit ^{137}Cs , eine sehr gute Übereinstimmung. Nur bei den untersten Energien zeigen sich Unterschiede im Aussehen. Diese Unterschiede rühren daher, dass das Messgerät bei diesen eine zu geringe Auflösung hat, sodass dieser gesamte Bereich nicht weiter aufgeschlüsselt werden kann [LiuL2004]. Der Vergleich ist in Abbildung 8-6 dargestellt.

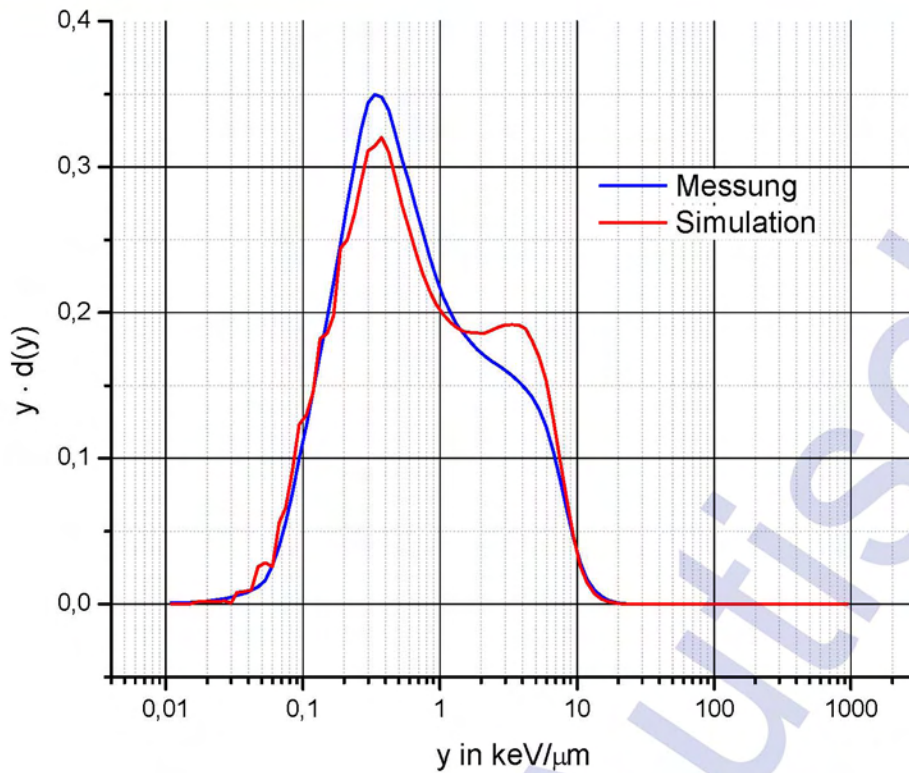


Abbildung 8-4: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für ^{60}Co . Vergleich von Messung und Simulation.

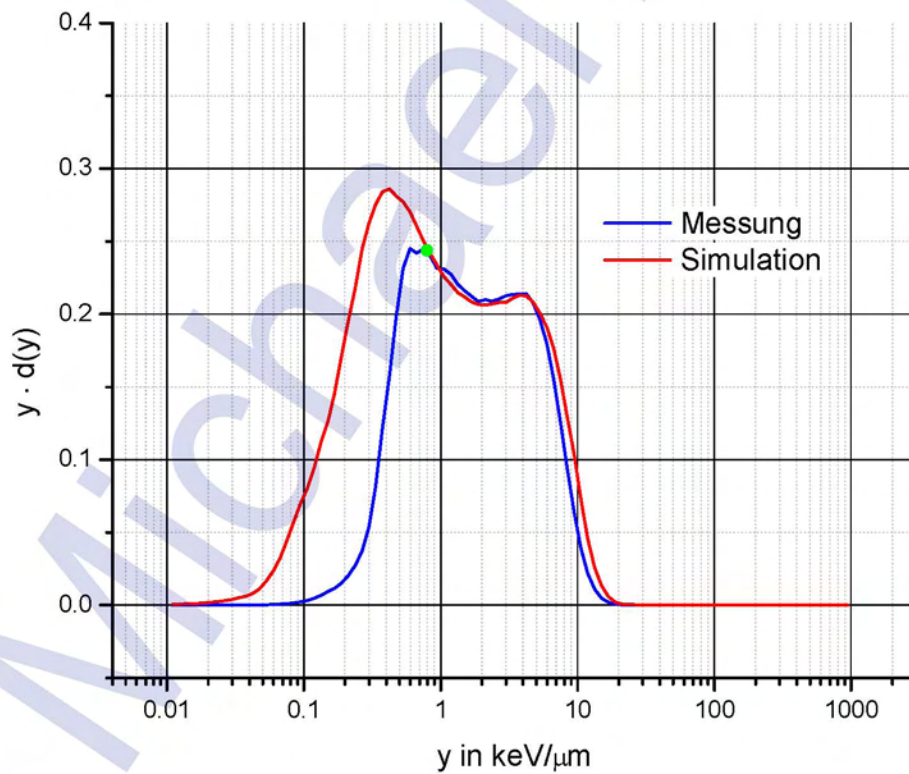


Abbildung 8-5: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-SEPC für ^{60}Co . Vergleich der normierten Simulation und der Messung, die am grünen Punkt bei $0,8\text{keV}/\mu\text{m}$ eingefügt wurde.

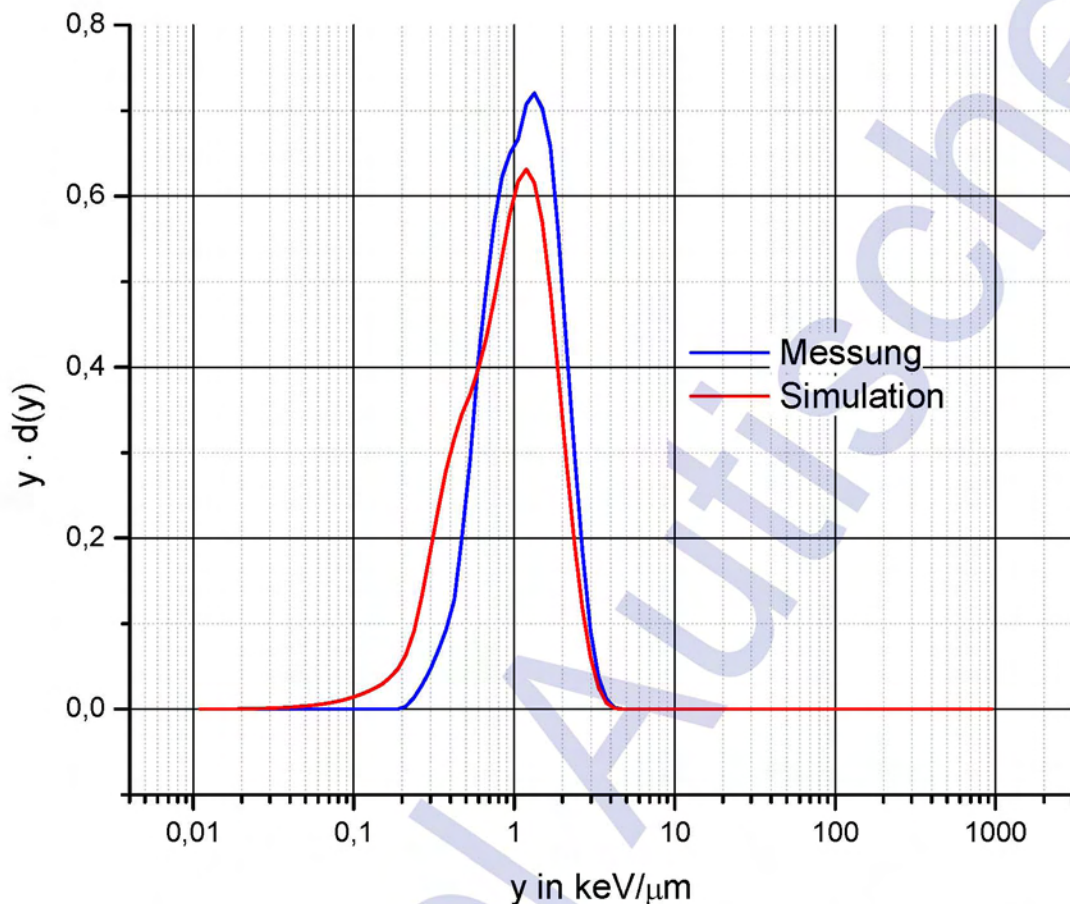


Abbildung 8-6: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des LiuLin für ^{60}Co . Vergleich von Messung und Simulation.

8.1.3 Winkelabhängigkeit

Für die Winkelabhängigkeit des HAWK-TEPCs bei Bestrahlung mit Photonen (^{137}Cs und ^{60}Co) wurden die Simulationen zur Überprüfung der Ergebnisse mit Messungen [Auti2003] verglichen. Dieser Vergleich ist in Abbildung 8-7 dargestellt. In der Abbildung ist die Energiedeposition beim angegebenen Einstrahlwinkel relativ zur Energiedeposition bei einer Einstrahlung von 0° dargestellt. Dabei zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung von Simulation und Messung. Dies ist auf eine exakte Modellierung zurückzuführen und zeigt, dass die verwendete Simulationsgeometrie der realen Geometrie sehr gut entspricht.



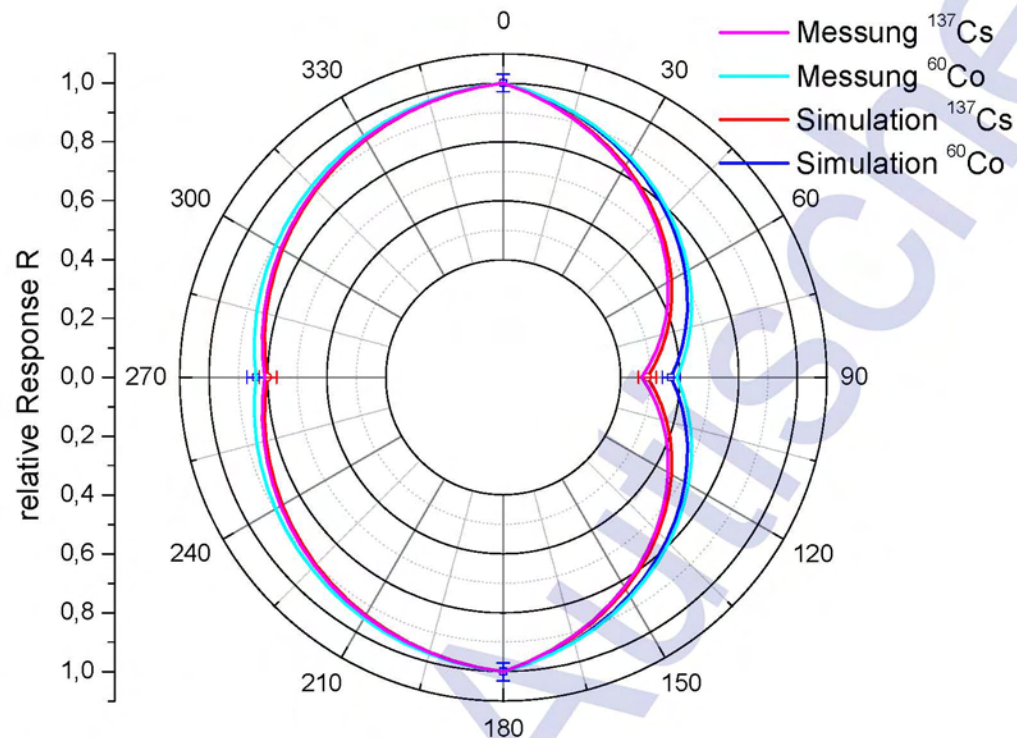


Abbildung 8-7: Response der Energiedeposition beim HAWK-TEPC in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels relativ zur Einstrahlung aus 0° für Messungen und Simulation bei unterschiedlichen Photonenenergien.

Die sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation zeigt sich auch in Tabelle 8-1, in der die zugehörigen Werte des Vergleichs eingetragen sind. Da sich für die Werte bei 0° und 180° aus Symmetriegründen die gleichen Werte ergeben und dementsprechend auch keine Simulationen bei 180° durchgeführt wurden, sind diese Werte in der Tabelle zusammengefasst. Für die Messung und die Simulation wurden dabei die Werte bei 90° und 270° durch den Wert bei 0° dividiert, also auf diesen Wert bezogen. Die Abweichung ergibt sich somit für den Vergleich bei der Bestrahlung mit ^{137}Cs mit maximal 4,1% und im Durchschnitt von 0°, 90°, 180° und 270° bei 1,4%. Bei der Bestrahlung mit ^{60}Co fällt die Abweichung noch deutlich geringer aus. Der Maximalwert liegt dabei bei 3,5% und im Durchschnitt von 0°, 90°, 180° und 270° der Einstrahlungsrichtung ergibt sich eine Abweichung von lediglich 0,9%.

Tabelle 8-1: Vergleich von Messung[Auti2003] und Simulation des HAWK-TEPC Messgeräts. Die Werte ergeben sich dabei jeweils bezogen auf die Werte bei einer Einstrahlung von 0°.

Photonenenergie	Richtung	Messung	Simulation	Abweichung
662keV (^{137}Cs)	0° = 180°	1,00	1,00 ± 0,03	0,0 %
662keV (^{137}Cs)	90°	0,47	0,49 ± 0,03	4,1 %
662keV (^{137}Cs)	270°	0,81	0,80 ± 0,03	1,3 %
1,2MeV (^{60}Co)	0° = 180°	1,00	1,00 ± 0,03	0,0 %
1,2MeV (^{60}Co)	90°	0,59	0,57 ± 0,03	3,5 %
1,2MeV (^{60}Co)	270°	0,84	0,84 ± 0,03	0,0 %

8.2 Neutronen

Die Vergleiche von Simulation und Messung bei den Neutronen kann hier nur für den HAWK-TEPC durchgeführt werden, da mit den anderen Geräten noch keine Messungen für diese Neutronenenergien vorliegen. Die Abbildung 8-8 bis Abbildung 8-16 zeigen die Vergleiche von Messung zur Simulation der normierten mikrodosimetrischen Spektren für Neutronenenergien von 0,5MeV, 1,2 MeV, 2,5MeV, 5MeV, 8MeV, 14,8MeV, 61MeV, 100MeV und 200MeV. Vorab muss festgestellt werden, dass die Simulationen jeweils mit monoenergetischen Neutronen durchgeführt wurden, was in den meisten Fällen nicht vollständig der Realität entspricht. Unter einer Neutronenenergie von 2,5MeV ist die Übereinstimmung von Messung und Simulation sehr exakt. Die mikrodosimetrischen Spektren über 2,5MeV zeigen meist deutliche Unterschiede im Aussehen. Die ist auf mehrere Umstände zurückzuführen. Einerseits sind bei den Messungen mit höheren Neutronenenergien oft im Bestrahlungsspektrum auch erhebliche Anteile von anderen Neutronenenergien enthalten. Andererseits kommt bei der Simulation mit Neutronen der Umstand zu tragen, dass es mögliche Artefakte durch die Gruppierung der Neutronen kommt[Fass2009]. Dieser Effekt kann auch zu einem Abschneiden des Spektrums ab einer gewissen Energie führen, wie es in Abbildung 8-11 für Neutronen mit 5MeV dargestellt ist.

8.2.1 0,5MeV

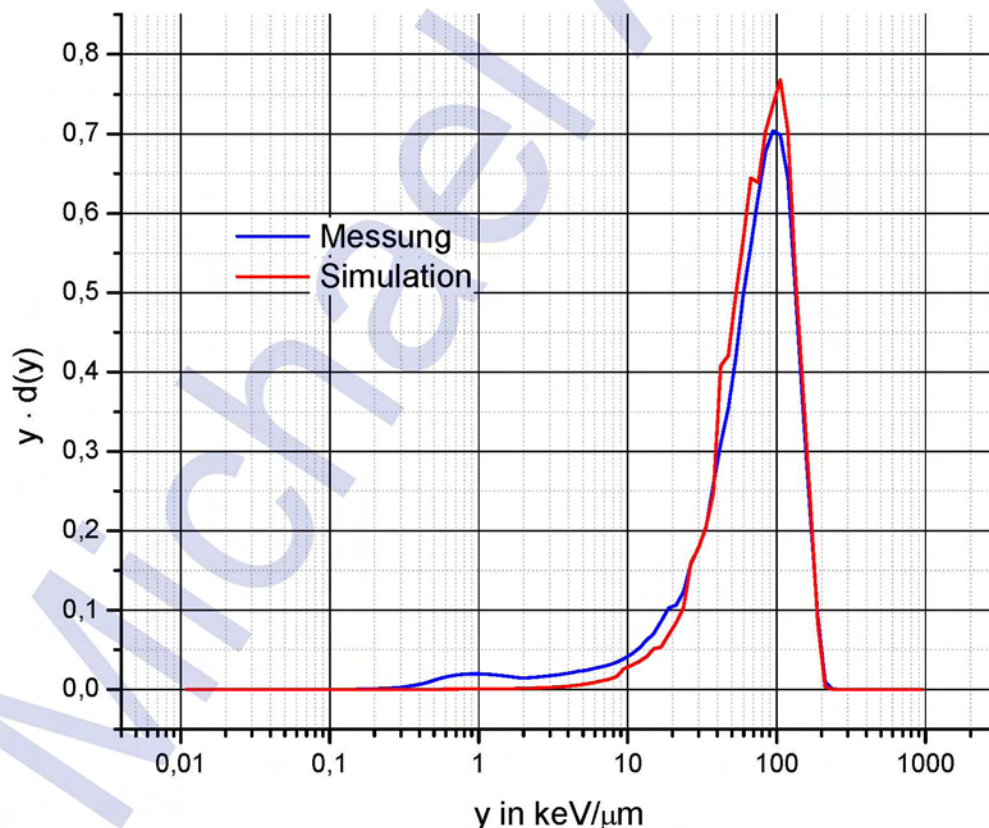


Abbildung 8-8: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 0,5 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.2 1,2MeV

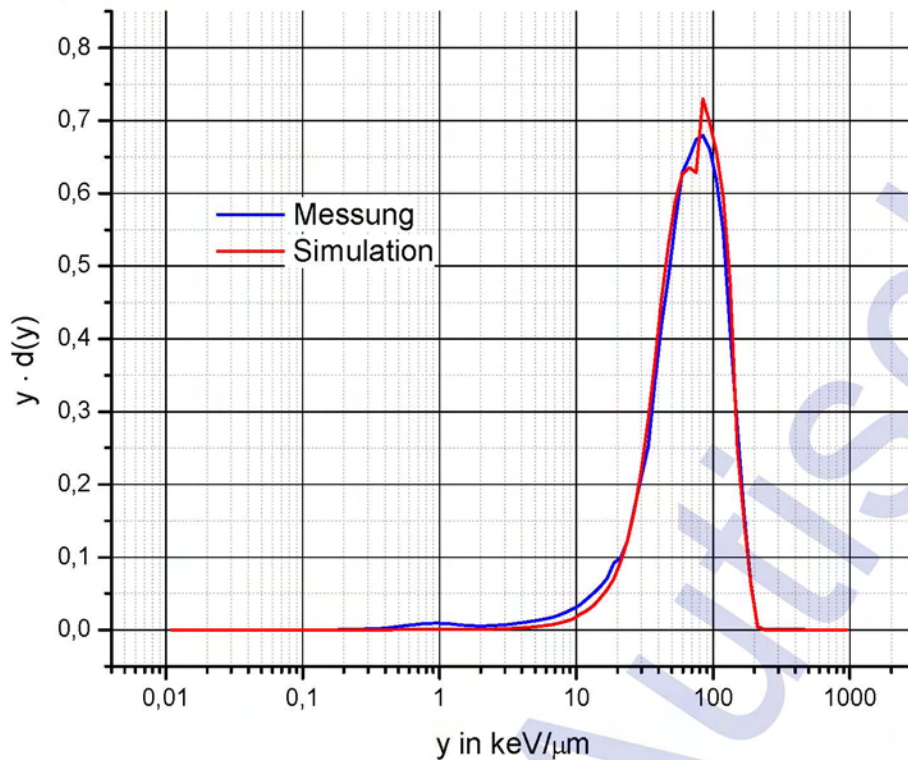


Abbildung 8-9: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 1,2 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.3 2,5MeV

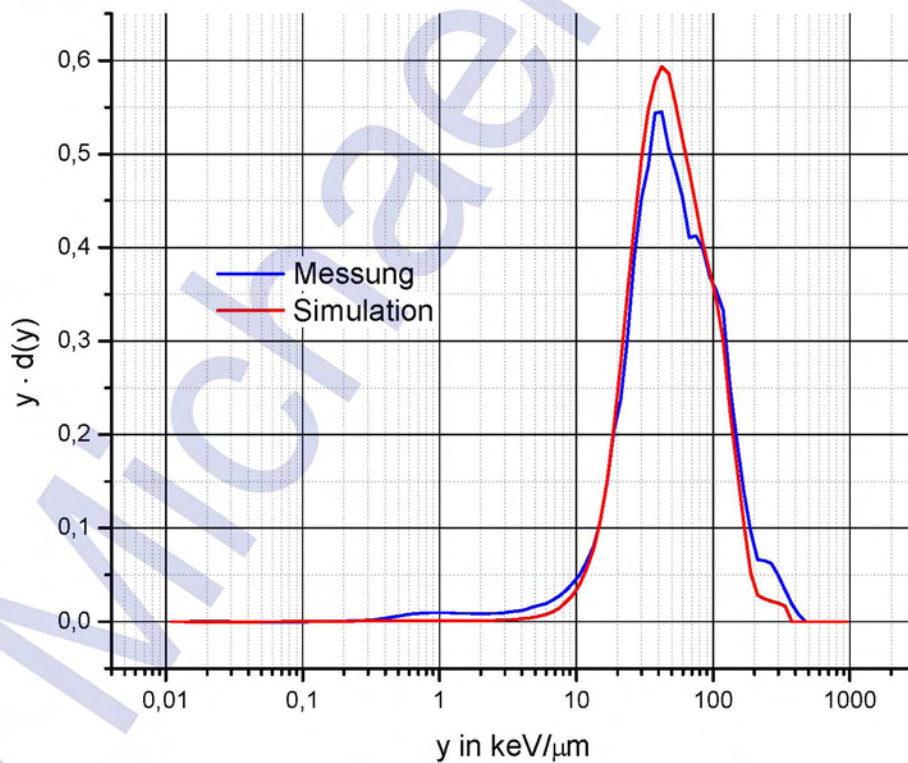


Abbildung 8-10: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 2,5 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.4 5MeV

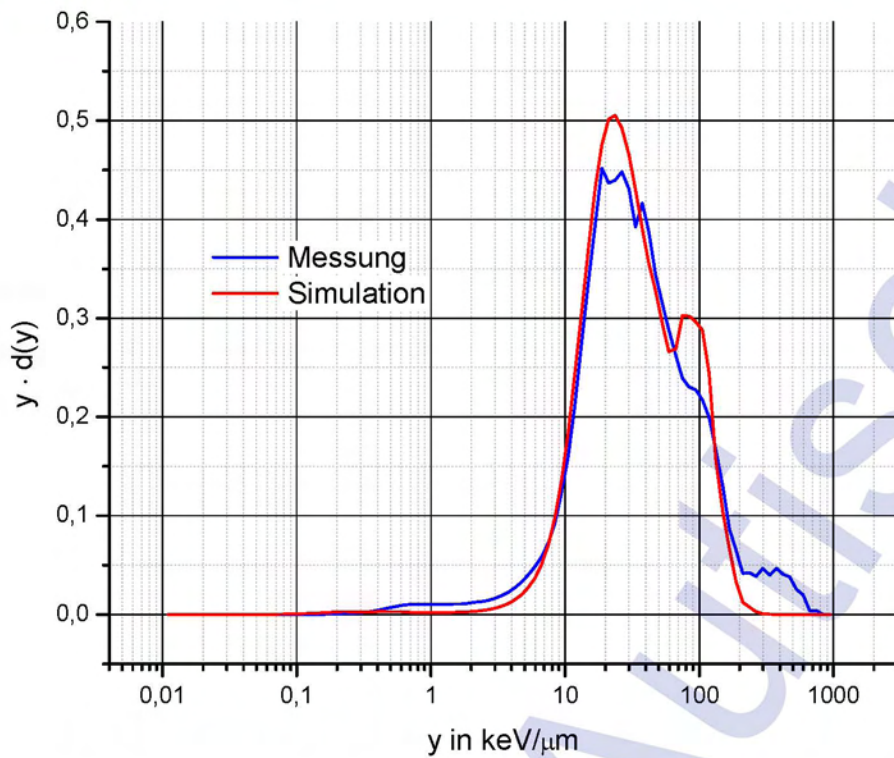


Abbildung 8-11: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 5 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.5 8MeV

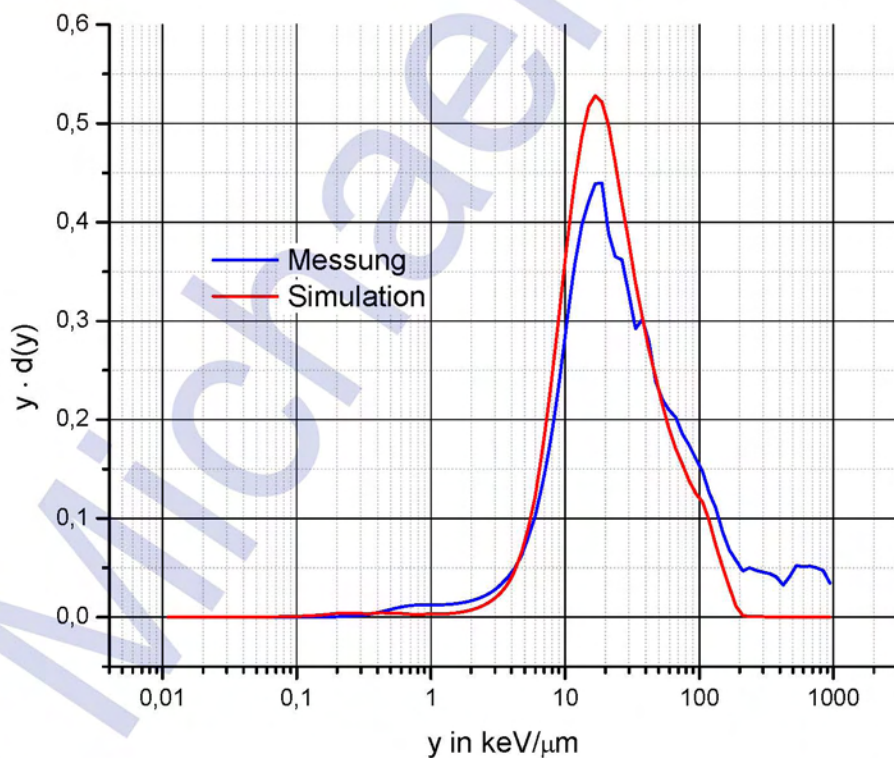


Abbildung 8-12: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 8 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.6 14,8MeV

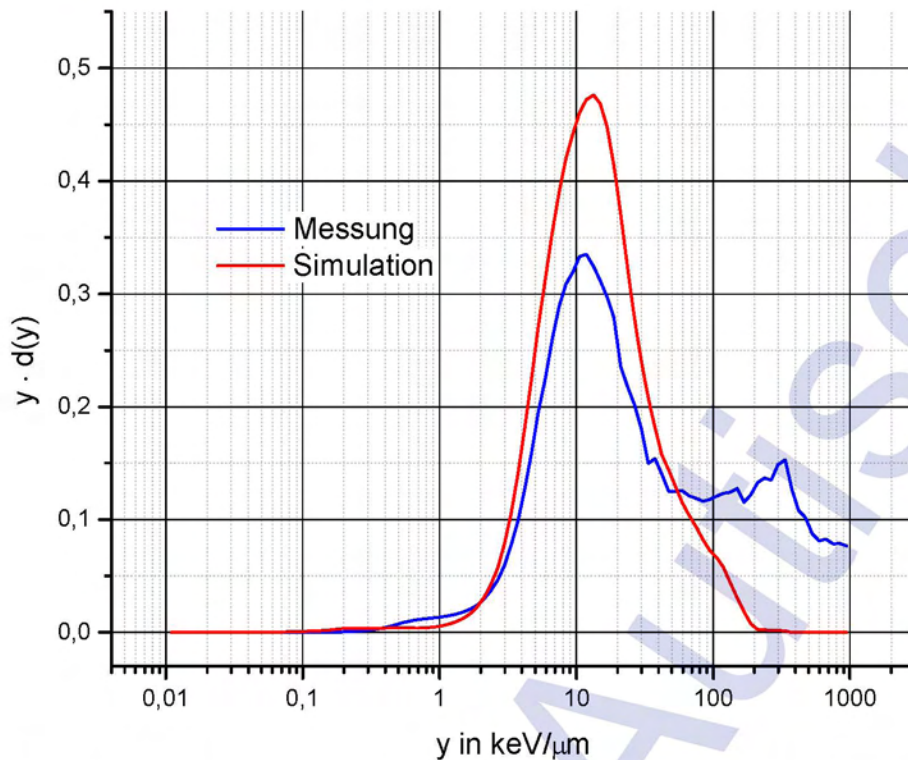


Abbildung 8-13: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 14,6 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.7 61MeV

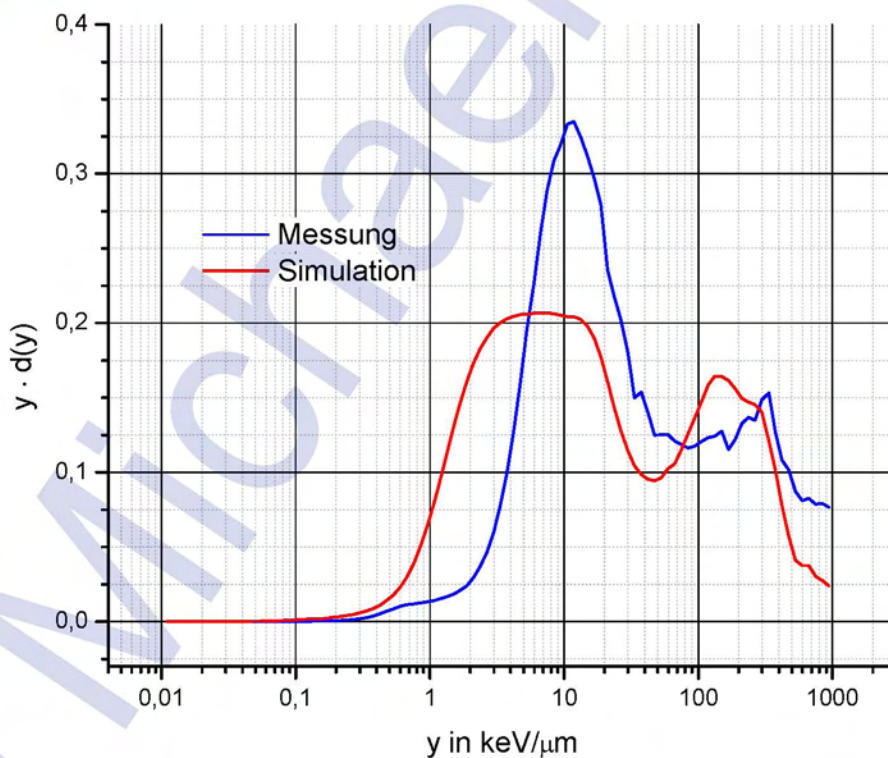


Abbildung 8-14: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 61 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.8 100MeV

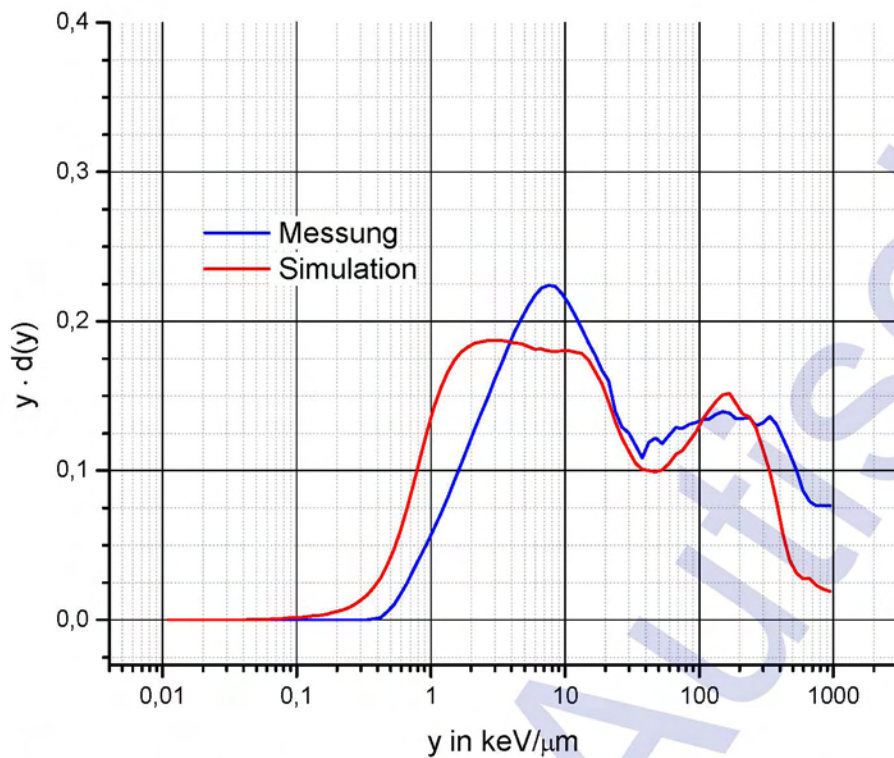


Abbildung 8-15: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 100 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.2.9 200MeV

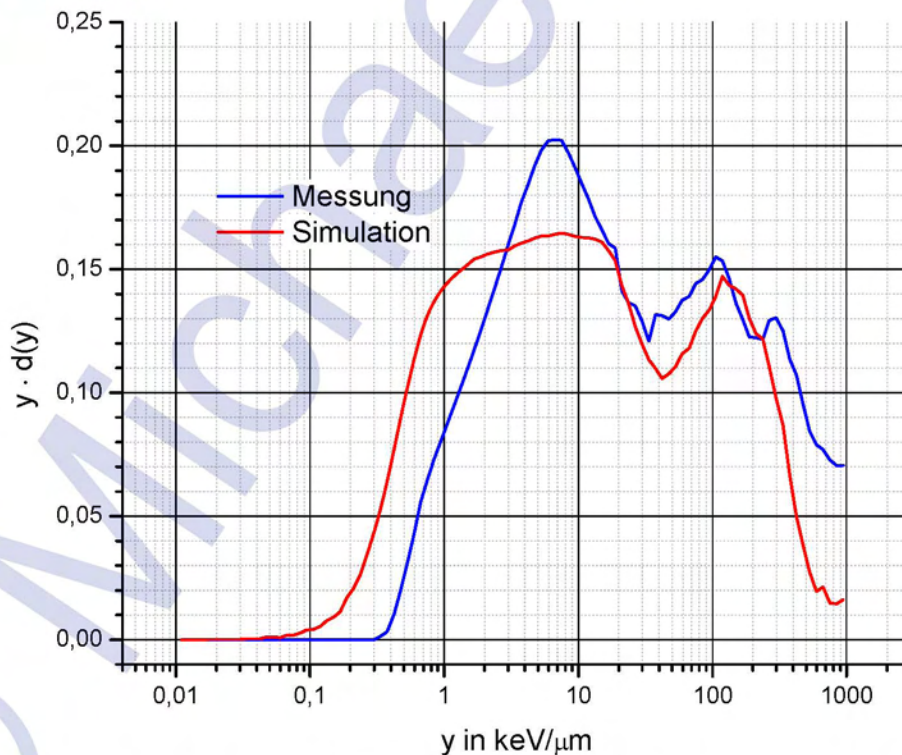


Abbildung 8-16: Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 200 MeV. Vergleich von Messung und Simulation.

8.3 Vergleich von Simulation und Messung kosmischer Strahlung

8.3.1 Flugmessung mit dem ÖBH

Für die Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer wurde eine Simulation mit den Messbedingungen (SDP = 772MV, CutOff = 4,55 GV, Höhe = 7000m bzw. 11500m) durchgeführt. Der Vergleich der Simulation mit den eingetragenen Messwerten ist in Abbildung 8-17 grafisch dargestellt. Die Ergebnisse der Äquivalentdosisleistung der Simulation, sowie die Messwerte sind in Tabelle 8-2 eingetragen. Der Vergleich zeigt eine Übereinstimmung von Simulation und Messung innerhalb der Unsicherheiten der Messung. Für die Messung bei 7000m ergibt sich eine Abweichung zur Simulation von 20%, das gleichzeitig auch die höchste Abweichung aller Vergleiche von Flugmessungen darstellt. Bei der Messung in 11500m ist die simulierte Äquivalentdosisleistung lediglich um 6% tiefer als die Gemessene, was wiederum auf eine gute Modellierung der Realität schließen lässt.

Tabelle 8-2: Vergleich der Äquivalentdosisleistungen der beiden Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen für die beiden unterschiedlichen Flughöhen.

Bezeichnung Cutoff SDP	Höhe in m	Messung H*(10) in $\mu\text{Sv/h}$	Simulation H*(10) in $\mu\text{Sv/h}$
Bundesheer 4,55GV 772MV	7000	$1,2 \pm 0,1$	$1,37 \pm 0,02$
Bundesheer 4,55GV 772MV	11500	$4,4 \pm 0,4$	$3,96 \pm 0,04$

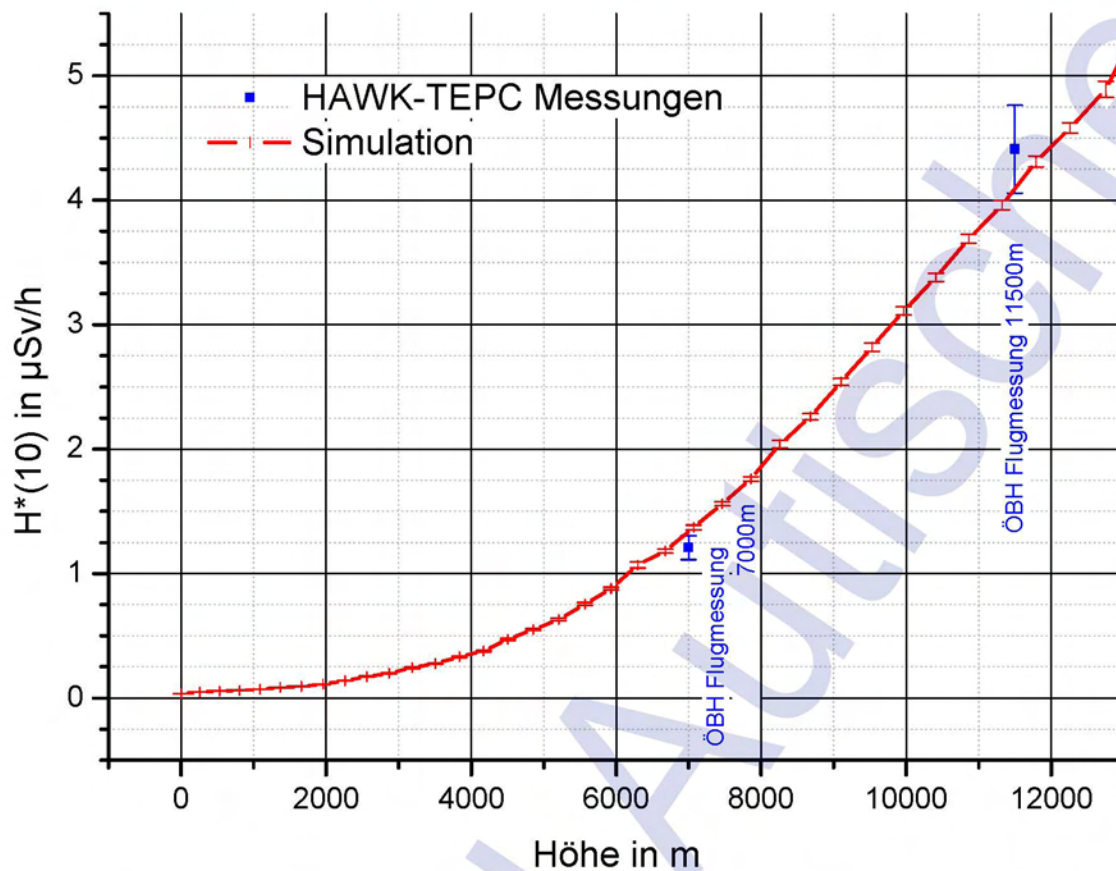


Abbildung 8-17: Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Flugmessung mit dem ÖBH verglichen mit der Simulation in Abhängigkeit der Flughöhe (Cutoff=4,55GV, SDP=77MV).

Für die Messung mit dem ÖBH wurden auch die mikrodosimetrischen Spektren in den einzelnen Flughöhen miteinander verglichen. Abbildung 8-18 zeigt den Vergleich der normierten mikrodosimetrischen Spektren $y_d(y)$ für FL230 (7000m) und Abbildung 8-20 den Vergleich der Äquivalentdosisleistung entsprechenden $y_h(y)$ Spektren. Der Vergleich der normierten Spektren zeigt einige Unterschiede im Bereich des Low-LET, während der High-LET Bereich von der Simulation sehr gut wiedergegeben wird. Ein Grund für die Unterschiede liegt am Messgerät, welches im niedrigen LET Bereich aufgrund des Elektronikrauschens einen fixen ^{60}Co Fit verwendet. Da aber der High-LET Bereich besonderes Gewicht für die resultierende Äquivalentdosisleistung hat, ist es wenig verwunderlich, dass der Vergleich der $y_h(y)$ Spektren in Summe gesehen sogar noch etwas besser ausfällt. Ähnlich sieht es auch bei den Vergleichen bei der Messung in 11500m aus. Wiederum zeigen sich bei den normierten $y_d(y)$ Spektren in Abbildung 8-20 etwas größere Abweichungen als bei den $y_h(y)$ Spektren in Abbildung 8-21.

Die Flächen unter den Kurven, die die Äquivalentdosisleistung wiedergeben sind, wie auch schon der Vergleich der Werte in Tabelle 8-2 vermuten lässt, annähernd gleich.



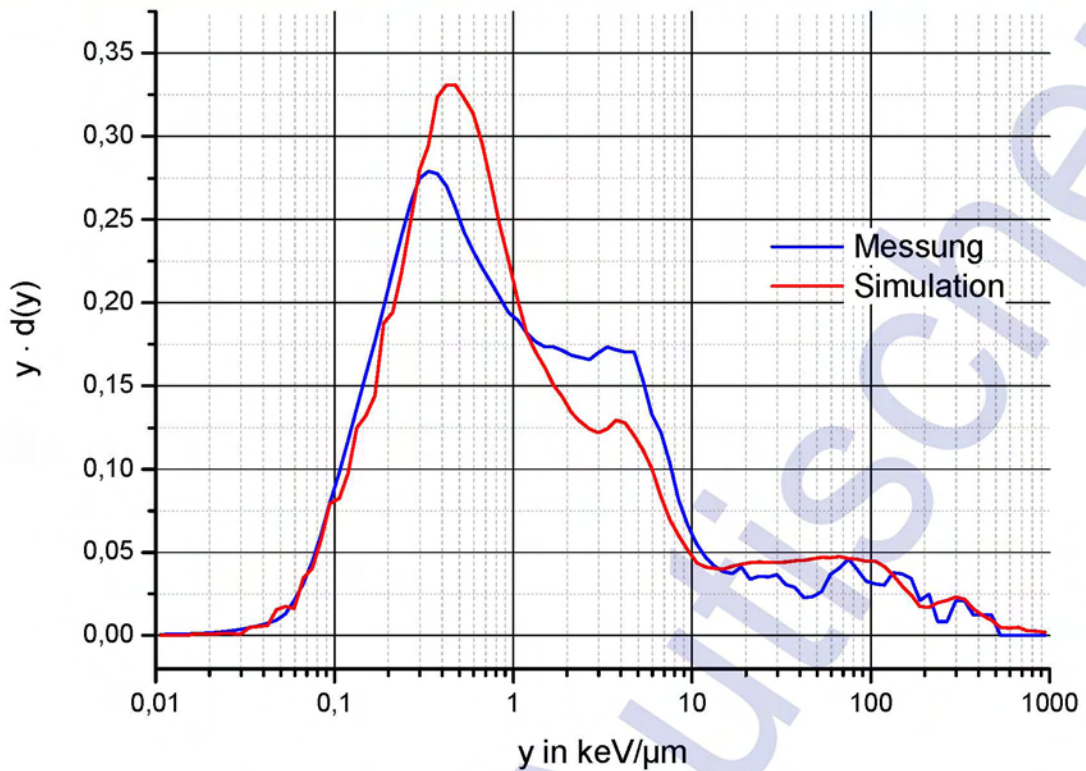


Abbildung 8-18: Vergleich der gemessenen und simulierten normierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ in FL230 (7000m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff=4,55GV, SDP=77MV).

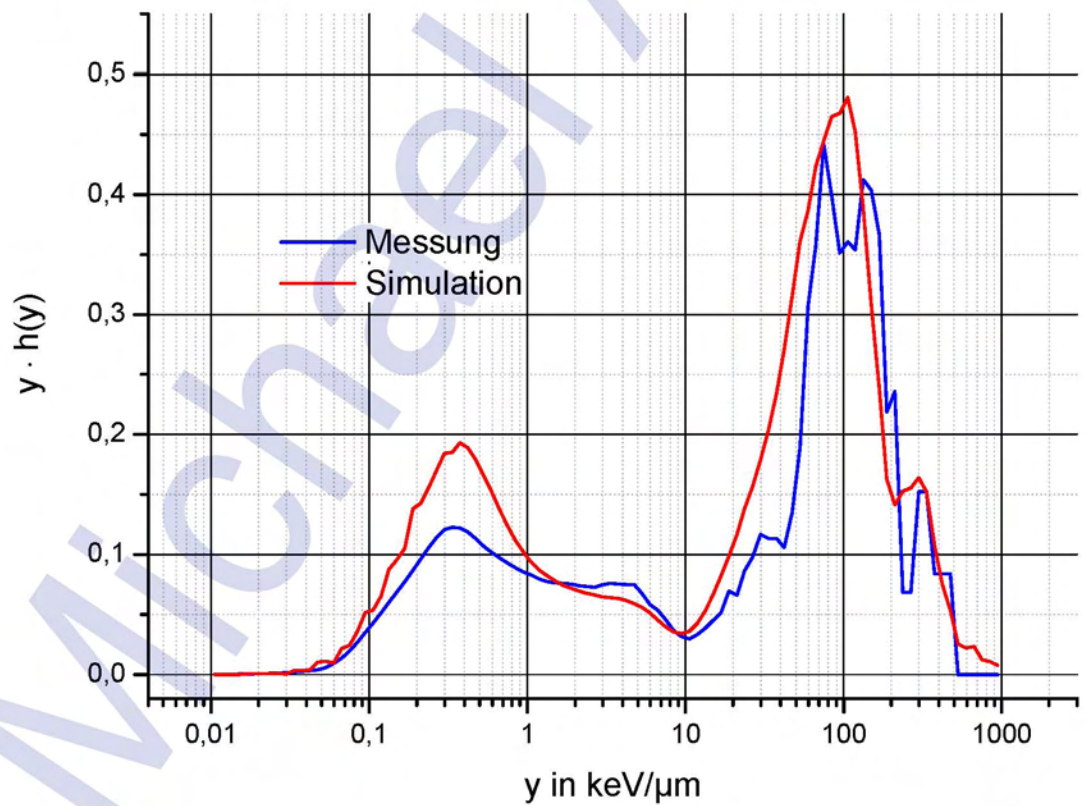


Abbildung 8-19: Vergleich der gemessenen und simulierten dosisnormierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y \cdot h(y)$ in FL230 (7000m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff=4,55GV, SDP=77MV).

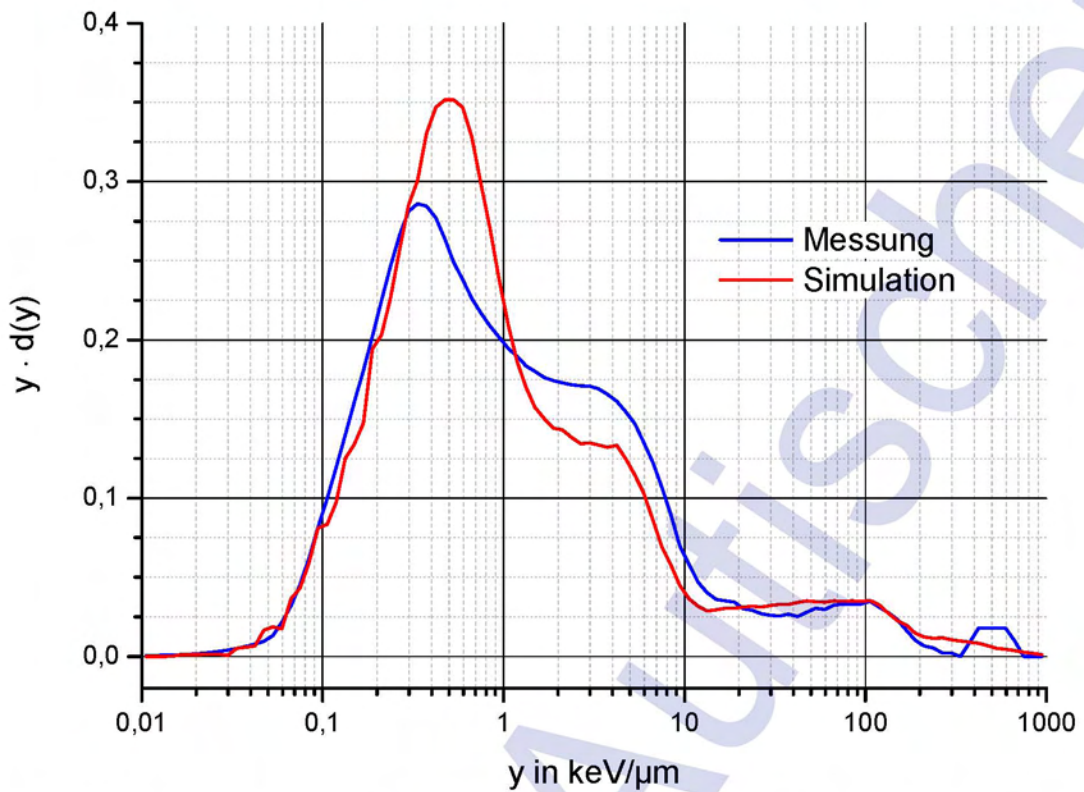


Abbildung 8-20: Vergleich der gemessenen und simulierten normierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ in FL380 (11500m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff=4,55GV, SDP=77MV).

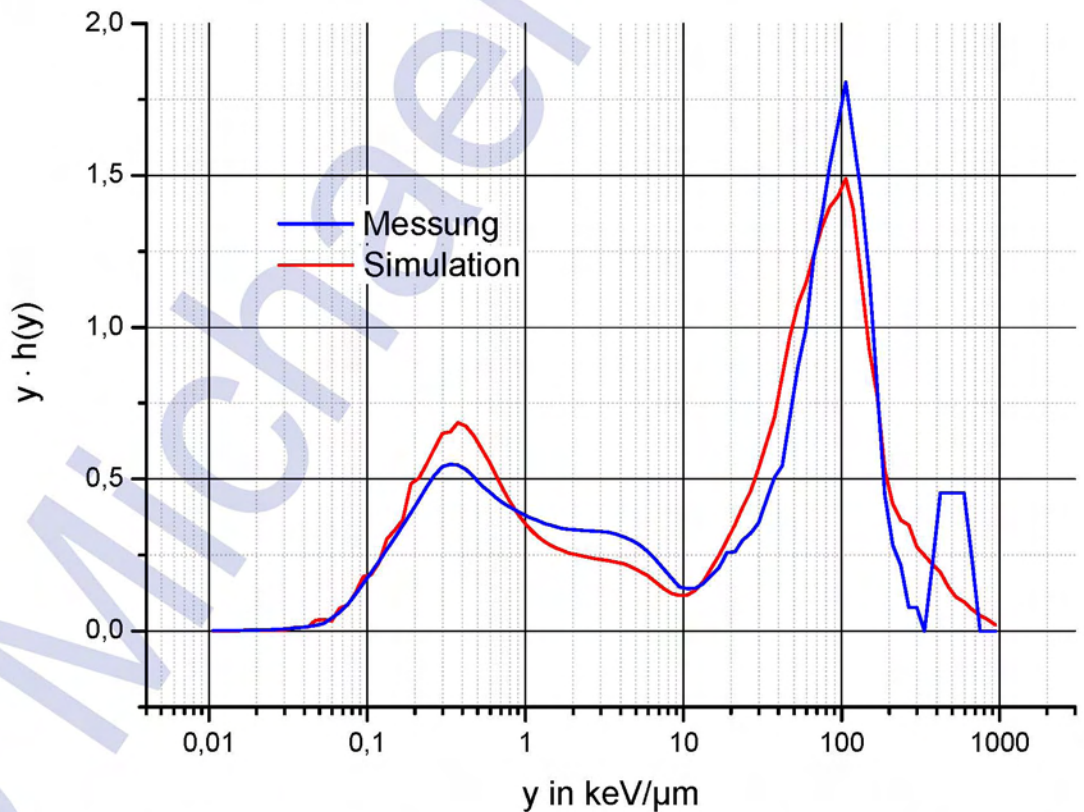


Abbildung 8-21: Vergleich der gemessenen und simulierten dosisnormierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y \cdot h(y)$ in FL380 (11500m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff=4,55GV, SDP=77MV).

8.3.2 Messflug über Aalborg

Im Zuge eines speziellen Projektes mit dem Namen CAATER (Co-ordinated Access to Aircraft for Transnational Environmental Research) wurden mehrere Messflüge mit fünf weiteren europäischen Forschungseinrichtungen durchgeführt [Roll2005]. Einer der Messflüge wurde am 5. Mai 2005 über der Stadt Aalborg in Dänemark durchgeführt und mit einer dazugehörigen Simulation verglichen [Lato2007]. Die Stadt liegt in einer nördlichen geografischen Breite von 57 Grad und einer geografischen östlichen Länge von 10 Grad. Diese Position entspricht einem CutOff von 1,8 GV. Das berechnete SDP für den Tag des Fluges betrug 1040 MV. Bei diesen Bedingungen wurden 2 Flüge auf unterschiedlichen Höhen durchgeführt, wobei eine Messzeit von zwei Stunden realisiert wurde. Einerseits auf 9755 Meter (FL320), andererseits auf 12185 Meter (FL400). In Abbildung 8-22 ist ein Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistung der Messungen, sowie der dazugehörigen Simulation in Abhängigkeit der Höhe dargestellt. In der Abbildung sind zur besseren Übersicht einerseits die Simulation mit dem Atmosphärenmodell 0 aus dem Jahr 2005 [Roll2005] und auch die Simulation mit dem aktuellen Modell 3 eingetragen.

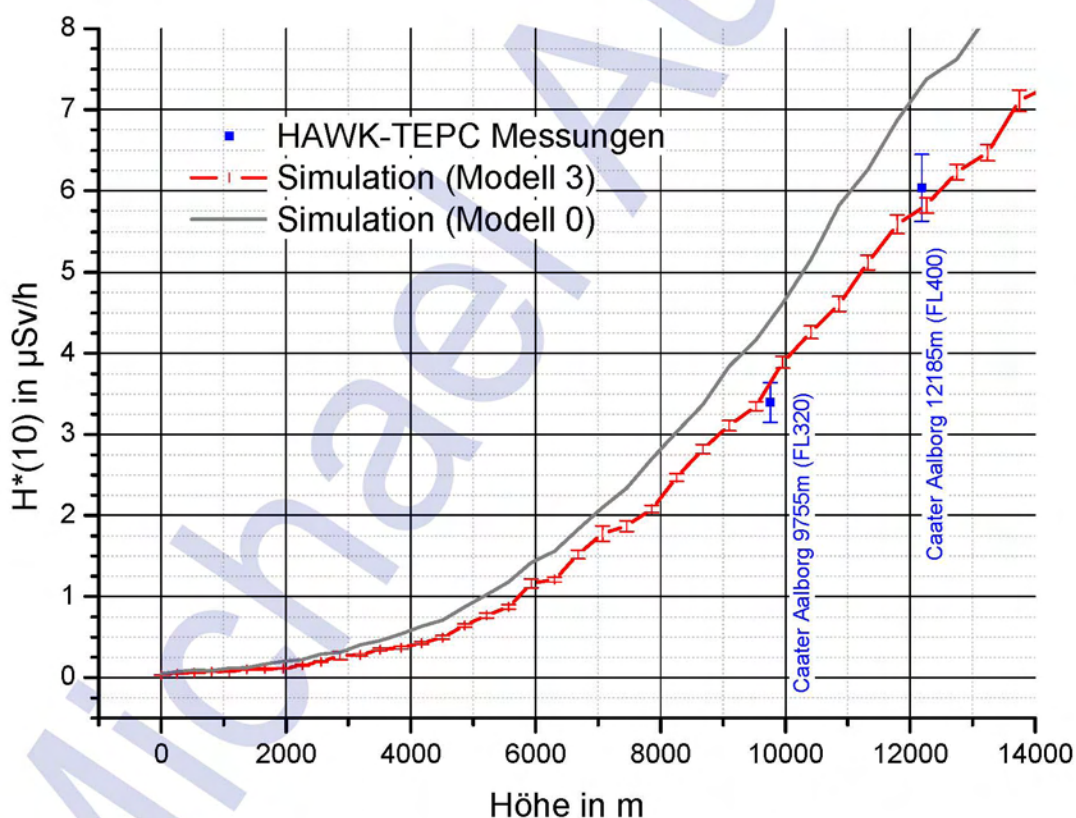


Abbildung 8-22: Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Messpunkte über der Stadt Aalborg mit den dazu durchgeführten Simulationen: Atmosphärenmodell 0 [Roll2005] und das aktuelle Modell 3.

Abbildung 8-23 zeigt die absoluten Anteile der simulierten Teilchenarten an der gesamten Umgebungsäquivalentdosisleistung in Abhängigkeit der Höhe. Wie auch

bei den zuvor beschriebenen Flugmessungen und Simulationen ist der größte Zuwachs der Äquivalentdosisleistung mit zunehmender Höhe durch die Neutronen gegeben.

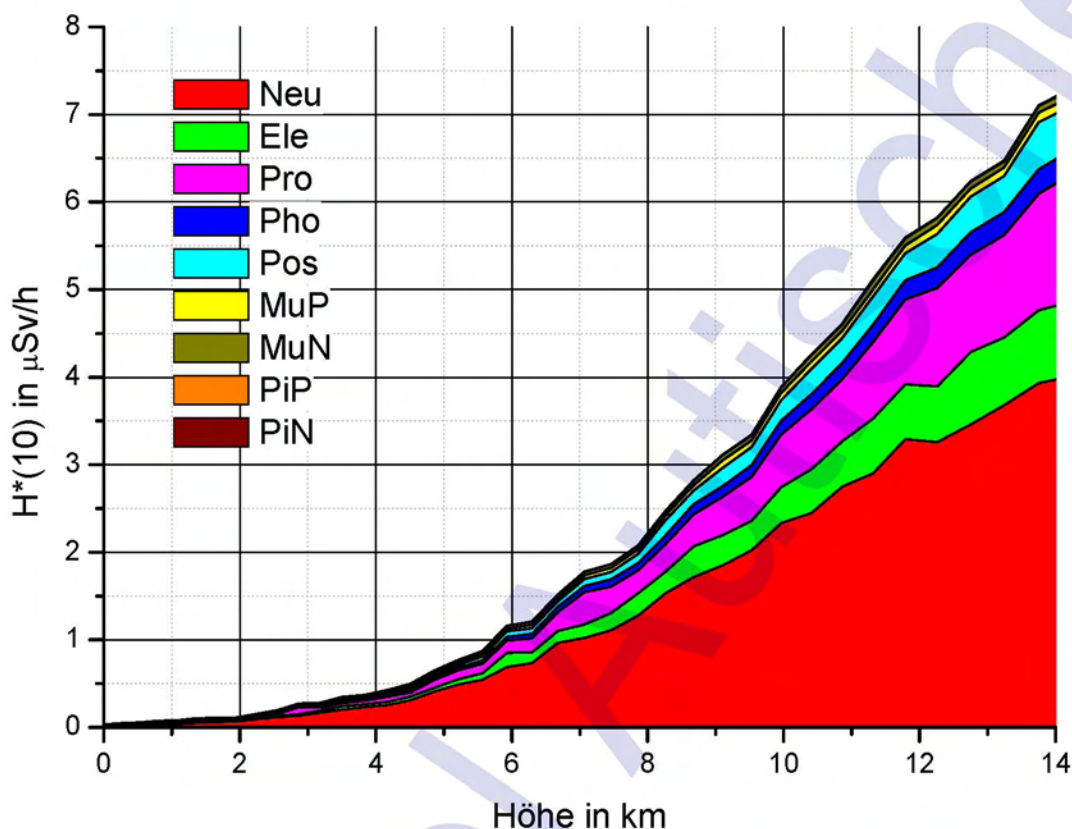


Abbildung 8-23: Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ simuliert für den Messflug über Aalborg in Abhängigkeit der Höhe. Die Teilchen, die den größten Beitrag zur Gesamtdosis beitragen, sind anteilmäßig ebenfalls eingetragen.

Ein absoluter Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen der Flüge ist in Tabelle 8-3 dargestellt, wobei zum Vergleich auch die Werte der Simulation mit dem Atmosphärenmodell 0 aus dem Jahre 2005 [Roll2005] in den Klammern eingetragen sind.

Tabelle 8-3: Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ der beiden Flugmessungen über Aalborg mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen in den 2 unterschiedlichen Flughöhen [Lato2007]. Bei den Ergebnissen der Simulation finden sich in den Klammern auch die Ergebnisse bei Verwendung des Atmosphärenmodells 0 [Roll2005].

Bezeichnung Cutoff SDP	Höhe in m	Messung $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$	Simulation $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$
Aalborg 1,8GV 1040MV	9755	$3,4 \pm 0,3$	$3,89 \pm 0,08$ (4,6)
Aalborg 1,8GV 1040MV	12185	$6,0 \pm 0,4$	$5,8 \pm 0,1$ (7,4)

8.3.3 Messflug über Rom

Auch diese Messflüge über der Stadt Rom wurden in dem gemeinschaftlichen Projekt CAATER durchgeführt. Wie schon bei den Flügen über der Stadt Aalborg war auch hier die Messzeit auf zwei Stunden begrenzt. Über der Stadt Rom in Italien wurde der Messflug am 6. Mai 2003 durchgeführt und mit einer dazugehörigen Simulation verglichen. Die Stadt liegt in einer nördlichen geografischen Breite von 42 Grad und einer geografischen östlichen Länge von 12 Grad. Diese Position entspricht einem CutOff von 6,4 GV. Das berechnete SDP für den Tag des Fluges betrug 1040 MV. Bei diesen Bedingungen wurden 2 Flüge auf unterschiedlichen Höhen durchgeführt. Einerseits auf 9755 Meter (FL320), andererseits auf 12185 Meter (FL400). In Abbildung 8-24 ist ein Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistung der Messungen sowie die dazugehörigen Simulationen in Abhängigkeit der Höhe dargestellt. Eine der Simulationen gibt dabei die Simulation mit dem Atmosphärenmodell 0 [Roll2005] wieder, die andere die Ergebnisse mit dem aktuellen Modell 3.

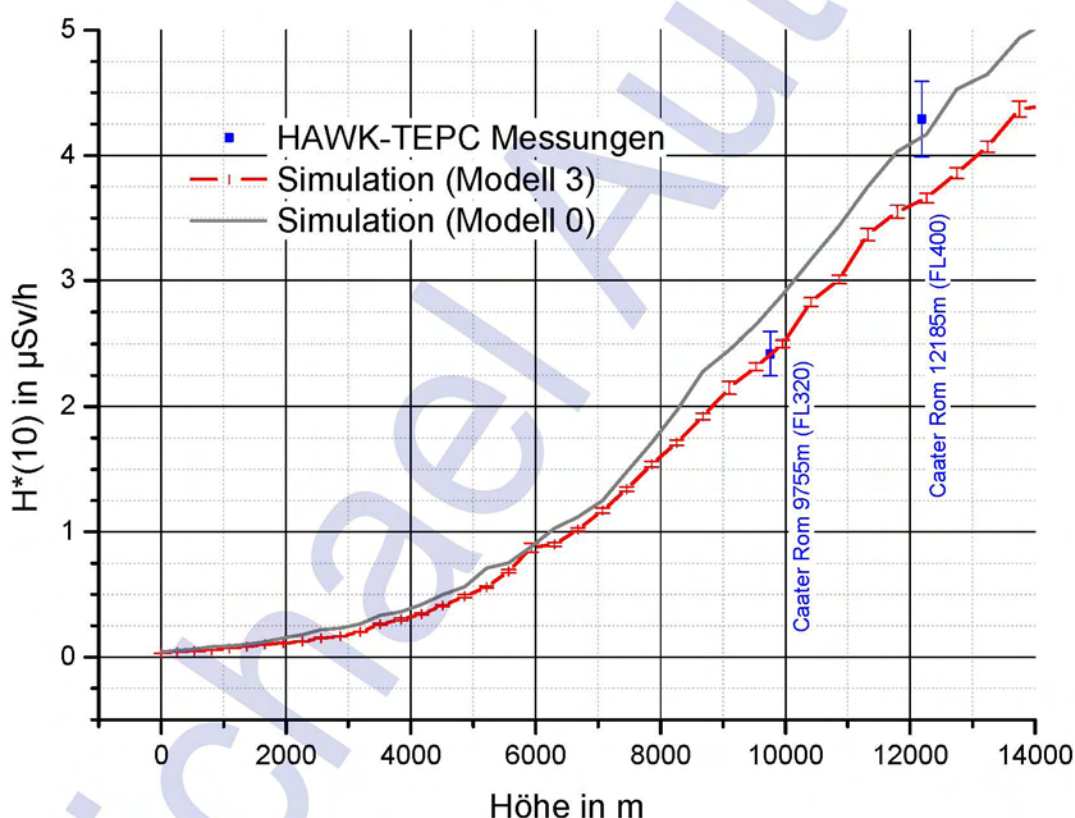


Abbildung 8-24: Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Messpunkte über der Stadt Rom mit den dazu durchgeführten Simulationen: Atmosphärenmodell 0 [Roll2005] und das aktuelle Modell 3.

Abbildung 8-25 zeigt die absoluten Anteile der simulierten Teilchen, Neutronen, Elektronen, Photonen, Protonen, Positronen, Myonen und Pionen an der gesamten Umgebungsäquivalentdosisleistung. Im Vergleich zur Messung in Aalborg, welche bei einem gleichen Wert des SDP durchgeführt wurde, zeigt diese Abbildung den bedeutend flacheren Anstieg der Dosisleistung mit der Höhe. Erklärbar ist dies durch

die unterschiedliche geografische Lage der beiden Städte. Aalborg ist hierbei eher in einer nördlichen Lage, während Rom bedeutend näher am Äquator ist.

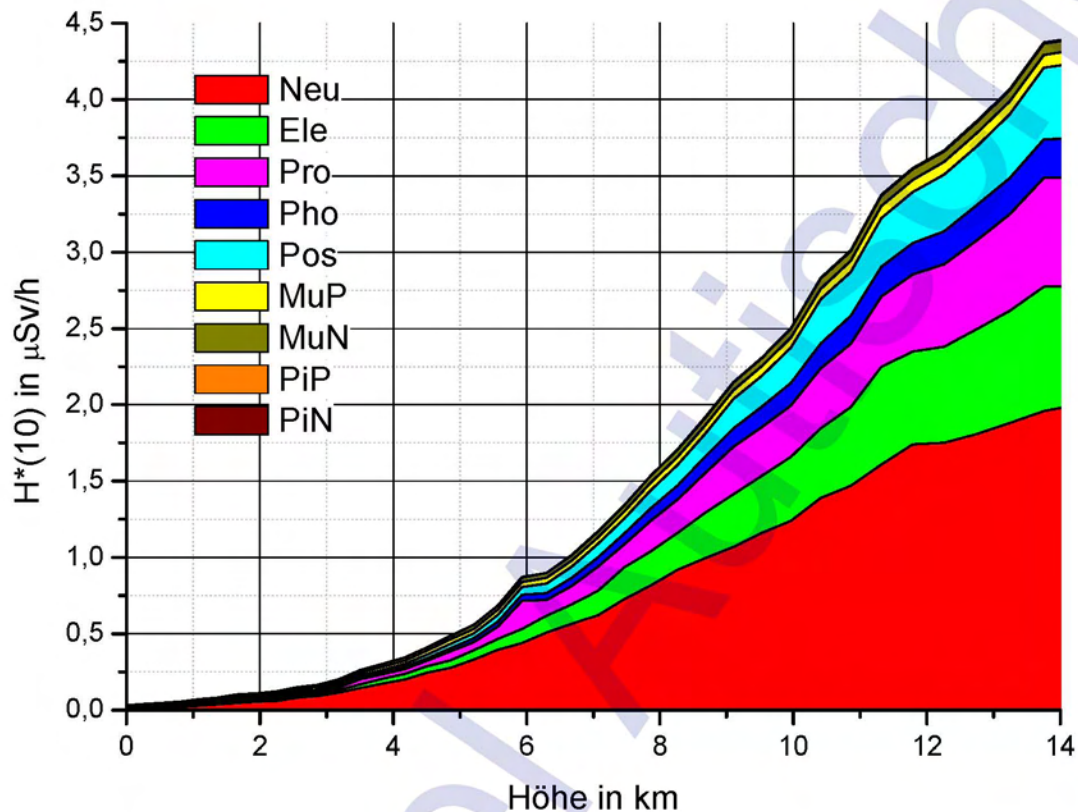


Abbildung 8-25: Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ simuliert für den Messflug über Rom in Abhängigkeit der Höhe. Die Teilchen, die den größten Beitrag zur Gesamtdosis beitragen, sind anteilmäßig ebenfalls eingetragen.

Ein absoluter Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen der Flüge ist in Tabelle 8-4 dargestellt, wobei zum Vergleich auch die Werte der Simulation mit dem Atmosphärenmodell 0 aus dem Jahre 2005 [Roll2005] in den Klammern eingetragen sind.

Tabelle 8-4: Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ der beiden Flugmessungen über Rom mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen in den zwei unterschiedlichen Flughöhen [Lato2007]. Bei den Ergebnissen der Simulation finden sich in den Klammern auch die Ergebnisse bei Verwendung des Atmosphärenmodells 0 [Roll2005].

Bezeichnung Cutoff SDP	Höhe in m	Messung $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$	Simulation $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$
Rom 6,4GV 1040MV	9755	$2,4 \pm 0,2$	$2,50 \pm 0,03$ (2,9)
Rom 6,4GV 1040MV	12185	$4,3 \pm 0,3$	$3,66 \pm 0,04$ (4,2)

9 Zusammenfassung der Ergebnisse

9.1 Ergebnisse

Zusammenfassend zeigt sich mit der Arbeit, dass eine Simulation der Messgeräte HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin mit dem Monte Carlo Transport Code FLUKA sehr gut zu bewerkstelligen ist. Nicht nur die deponierten Energien können mittels der Simulationen wiedergegeben werden, sondern sogar das Aussehen der energieaufgelösten Spektren kann mit den vorhandenen Simulationsgeometrien sehr genau beschrieben werden. Auf Grund der hier dargelegten Fakten ist es ab sofort möglich, viele zeit- und arbeitsintensiven Kalibriermessungen mit den generierten Simulationsgeometrien zu ersetzen, auch wenn man auf diese Kalibriermessungen niemals ganz verzichten kann, da sie als aktives Benchmarking der Simulationen unbedingt notwendig sind.

In einigen Einsatzgebieten ist diese Arbeit bereits erfolgreich verwendet worden. Die Berechnung der Winkelabhängigkeit der Messgeräte bei Einstrahlung von Neutronen oder auch die Response der Geräte in Bezug auf isotrope Einstrahlung, hätten experimentell und auch finanziell einen sehr großen Aufwand mit sich gebracht. Mittels Simulation konnten diese wichtigen Erkenntnisse mit einem relativ geringen Aufwand beschrieben werden. Unterstrichen wird die gute Eignung der Simulation bei dem Vergleich der Winkelabhängigkeit des HAWK-TEPC für Photonen, die im Durchschnitt für eine Bestrahlung mit ^{137}Cs bei 1,4% liegt und bei Bestrahlung mit ^{60}Co bei lediglich 0,9% liegt.

Etwas anders sieht es im Bereich der Simulation der Kosmischen Strahlung aus. Aufgrund der komplexen Problemstellung ist eine Übereinstimmung von Simulation und Messung im einstelligen Prozentbereich nicht möglich. Dies liegt nicht daran, dass die Simulation nicht ausgereift genug ist, sondern auch daran, dass auch bei Messungen der Kosmischen Strahlung größere Unsicherheiten zu berücksichtigen sind. Die Akzeptanz der simulierten Ergebnisse geht derzeit sogar soweit, dass diese von Gesetzes wegen her für die Dosisermittlung beim fliegenden Personal herangezogen werden kann [Öste2006].

In Abbildung 9-1 wird ein Vergleich der Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer mit der zugehörigen Simulation gezeigt. Als Vergleich ist auch noch der aktuelle Rechencode AVIDOS [Lato2009] für die Bedingungen dieser Messung in der Abbildung eingetragen. Auch im Zuge dieser Arbeit durchgeführte Messungen an der Erdoberfläche in Mitteleuropa sind eingezeichnet. Die Abbildung 9-1 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Simulation mit der Messung, das vermuten lässt, dass eine ausreichend detailgetreue Modellierung im Simulationscode durchgeführt wurde. Betrachtet man die Unsicherheiten der Messungen, so liegt die zugehörige Simulation vollständig innerhalb dieser Fehlerabschätzung.



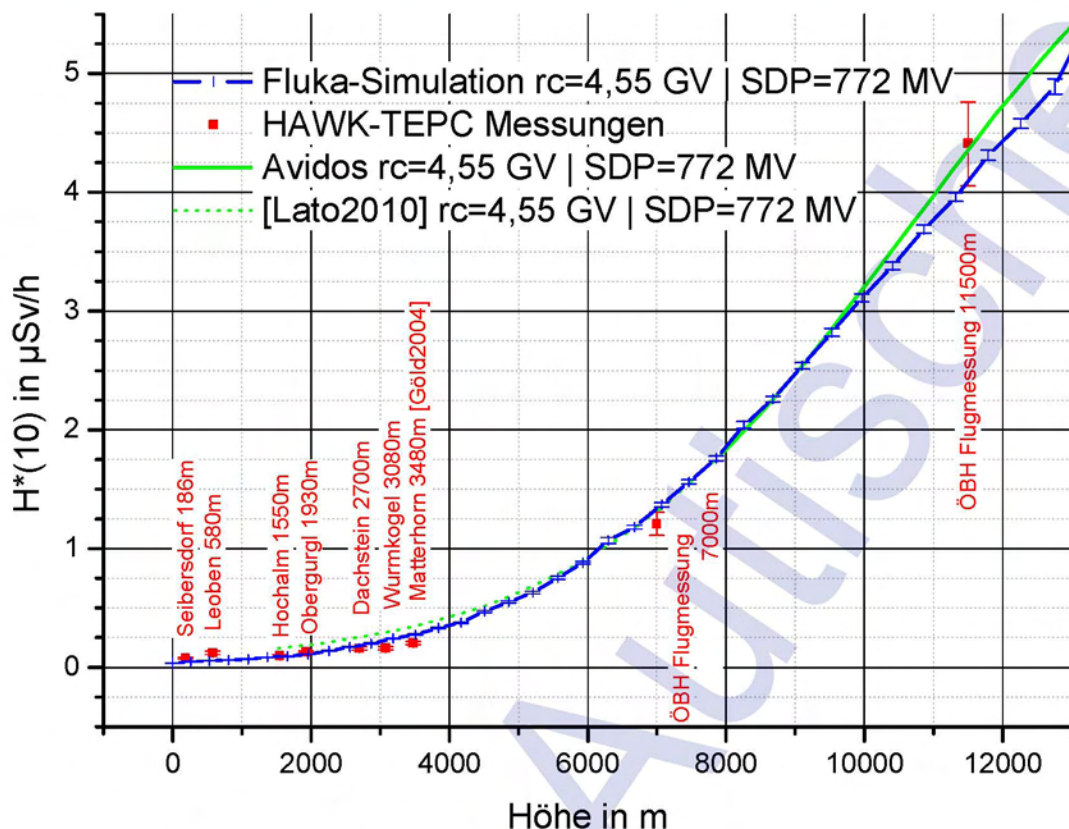


Abbildung 9-1: Umgebungsäquivalentdosisleistungvergleich $H^*(10)$ verschiedener Messpunkte auf der Erdoberfläche [Auti2003], [Göld2004] und bei den Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer. Zum Vergleich sind die Werte der entsprechenden Flukasimulation und von Avidos [Lato2009], sowie die extrapolierten Werte unter 8000m [Lato2010] in der Abbildung dargestellt.

Für den Großteil der veränderlichen Parameter (SDP, CutOff, Höhe, ...) beschreibt das vorhandene Atmosphären Modell die Dosis der Punkte sehr gut. In Tabelle 9-1 sind die Vergleiche der Flugmessungen mit den Simulationen dieser Arbeit zusammengefasst und die Abweichungen zu sehen. In einzelnen Spezialfällen treten hier immer wieder Abweichungen auf, die auch deutlich über 10% liegen können. Dabei ist auch noch festzuhalten, dass alle diese Abweichungen unterhalb der von Gesetzes wegen vorgegebenen maximalen Abweichung von $\pm 30\%$ liegen und somit eine Verwendung dieses Simulationsmodells für eine nach dem aktuellen Akkreditierungsgesetz [Öste1992] in Bezug auf die Funktionalität laut der Anlage 2 der FIP-StrSchV möglich ist [Öste2006]. Die durchschnittliche Abweichung der sechs Messungen beträgt 10,5%. Der Mittelwert des Quotienten von Messung zur Simulation beträgt 1,07.

Um hier eine bessere Übereinstimmung zu erzielen wird es notwendig sein, einerseits gerätetechnisch die Fehlerbehaftung der Messungen zu verringern und andererseits auch die Simulationsmodelle noch weiter zu verfeinern.

Tabelle 9-1: Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ von Flugmessungen mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen für drei unterschiedliche Messpositionen (Wolfsberg (Österreich), Aalborg (Dänemark) und Rom (Italien)) in jeweils 2 unterschiedlichen Flughöhen.

Ort (Land) Cutoff SDP	Höhe in m	Messung $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$	Simulation $H^*(10)$ in $\mu\text{Sv/h}$	Abweichung (Mess./Sim.)
Wolfsberg (A) 4,55GV 772MV	7000	$1,2 \pm 0,1$	$1,37 \pm 0,02$	20% (0,80)
Wolfsberg (A) 4,55GV 772MV	11500	$4,4 \pm 0,4$	$3,96 \pm 0,04$	6% (1,06)
Aalborg (DK) 1,8GV 1040MV	9755	$3,4 \pm 0,3$	$3,89 \pm 0,08$	13% (0,87)
Aalborg (DK) 1,8GV 1040MV	12185	$6,0 \pm 0,4$	$5,8 \pm 0,1$	3% (1,03)
Rom (I) 6,4GV 1040MV	9755	$2,4 \pm 0,2$	$2,50 \pm 0,03$	4% (0,96)
Rom (I) 6,4GV 1040MV	12185	$4,3 \pm 0,3$	$3,66 \pm 0,04$	17% (1,17)

Eindrucksvoll sind die Möglichkeiten der Simulation um Zusammenhänge zu zeigen, die messtechnisch, wenn überhaupt, nur mit immensem Aufwand möglich wären. So kann man, wie in Abbildung 9-2 bis Abbildung 9-4 beispielsweise gezeigt wird, den Anteil der Äquivalentdosisleistung, verursacht durch unterschiedliche Elementarteilchenarten in den Flughöhen, sehr elegant berechnen und darstellen. Abbildung 9-2 zeigt dabei die Simulation einer realen Messsituation (Messflug mit dem ÖBH). Abbildung 9-3 und Abbildung 9-4 sind zwei theoretische Konstellationen, bei denen eine möglichst geringe (Abbildung 9-3) bzw. hohe (Abbildung 9-4) Äquivalentdosisleistung vermutet wird.



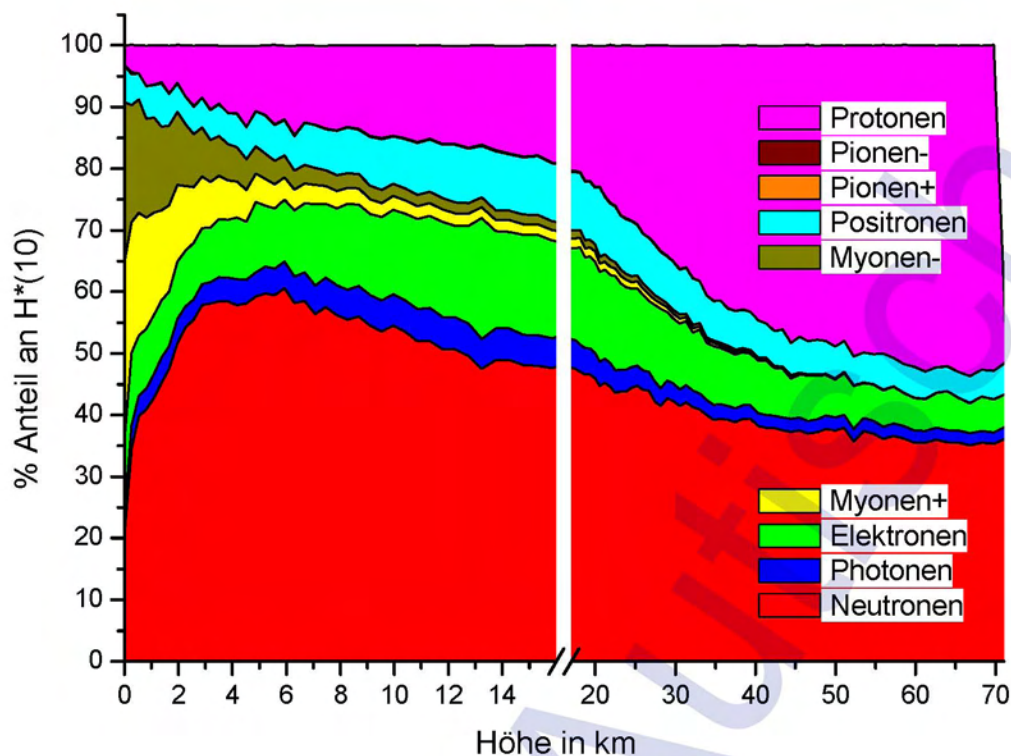


Abbildung 9-2: Simulierte Anteile von Protonen, Pionen, Positronen, Myonen, Elektronen, Photonen und Neutronen an der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Bedingungen der Messung mit dem Österreichischen Bundesheer (Cutoff=4,55GV SDP=772MV).

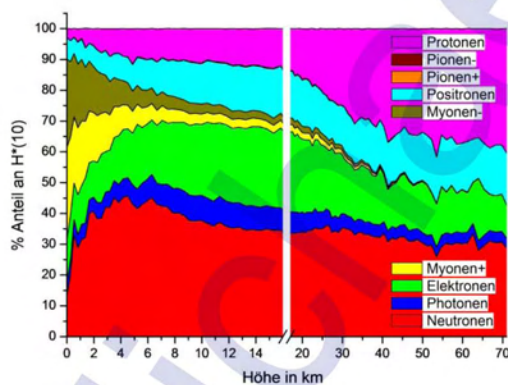


Abbildung 9-3: Simulierte Anteile von Protonen, Pionen, Positronen, Myonen, Elektronen, Photonen und Neutronen an der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellation (Cutoff=18GV SDP=1440MV).

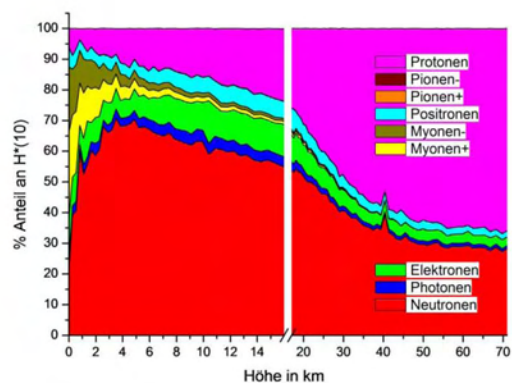


Abbildung 9-4: Simulierte Anteile von Protonen, Pionen, Positronen, Myonen, Elektronen, Photonen und Neutronen an der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellation (Cutoff=0,16GV SDP=450MV).



9.2 Ausblick

Durch die in der Arbeit erlangten Erkenntnisse, dass Ergebnisse der Simulationen durchaus brauchbar sind und viele reale Messungen ersetzen können, sollte doch immer wieder eine stichprobenartige Überprüfung durchgeführt werden. Es wurde gezeigt, dass der HAWK-TEPC für die Simulation hinreichend gut modelliert wurde, um mit der Simulation Ergebnisse zu simulieren, die sehr nahe an der Realität liegen. Auch wenn in dieser Arbeit auf den HAWK-SEPC und das LiuLin Messgerät eingegangen wird, so werden hier noch viele Arbeiten notwendig sein, um die Geräte ähnlich detailliert zu charakterisieren, wie es in dieser Arbeit beim HAWK-TEPC durchgeführt wurde. Interessant würden auch weitere theoretische Simulationsexperimente sein, die einen tieferen Einblick in die Vorgänge innerhalb der Messgeräte oder der Atmosphäre geben.

Für die Abschätzung der Jahresdosis bei fliegendem Personal zeigt die Arbeit, dass eine auf Simulationsdaten beruhende Berechnung durchaus ein gutes Werkzeug bietet. Von Gesetzes wegen wurde auch bereits darauf reagiert, indem eine auf Simulationen gestützte Dosisermittlung für Akkreditierte Auswertestellen zulässig ist. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch immer, dass spontane Ereignisse, wie zum Beispiel ein Ground Level Event, getrennt zu behandeln sind und hier auch noch weiterer Forschungsbedarf notwendig ist.



© Michael Autischer

10 Anhang

10.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Ballonaufstieg des Victor Hess um 1912 [Seki1985].....	5
Abbildung 2-1:	Zusammenfassung von gemessenen Protonenspektren im Weltraum und Ballonmessungen unterschiedlicher Experimente [Gais2000].....	10
Abbildung 2-2:	Differentielles Energiespektrum der kosmischen Strahlung [Allk1975].....	11
Abbildung 2-3:	Änderung der Zählrate in Abhängigkeit der Höhe. Das Maximum der Kurve bei zirka 20km Höhe wird Pfozter Maximum genannt. [Allk1975].....	12
Abbildung 2-4:	Beispiel eines Kaskadenschauers in der Erdatmosphäre. Der Hintergrund zeigt das innere Ötztal um den Ort Obergurgl.	12
Abbildung 2-5:	Zeitliche Variation der Sonnenflecken [More1988] [Usus2005].	13
Abbildung 2-6:	Verlauf der CLIMAX Daten sowie SDP von 1964 bis 2005 [nach Roes2002].	14
Abbildung 2-7:	Weltweite geografische Verteilung der Cutoff Rigidity r_c [Auti2003].....	16
Abbildung 3-1:	Qualitätsfaktor $Q(L)$ in Abhängigkeit der linearen Energieübertragung L [Öste2006].	20
Abbildung 3-2:	Anzahl der Ereignisse in Abhängigkeit der Linealen Energie einer Flugmessung.	22
Abbildung 3-3:	Anzahl der Ereignisse in logarithmischen Intervallen in Abhängigkeit der Linealen Energie einer Flugmessung nach Gleichung 3-15.	22
Abbildung 3-4:	Anzahl der Ereignisse in logarithmischen Intervallen multipliziert mit der mittleren Linealen Energie in Abhängigkeit der Linealen Energie bei einer Flugmessung.	23
Abbildung 3-5:	Normiertes mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ einer Flugmessung.	23
Abbildung 3-6:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot h(y)$ ergibt sich aus der Faltung des mikrodosimetrischen Spektrum $y \cdot d(y)$ mit dem Qualitätsfaktor $Q(L)$	23
Abbildung 3-7:	Normiertes mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ einer Flugmessung: Vergleich der Histogrammdarstellung und der über 5 Datenpunkte geglätteten Linie.....	24
Abbildung 4-1:	Aufbau eines kugelförmigen TEPC.	26
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung der Spektrumserweiterung durch ein simuliertes ^{60}Co Spektrum unterhalb von $0,5 \text{ keV}/\mu\text{m}$ bei einer Messung einer ^{60}Co Quelle.	27
Abbildung 4-3:	Bild des HAWK-TEPC ohne den dazugehörigen Koffer.....	27
Abbildung 4-4:	Schematischer Aufbau des HAWK-TEPC.....	28
Abbildung 4-5:	Schematischer Aufbau des HAWK-SEPC.....	29
Abbildung 4-6:	Ansicht zweier HAWK-SEPC Geräte.....	29

Abbildung 4-7:	Ansicht des LiuLin A4 in geschlossener Form (links) und mit geöffnetem Gehäuse (rechts). Auf der obersten Leiterplatte ist dabei das Detektorplättchen zu erkennen.....	30
Abbildung 5-1:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 662keV (^{137}Cs), 1,2 MeV (^{60}Co) und 6,6MeV.....	32
Abbildung 5-2:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-SEPC bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 662keV (^{137}Cs) und 1,2 MeV (^{60}Co).....	33
Abbildung 5-3:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC bei Bestrahlung von Neutronen unterschiedlicher Energien: 0,5MeV, 1,2MeV, 2,5MeV, 5MeV, 8MeV, 14,6MeV und 61MeV.....	34
Abbildung 5-4:	Ansicht des iTemba LABS.....	35
Abbildung 5-5:	Schematische Ansicht der Messpositionen.....	35
Abbildung 5-6:	Normierte Zählraten einer ^{238}U fission chamber bei der Neutronenenergie von 200MeV für die Einfallrichtungen von 0° und 16°	36
Abbildung 5-7:	Messposition bei 0°	36
Abbildung 5-8:	Messposition bei 16°	36
Abbildung 5-9:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung von Neutronenenergien von 100MeV in der 0° Messposition.....	37
Abbildung 5-10:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung mit Neutronenenergien von 100MeV in der 16° Messposition.....	37
Abbildung 5-11:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung mit Neutronenenergien von 200MeV in der 0° Messposition.....	38
Abbildung 5-12:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten bei Bestrahlung mit Neutronenenergien von 200MeV in der 16° Messposition.....	38
Abbildung 5-13:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC bei Bestrahlung von Neutronen unterschiedlicher Energien: 0,5MeV, 1,2MeV, 2,5MeV, 5MeV, 8MeV, 14,6MeV, 61MeV, 100MeV und 200MeV.....	39
Abbildung 5-14:	Relative Winkelabhängigkeit des HAWK-TEPC mit der Seriennummer #004 bei Bestrahlung von Neutronen mit 100MeV.....	41
Abbildung 6-1:	Schematischer Aufbau der Messposition der Leerwertmessung mit den Angaben der absoluten Seehöhen [Auti2003].....	42
Abbildung 6-2:	Normiertes mikrodosimetrisches Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit einem HAWK-TEPC in einem Bergwerk mit einer Gesteinsüberdeckung von ca. 800m.....	43

Abbildung 6-3:	Messposition in Obergurgl.....	44
Abbildung 6-4:	Verlauf des SDP in MV sowie der CLIMAX Daten während der Messung in Obergurgl.....	44
Abbildung 6-5:	Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ während der Messung in Obergurgl.....	45
Abbildung 6-6:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC in Obergurgl auf 1930m Seehöhe.....	46
Abbildung 6-7:	Dosisnormierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot h(y)$ gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC Geräten in Obergurgl auf 1930m Seehöhe.....	46
Abbildung 6-8:	Messposition am Wurmkogel.....	47
Abbildung 6-9:	Verlauf des SDP in MV sowie der CLIMAX Daten während der Messung am Wurmkogel.....	47
Abbildung 6-10:	Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ während der Messung am Wurmkogel.....	48
Abbildung 6-11:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ der absorbierten Dosis (absorbed dose) gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC auf der Wurmkogelhütte im Ötztal auf 3080m Seehöhe.....	49
Abbildung 6-12:	Dosisnormierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot h(y)$ gemessen mit zwei unterschiedlichen HAWK-TEPC auf der Wurmkogelhütte im Ötztal auf 3080m Seehöhe.....	49
Abbildung 6-13:	Messposition des HAWK-TEPC im Luftfahrzeug.....	50
Abbildung 6-14:	Messgebiet in der Obdach Area mit der eingezeichneten Flugbahn (blau) [Karte: BEV2010].....	50
Abbildung 6-15:	Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ der Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer in 11500m (FL380).....	51
Abbildung 6-16:	Umgebungsäquivalentdosisleistungsverlauf $H^*(10)$ der Flugmessung mit dem Österreichischen Bundesheer in 7000m (FL230).....	52
Abbildung 6-17:	Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungsverläufe $H^*(10)$ der beiden Flugmessungen in 7000m (FL230) und 11500m (FL380).....	53
Abbildung 6-18:	Vergleich der normierten mikrodosimetrischen $y \cdot d(y)$ Spektren der Flugmessungen mit dem HAWK-TEPC in 7000m (FL230) und 11500m (FL380) Höhe.....	53
Abbildung 6-19:	Vergleich der dosisnormierten mikrodosimetrischen Spektren $y \cdot h(y)$ der Flugmessungen in 7000m (FL230) und 11500m (FL380). Die Spektren sind hierbei nicht normiert, sondern mit $Q(L)$ sowie der Dosisleistung multipliziert.....	54
Abbildung 6-20:	Umgebungsäquivalentdosisleistungsvergleich $H^*(10)$ verschiedener Messpunkte auf der Erdoberfläche [Auti2003],[Göld2004] und bei den Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer. Zum Vergleich sind die Werte von Avidos [Lato2009] und die extrapolierten Werte unter 8000m [Lato2010] in der Abbildung dargestellt.....	55
Abbildung 7-1:	Simulationsgeometrie des HAWK-TEPCs.....	59

Abbildung 7-2:	Simulationsgeometrie des HAWK-SEPCs.....	59
Abbildung 7-3:	Simulationsgeometrie des LiuLin A4.....	60
Abbildung 7-4:	Fluenzverteilung bei einem Einstrahlungswinkel von 60° mit 1,2MeV Neutronen für den HAWK-TEPC.....	60
Abbildung 7-5:	Fluenzverteilung bei einem Einstrahlungswinkel von 135° mit 30MeV Neutronen für LiuLin.....	60
Abbildung 7-6:	Definition der Einfallswinkel für den HAWK-TEPC.....	61
Abbildung 7-7:	Definition der Einfallswinkel für den HAWK-SEPC.....	61
Abbildung 7-8:	Definition der Einfallswinkel für das LiuLin A4.....	61
Abbildung 7-9:	Schematischer Aufbau der isotropen Quelle [Auti2005].....	62
Abbildung 7-10:	Fluenzverteilung bei einer isotropen Einstrahlung mit 662keV (¹³⁷ Cs) Photonen für LiuLin A4.....	63
Abbildung 7-11:	Normierte mikrodosimetrische Spektren y-d(y) der absorbierten Dosis (absorbed dose) simuliert mit der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 50keV, 100keV, 300keV, 662keV (¹³⁷ Cs), 1,2 MeV (⁶⁰ Co), 2MeV und 6,6MeV.....	64
Abbildung 7-12:	Normierte mikrodosimetrische Spektren y-d(y) der absorbierten Dosis (absorbed dose) simuliert mit der HAWK-SEPC Geometrie bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 50keV, 100keV, 300keV, 662keV (¹³⁷ Cs), 1,2 MeV (⁶⁰ Co) und 2MeV.....	64
Abbildung 7-13:	Normierte mikrodosimetrische Spektren y-d(y) der absorbierten Dosis (absorbed dose) simuliert mit der LiuLin Geometrie bei Bestrahlung von Photonen unterschiedlicher Energien: 662keV (¹³⁷ Cs), 1,2 MeV (⁶⁰ Co) und 2MeV.....	65
Abbildung 7-14:	Vergleich der simulierten normierten mikrodosimetrischen Spektren y-d(y) der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung von Photonen mit der Energie von 1,2 MeV (⁶⁰ Co).....	66
Abbildung 7-15:	Vergleich der simulierten normierten mikrodosimetrischen Spektren y-d(y) der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung von Photonen mit der Energie von 662 keV (¹³⁷ Cs).....	67
Abbildung 7-16:	Simulierte absorbierte Energiespektren von HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung von Photonen mit der Energie von 1,2 MeV (⁶⁰ Co).....	68
Abbildung 7-17:	Simulierte absorbierte Energiespektren von Siliziumplättchen der Dicke von 2µm, 10µm, 50µm, und 100µm und 300µm bei Bestrahlung mit einer ⁶⁰ Co Quelle. Als Vergleich sind auch die Energiespektren der realen Simulationsgeometrie von HAWK-SEPC (1,63µm) und LiuLin (574µm) eingetragen.....	69
Abbildung 7-18:	Normierte mikrodosimetrische Spektren von Siliziumplättchen der Dicke von 2µm, 10µm, 50µm, und 100µm und 300µm bei Bestrahlung mit einer ⁶⁰ Co Quelle. Als Vergleich sind auch die mikrodosimetrische Spektren der realen Simulationsgeometrie von HAWK-SEPC (1,63µm) und LiuLin (574µm) eingetragen.....	69



Abbildung 7-19:	Simulierte relative Response R der Winkelabhängigkeit für die HAWK-TEPC Geometrie bei ^{60}Co und ^{137}Cs .	70
Abbildung 7-20:	Photonenfluenz pro Quellteilchen innerhalb des HAWK-TEPC Messgases für ^{137}Cs in Abhängigkeit der Energie. Vergleich von isotroper und 0° Einstrahlung.	71
Abbildung 7-21:	Elektronenfluenz pro Quellteilchen innerhalb des HAWK-TEPC Messgases für ^{137}Cs in Abhängigkeit der Energie. Vergleich von isotroper und 0° Einstrahlung.	71
Abbildung 7-22:	Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y\text{-}d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 300 keV. Vergleich von isotroper und 0° .	72
Abbildung 7-23:	Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y\text{-}d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 662 keV (^{137}Cs). Vergleich von isotroper und 0° .	72
Abbildung 7-24:	Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y\text{-}d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 1,2 MeV (^{60}Co). Vergleich von isotroper und 0° .	72
Abbildung 7-25:	Simulierte normierte mikrodosimetrisches Spektrum $y\text{-}d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit einer Energie von 2 MeV. Vergleich von isotroper und 0° Einstrahlung.	72
Abbildung 7-26:	Simulierte relative Response der Winkelabhängigkeit für die HAWK-SEPC Geometrie bei Bestrahlung mit Photonen mit den Energien von 662 keV (^{137}Cs) und 1,2 MeV (^{60}Co).	73
Abbildung 7-27:	Simulierte relative Response R der Winkelabhängigkeit für die LiuLin Geometrie bei ^{60}Co und ^{137}Cs .	74
Abbildung 7-28:	Simulierte mikrodosimetrische Spektren $y\text{-}d(y)$ der HAWK-TEPC Geometrie für unterschiedliche Neutronenenergien: 1,2 MeV, 5 MeV, 61 MeV, 100 MeV und 200 MeV.	75
Abbildung 7-29:	Simulierte mikrodosimetrische Spektren $y\text{-}d(y)$ der HAWK-SEPC Geometrie für unterschiedliche Neutronenenergien: 61 MeV, 100 MeV und 200 MeV.	75
Abbildung 7-30:	Simulierte mikrodosimetrische Spektren $y\text{-}d(y)$ der LiuLin Geometrie für unterschiedliche Neutronenenergien: 61 MeV, 100MeV und 200 MeV.	76
Abbildung 7-31:	Vergleich der mikrodosimetrischen Spektren $y\text{-}d(y)$ der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung mit Neutronen von 61MeV.	77
Abbildung 7-32:	Vergleich der mikrodosimetrischen Spektren $y\text{-}d(y)$ der Simulationsgeometrien von HAWK-TEPC, HAWK-SEPC und LiuLin bei Bestrahlung mit Neutronen von 100MeV.	77
Abbildung 7-33:	Relative Response der simulierten HAWK-TEPC Simulationsgeometrie in Abhängigkeit des Einfallswinkels für unterschiedliche Neutronenenergien. Zusätzlich ist die Response für die jeweiligen Neutronenenergien von 0,5 MeV, 1,2 MeV, 5 MeV und 61 MeV bei isotroper Einstrahlung eingetragen.	78
Abbildung 7-34:	Relative Response der simulierten HAWK-SEPC Simulationsgeometrie in Abhängigkeit des Einfallswinkels für unterschiedliche Neutronenenergien. Zusätzlich ist die Response für die jeweiligen Neutronenenergien von 5 MeV und 61 MeV bei isotroper Einstrahlung eingetragen.	79



Abbildung 7-35:	Relative Response der simulierten LiuLin Simulationsgeometrie in Abhängigkeit des Einfallswinkels für unterschiedliche Neutronenenergien. Zusätzlich ist die Response für die jeweiligen Neutronenenergien von 5 MeV und 61 MeV bei isotroper Einstrahlung eingetragen.....	80
Abbildung 7-36:	Anteile der elementaren Gruppen Z=1 (H) , Z=2 (He), Z=7 (Li), Z=14 (Si) und Z=28 (Fe) am Primärspektrum für ein SDP von 772 MV.....	82
Abbildung 7-37:	Anteile der einzelnen Massengruppen als Funktion der kinetischen Energie pro Nukleon bei der Verwendung von Modell 3 [Gais2001].....	83
Abbildung 7-38:	Primärspektren der unterschiedlichen Modelle für Z=1 bei einem SDP von 772 MV.....	84
Abbildung 7-39:	Primärspektren der unterschiedlichen Modelle für Z=1 bei einem SDP von 772 MV. Zum Aufzeigen der Unterschiede sind die Spektren mit $E^{2,5}$ multipliziert.....	84
Abbildung 7-40:	Verhältnisse der Primärspektren der unterschiedlichen Modelle im Vergleich zu Modell 0 bei einem SDP von 772 MV.....	85
Abbildung 7-41:	Primärspektren mit Z=1 bei unterschiedlichem SDP von 450MV, 772MV und 1440MV. Dargestellt ist die Fluenz in Abhängigkeit der Energie.....	86
Abbildung 7-42:	Schematische Abbildung des verwendeten Atmosphärenmodells.....	87
Abbildung 7-43:	Relative Fluenz von Photonen, Elektronen, Neutronen, Myonen (positiv und negativ) und Protonen in Abhängigkeit des Luftdrucks bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	89
Abbildung 7-44:	Relative Energiespektren von Photonen, Elektronen, Neutronen, Myonen (positiv und negativ) und Protonen für 11.500m Höhe, einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	89
Abbildung 7-45:	Relative kumulative Energiespektren von Photonen, Elektronen, Neutronen, Myonen (positiv und negativ) und Protonen für 11.500m Höhe, einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	90
Abbildung 7-46:	Relativer Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Energiedosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhe bei 7000m (FL230) und bei 11500m (FL380).....	91
Abbildung 7-47:	Simulierter Verlauf der Äquivalentdosisleistung in Abhängigkeit der Flughöhe für einen CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	92
Abbildung 7-48:	Relativer Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhe bei FL 230 (7000m) und bei FL380 (11500m).....	93
Abbildung 7-49:	Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhe bei FL 230 (7000m) und bei FL380 (11500m).....	93
Abbildung 7-50:	Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhen von 0-70km.....	94
Abbildung 7-51:	Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV für die Höhen von 0-20km.....	94

Abbildung 7-52:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	95
Abbildung 7-53:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	96
Abbildung 7-54:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	96
Abbildung 7-55:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	97
Abbildung 7-56:	Simulierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-h(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m mit dem einhüllenden resultierenden dosisnormierten Spektrum bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	97
Abbildung 7-57:	Simulierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-h(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m mit dem einhüllenden resultierenden dosisnormierten Spektrum und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	98
Abbildung 7-58:	Simulierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	99
Abbildung 7-59:	Mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	99
Abbildung 7-60:	Mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	100
Abbildung 7-61:	Mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	100
Abbildung 7-62:	Mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	101
Abbildung 7-63:	Mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	101
Abbildung 7-64:	Mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 7000m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	102
Abbildung 7-65:	Mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m inklusive des resultierenden Spektrums und einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.	102
Abbildung 7-66:	Äquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellationen Min (CutOff=18GV und SDP=1440 MV) und Max (CutOff=0,16GV und SDP=450MV) bei Höhen von 0-70km.	104
Abbildung 7-67:	Äquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellationen Min (CutOff=18GV und SDP=1440 MV) und Max (CutOff=0,16GV und SDP=450MV) bei Höhen von 0-20km.	104

Abbildung 7-68:	Relativer Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einer Flughöhe von 11500m bei den beiden Konstellationen CutOff von 0,16GV und SDP von 450 MV sowie CutOff von 18GV und SDP von 1440 MV.....	105
Abbildung 7-69:	Absoluter Anteil der einzelnen Teilchen an der gesamten Äquivalentdosisleistung bei einer Flughöhe von 11500m bei den beiden Konstellationen CutOff von 0,16GV und SDP von 450 MV, sowie CutOff von 18GV und SDP von 1440 MV.....	106
Abbildung 7-70:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).....	107
Abbildung 7-71:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).....	107
Abbildung 7-72:	Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y-d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).....	108
Abbildung 7-73:	Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y-d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).....	108
Abbildung 7-74:	Simuliertes dosisnormiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y-h(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).....	109
Abbildung 7-75:	Simuliertes dosisnormiertes mikrodosimetrisches HAWK-TEPC Spektrum $y-h(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).....	109
Abbildung 7-76:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).....	110
Abbildung 7-77:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).....	110
Abbildung 7-78:	Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-SEPC Spektrum $y-d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).....	111
Abbildung 7-79:	Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches HAWK-SEPC Spektrum $y-d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).....	111
Abbildung 7-80:	Simulierte normierte mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).....	112
Abbildung 7-81:	Simulierte normierte mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y-d(y)$ der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).....	112



Abbildung 7-82:	Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches LiuLin Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Min (CutOff 18 GV und SDP 1440 MV).	113
Abbildung 7-83:	Simuliertes normiertes mikrodosimetrisches LiuLin Spektrum $y \cdot d(y)$ mit den Anteilen der betrachteten Teilchen in 11500m in Konstellation Max (CutOff 0,16 GV und SDP 450 MV).	113
Abbildung 7-84:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV.	114
Abbildung 7-85:	Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV.	115
Abbildung 7-86:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-SEPC Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV.	115
Abbildung 7-87:	Simulierte normierte mikrodosimetrische LiuLin Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV.	116
Abbildung 7-88:	Simulierte normierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Photonen Spektren $y \cdot d(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV bei 11.500m.	117
Abbildung 7-89:	Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Photonen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV bei 11.500m.	117
Abbildung 7-90:	Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Neutronen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV bei 11.500m.	117
Abbildung 7-91:	Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Elektronen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV bei 11.500m.	117
Abbildung 7-92:	Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Protonen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV bei 11.500m.	117
Abbildung 7-93:	Simulierte dosisnormierte mikrodosimetrische HAWK-TEPC Myonen Spektren $y \cdot h(y)$ als Vergleich der beiden Konstellationen CutOff 0,16 GV SDP=450MV und CutOff=18GV SDP=1440MV bei 11.500m.	117
Abbildung 8-1:	Normierte mikrodosimetrische Spektren $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für ^{137}Cs . Vergleich von Messung und Simulation.	119
Abbildung 8-2:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-SEPC für ^{137}Cs . Vergleich der normierten Simulation und der Messung, die am grünen Punkt bei $0,8\text{keV}/\mu\text{m}$ eingefügt wurde.	119
Abbildung 8-3:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des LiuLin für ^{137}Cs . Vergleich von Messung und Simulation.	120
Abbildung 8-4:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y \cdot d(y)$ des HAWK-TEPC für ^{60}Co . Vergleich von Messung und Simulation.	121

Abbildung 8-5:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-SEPC für ^{60}Co . Vergleich der normierten Simulation und der Messung, die am grünen Punkt bei $0,8\text{keV}/\mu\text{m}$ eingefügt wurde.	121
Abbildung 8-6:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des LiuLin für ^{60}Co . Vergleich von Messung und Simulation.	122
Abbildung 8-7:	Response der Energiedeposition beim HAWK-TEPC in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels relativ zur Einstrahlung aus 0° für Messungen und Simulation bei unterschiedlichen Photonenenergien.	123
Abbildung 8-8:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit $0,5\text{ MeV}$. Vergleich von Messung und Simulation.	124
Abbildung 8-9:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit $1,2\text{ MeV}$. Vergleich von Messung und Simulation.	125
Abbildung 8-10:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit $2,5\text{ MeV}$. Vergleich von Messung und Simulation.	125
Abbildung 8-11:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 5 MeV . Vergleich von Messung und Simulation.	126
Abbildung 8-12:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 8 MeV . Vergleich von Messung und Simulation.	126
Abbildung 8-13:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit $14,6\text{ MeV}$. Vergleich von Messung und Simulation.	127
Abbildung 8-14:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 61 MeV . Vergleich von Messung und Simulation.	127
Abbildung 8-15:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 100 MeV . Vergleich von Messung und Simulation.	128
Abbildung 8-16:	Mikrodosimetrisches Spektrum $y-d(y)$ des HAWK-TEPC für Neutronen mit 200 MeV . Vergleich von Messung und Simulation.	128
Abbildung 8-17:	Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Flugmessung mit dem ÖBH verglichen mit der Simulation in Abhängigkeit der Flughöhe (Cutoff= $4,55\text{GV}$, SDP= 77MV).	130
Abbildung 8-18:	Vergleich der gemessenen und simulierten normierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ in FL230 (7000m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff= $4,55\text{GV}$, SDP= 77MV).	131
Abbildung 8-19:	Vergleich der gemessenen und simulierten dosisnormierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y-h(y)$ in FL230 (7000m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff= $4,55\text{GV}$, SDP= 77MV).	131
Abbildung 8-20:	Vergleich der gemessenen und simulierten normierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y-d(y)$ in FL380 (11500m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff= $4,55\text{GV}$, SDP= 77MV).	132
Abbildung 8-21:	Vergleich der gemessenen und simulierten dosisnormierten mikrodosimetrischen HAWK-TEPC Spektren $y-h(y)$ in FL380 (11500m) der Messung mit dem ÖBH (Cutoff= $4,55\text{GV}$, SDP= 77MV).	132



Abbildung 8-22:	Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Messpunkte über der Stadt Aalborg mit den dazu durchgeführten Simulationen: Atmosphärenmodell 0 [Roll2005] und das aktuelle Modell 3.	133
Abbildung 8-23:	Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ simuliert für den Messflug über Aalborg in Abhängigkeit der Höhe. Die Teilchen, die den größten Beitrag zur Gesamtdosis beitragen, sind anteilmäßig ebenfalls eingetragen.	134
Abbildung 8-24:	Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ der Messpunkte über der Stadt Rom mit den dazu durchgeführten Simulationen: Atmosphärenmodell 0 [Roll2005] und das aktuelle Modell 3.	135
Abbildung 8-25:	Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ simuliert für den Messflug über Rom in Abhängigkeit der Höhe. Die Teilchen, die den größten Beitrag zur Gesamtdosis beitragen, sind anteilmäßig ebenfalls eingetragen.	136
Abbildung 9-1:	Umgebungsäquivalentdosisleistungsvergleich $H^*(10)$ verschiedener Messpunkte auf der Erdoberfläche [Auti2003], [Göld2004] und bei den Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer. Zum Vergleich sind die Werte der entsprechenden Flukasimulation und von Avidos [Lato2009], sowie die extrapolierten Werte unter 8000m [Lato2010] in der Abbildung dargestellt.	138
Abbildung 9-2:	Simulierte Anteile von Protonen, Pionen, Positronen, Myonen, Elektronen, Photonen und Neutronen an der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Bedingungen der Messung mit dem Österreichischen Bundesheer (Cutoff=4,55GV SDP=772MV).....	140
Abbildung 9-3:	Simulierte Anteile von Protonen, Pionen, Positronen, Myonen, Elektronen, Photonen und Neutronen an der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellation (Cutoff=18GV SDP=1440MV).....	140
Abbildung 9-4:	Simulierte Anteile von Protonen, Pionen, Positronen, Myonen, Elektronen, Photonen und Neutronen an der Umgebungsäquivalentdosisleistung $H^*(10)$ in Abhängigkeit der Höhe für die Konstellation (Cutoff=0,16GV SDP=450MV).....	140

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Veränderung der Cutoff Rigidity vom 16. bis 20. Jahrhundert [Shea2003].	16
Tabelle 3-1:	Strahlungs-Wichtungsfaktoren [Öste2006].	18
Tabelle 3-2:	Gewebe-Wichtungsfaktoren [Öste2006].	19
Tabelle 3-3:	Qualitätsfaktor $Q(L)$ in Abhängigkeit der linearen Energieübertragung L [Öste2006].	19
Tabelle 5-1:	Bestimmung des Neutronenkalibrierfaktors für 100MeV.	40
Tabelle 5-2:	Bestimmung der Winkelabhängigkeit für 100MeV für den HAWK-TEPC mit der Seriennummer #004.	41
Tabelle 6-1:	Ergebnis der Leerwertmessung 800 m unter Tage [Auti2003].	43
Tabelle 6-2:	gemessene Energiedosisleistungen und Äquivalent an den Messpositionen.	50
Tabelle 6-3:	Gemessene Energiedosisleistungen und Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ an den Messpositionen in 7000m und 11500m der Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer.	54

Tabelle 6-4:	Zusammenfassung der Messungen am Gelände des ARC Seibersdorf, in Graz, in Leoben, auf der Hochalm, in Obergurgl, am Dachstein, am Wurmkogel, am Matterhorn [Göld2004] sowie der Flugmessungen in 7000m und 11500m Höhe mit dem ÖBH. Verglichen werden dabei die Energiedosisleistungen und die Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$. Des Weiteren werden diese Werte noch weiter aufgesplittet in die Anteile $<10\text{keV}/\mu\text{m}$ (LowLET) und $>10\text{keV}/\mu\text{m}$ (HighLET).....	56
Tabelle 7-1:	Transportenergiebereiche der einzelner Teilchen in Fluka [Fass2009].....	58
Tabelle 7-2:	Ausbeute der isotropen Quelle.....	62
Tabelle 7-3:	Vergleich der MCLs der verwendeten Geräte.....	66
Tabelle 7-4:	Relative Response R des HAWK-TEPC bei isotroper Einstrahlung für Photonen.....	71
Tabelle 7-5:	Relative Response R der Äquivalentdosisleistung der HAWK-SEPC Simulationsgeometrie bei isotroper Einstrahlung für Photonen.....	73
Tabelle 7-6:	Relative Response R der Äquivalentdosisleistung bei der LiuLin Simulationsgeometrie bei isotroper Einstrahlung für Photonen unterschiedlicher Energien.....	74
Tabelle 7-7:	Relative Response R der Äquivalentdosisleistung des HAWK-TEPC bei isotroper Einstrahlung für Neutronen mit unterschiedlichen Energien.....	79
Tabelle 7-8:	Relative Response R der Äquivalentdosisleistung des HAWK-SEPC bei isotroper Einstrahlung für Neutronen mit unterschiedlichen Energien.....	80
Tabelle 7-9:	Relative Response R der Äquivalentdosisleistung des LiuLin bei isotroper Einstrahlung für Neutronen mit unterschiedlichen Energien.....	81
Tabelle 7-10:	Fit Parameter für Gleichung 7-1 [Gais2001].....	83
Tabelle 7-11:	Auflistung der in der Simulationsgeometrie enthaltenen Höhen der Luftschichten mit den zugehörigen Luftdrücken.....	87
Tabelle 7-12:	Energiedosisanteile der einzelnen Teilchen bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	90
Tabelle 7-13:	Äquivalentdosisleistungsanteile der einzelnen Teilchen für die beiden Simulationshöhen von 7000m und 11500m bei einem CutOff von 4,55 GV und einem SDP von 772 MV.....	92
Tabelle 7-14:	Aufstellung der verwendeten SDP und Cutoff Rigidity Werte für die Simulationen der Konstellationen Min und Max.....	103
Tabelle 7-15:	Äquivalentdosisanteile der einzelnen Teilchen bei einer Flughöhe von 11500m für die beiden Konstellationen.....	105
Tabelle 8-1:	Vergleich von Messung[Auti2003] und Simulation des HAWK-TEPC Messgeräts. Die Werte ergeben sich dabei jeweils bezogen auf die Werte bei einer Einstrahlung von 0°	123
Tabelle 8-2:	Vergleich der Äquivalentdosisleistungen der beiden Flugmessungen mit dem Österreichischen Bundesheer mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen für die beiden unterschiedlichen Flughöhen.....	129
Tabelle 8-3:	Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ der beiden Flugmessungen über Aalborg mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen	

	Simulationsergebnissen in den 2 unterschiedlichen Flughöhen [Lato2007]. Bei den Ergebnissen der Simulation finden sich in den Klammern auch die Ergebnisse bei Verwendung des Atmosphärenmodells 0 [Roll2005].	134
Tabelle 8-4:	Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ der beiden Flugmessungen über Rom mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen in den zwei unterschiedlichen Flughöhen [Lato2007]. Bei den Ergebnissen der Simulation finden sich in den Klammern auch die Ergebnisse bei Verwendung des Atmosphärenmodell 0 [Roll2005].	136
Tabelle 9-1:	Vergleich der Umgebungsäquivalentdosisleistungen $H^*(10)$ von Flugmessungen mit dem HAWK-TEPC mit den jeweiligen Simulationsergebnissen für drei unterschiedliche Messpositionen (Wolfsberg (Österreich), Aalborg (Dänemark) und Rom (Italien)) in jeweils 2 unterschiedlichen Flughöhen.	139

10.3 Formelverzeichnis

Gleichung 2-1:	Definition des Gyroradius [Chen1984].	15
Gleichung 2-2:	Magnetische Steifigkeit eines Teilchens [Cook1991].	15
Gleichung 2-3:	Vertical cosmic ray cutoff rigidity eines Teilchens [Stan2004].	15
Gleichung 3-1:	Definition der Energiedosis [Euro1996].	17
Gleichung 3-2:	Definition der Energiedosisleistung [ICRP1991].	17
Gleichung 3-3:	Definition der Äquivalentdosis [ICRP1996].	17
Gleichung 3-4:	Definition der Äquivalentdosis [Öste2006].	17
Gleichung 3-5:	Definition der Äquivalentdosis in einem gemischten Strahlenfeld [Öste2006].	17
Gleichung 3-6:	Definition der effektiven Dosis [Euro1996].	18
Gleichung 3-7:	Definition der linearen Energieübertragung [Öste2006].	19
Gleichung 3-8:	Definition von Lineal Energie [ICRP1991].	20
Gleichung 3-9:	Definition von Fluenz [ICRP1996].	20
Gleichung 3-10:	MCL einer Kugel [Brad2000].	21
Gleichung 3-11:	MCL eines Zylinders [Brad2000].	21
Gleichung 3-12:	MCL eines Würfels [Brad2000].	21
Gleichung 3-13:	MCL eines Quaders [Brad2000].	21
Gleichung 3-14:	MCL für einen allgemeinen konvexen Körper [Brad2000].	21
Gleichung 3-15:	Logarithmische Intervallbreite [ICRU1983].	22
Gleichung 3-16:	Normierungsfunktion für mikrodosimetrische Spektren [ICRU1983].	22
Gleichung 4-1:	Längenkorrektur aufgrund Dichteunterschiede [Beck2003].	28

Gleichung 5-1: Berechnung des Neutronenkalibrierfaktors.....	40
Gleichung 5-2: Berechnung der Response für unterschiedliche Einfallswinkel n.....	40
Gleichung 7-1: Fitfunktion der differentiellen Spektren in kinetischer Energie pro Nukleon [Gais2001].	83
Gleichung 7-2: Primärspektrumskorrektur mit dem Solar Potential [Batt2003].	85

10.4 Literaturverzeichnis

- [Acci2009] V. A. Acciari, E. Aliu, T. Arlen, M. Bautista, M. Beilicke, W. Benbow, S. M. Bradbury, J. H. Buckley, V. Bugaev, Y. Butt, K. Byrum, A. Cannon, O. Celik, A. Cesarini, Y. C. Chow, L. Ciupik, P. Cogan, W. Cui, R. Dickherber, S. J. Fegan, J. P. Finley, P. Fortin, L. Fortson, A. Furniss, D. Gall, G. H. Gillanders, J. Grube, R. Guenette, G. Gyuk, D. Hanna, J. Holder, D. Horan, C. M. Hui, T. B. Humensky, A. Imran, P. Kaaret, N. Karlsson, D. Kieda, J. Kildea, A. Konopelko, H. Krawczynski, F. Krennrich, M. J. Lang, S. LeBohec, G. Maier, A. McCann, M. McCutcheon, J. Millis, P. Moriarty, R. A. Ong, A. N. Otte, D. Pandel, J. S. Perkins, D. Petry, M. Pohl, J. Quinn, K. Ragan, L. C. Reyes, P. T. Reynolds, E. Roache, E. Roache, H. J. Rose, M. Schroedter, G. H. Sembroski, A. W. Smith, S. P. Swordy, M. Theiling, J. A. Toner, A. Varlotta, S. Vincent, S. P. Wakely, J. E. Ward, T. C. Weekes, A. Weinstein, D. A. Williams, S. Wissel, M. Wood, R. C. Walker, F. Davies, P. E. Hardee, W. Junor, C. Ly F. Aharonian, 31, 43 A. G. Akhperjanian, G. Anton, U. Barres de Almeida, A. R. Bazer-Bachi, Y. Becherini, B. Behera, K. Bernlöhr, A. Bochow, C. Boisson, J. Bolmont, V. Borrel, J. Brucker, F. Brun, P. Brun, R. Bühler, T. Bulik, I. Büsching, T. Boutelier, P. M. Chadwick, A. Charbonnier, R. C. G. Chaves, A. Cheesebrough, L.-M. Chouet, A. C. Clapson, G. Coignet, M. Dalton, M. K. Daniel, I. D. Davids, B. Degrange, C. Deil, H. J. Dickinson, A. Djannati-Ataï, W. Domainko, L. O’C. Drury, F. Dubois, G. Dubus, J. Dyks, M. Dyrda, K. Egberts, D. Emmanoulopoulos, P. Espigat, C. Farnier, F. Feinstein, A. Fiasson, A. Förster, G. Fontaine, M. Füßling, S. Gabici, Y. A. Gallant, L. Gérard, D. Gerbig, B. Giebels, J. F. Glicenstein, B. Glück, P. Goret, D. Göhring, D. Hauser, M. Hauser, S. Heinz, G. Heinzelmann, G. Henri, G. Hermann, J. A. Hinton, A. Hoffmann, W. Hofmann, M. Holleran, S. Hoppe, D. Horns, A. Jacholkowska, O. C. de Jager, C. Jahn, I. Jung, K. Katarzyński, U. Katz, S. Kaufmann, E. Kendziorra, M. Kerschhaggl, D. Khangulyan, B. Khélifi, D. Keogh, W. Kluźniak, T. Kneiske, Nu. Komin, K. Kosack, G. Lamanna, J.-P. Lenain, T. Lohse, V. Marandon, J. M. Martin, O. Martineau-Huynh, A. Marcowith, D. Maurin, T. J. L. McComb, M. C. Medina, R. Moderski, E. Moulin, M. Naumann-Godo, M. de Naurois, D. Nedbal, D. Nekrassov, B. Nicholas, J. Niemiec, S. J. Nolan, S. Ohm, J.-F. Olive, E. de Oña Wilhelmi, K. J. Orford, M. Ostrowski, M. Panter, M. Paz Arribas, G. Pedalletti, G. Pelletier, P.-O. Petrucci, S. Pita, G. Pühlhofer, M. Punch, A. Quirrenbach, B. C. Raubenheimer, M. Raue, S. M. Rayner, M. Renaud, F. Rieger, J. Ripken, L. Rob, S. Rosier-Lees, G. Rowell, B. Rudak, C. B. Rulten, J. Ruppel, V. Sahakian, A. Santangelo, R. Schlickeiser, F. M. Schöck, R. Schröder, U. Schwanke, S. Schwarzborg, S. Schwemmer, A. Shalchi, M. Sikora, J. L. Skilton, H. Sol, D. Spangler, Ł. Stawarz, R. Steenkamp, C. Stegmann, F. Stinzing, G. Superina, A. Szostek, P. H. Tam, J.-P. Tavernet, R. Terrier, O. Tibolla, M. Tluczykont, C. van Eldik, G. Vasileiadis, C. Venter, L. Venter, J. P. Vialle, P. Vincent, M. Vivier, H. J. Völk, F. Volpe, S. J. Wagner, M. Ward, A. A. Zdziarski, A. Zech, H. Anderhub, L. A. Antonelli, P. Antoranz, M. Backes, C. Baixeras, S. Balestra, J. A. Barrio, D. Bastieri, J. Becerra González, J. K. Becker, W. Bednarek, K. Berger, E. Bernardini, A. Biland, R. K. Bock, G. Bonnoli, P. Bordas, D. Borla Tridon, V. Bosch-Ramon, D. Bose, I. Braun, T. Bretz, I. Britvitch, M. Camara, E. Carmona, S. Commichau, J. L. Contreras, J. Cortina, M. T. Costado, S. Covino, V. Curtef, F. Dazzi, A. De Angelis, E. De Cea del Pozo, C. Delgado Mendez, R. De los Reyes, B. De Lotto, M. De Maria, F. De Sabata, A. Dominguez, D. Dorner, M. Doro, D. Elsaesser, M. Errando, D. Ferenc, E. Fernández, R. Firpo, M. V. Fonseca, L. Font, N. Galante, R. J. García López, M. Garczarczyk, M. Gaug, F. Goebel, D. Hadasch, M. Hayashida, A. Herrero, D. Hildebrand, D. Höhne-Mönch, J. Hose, C. C. Hsu, T. Jogler, D. Kranich, A. La Barbera, A. Laille, E. Leonardo, E. Lindfors, S. Lombardi, F. Longo, M.

López, E. Lorenz, P. Majumdar, G. Maneva, N. Mankuzhiyil, K. Mannheim, L. Maraschi, M. Mariotti, M. Martínez, D. Mazin, M. Meucci, J. M. Miranda, R. Mirzoyan, H. Miyamoto, J. Moldón, M. Moles, A. Moralejo, D. Nieto, K. Nilsson, J. Ninkovic, I. Oya, R. Paoletti, J. M. Paredes, M. Pasanen, D. Pascoli, F. Pauss, R. G. Pegna, M. A. Perez-Torres, M. Persic, L. Peruzzo, F. Prada, E. Prandini, N. Puchades, I. Reichardt, W. Rhode, M. Ribó, J. Rico, M. Rissi, A. Robert, S. Rügamer, A. Saggion, T. Y. Saito, M. Salvati, M. Sanchez-Conde, K. Satalecka, V. Scalzotto, V. Scapin, T. Schweizer, M. Shayduk, S. N. Shore, N. Sidro, A. Sierpowska-Bartosik, A. Sillanpää, J. Sitarek, D. Sobczynska, F. Spanier, A. Stamerra, L. S. Stark, L. Takalo, F. Tavecchio, P. Temnikov, D. Tescaro, M. Teshima, D. F. Torres, N. Turini, H. Vankov, R. M. Wagner, V. Zabalza, F. Zandanel, R. Zanin, J. Zapatero; Radio Imaging of the Very-High-Energy gamma-Ray Emission Region in the Central Engine of a Radio Galaxy; Science Vol 325; Issue 5939; pp. 444; July; 2009

- [Agra1996] V. Agrawal, T.K. Gaisser, P. Lipari and T. Stanev; Atmospheric neutrino flux above 1 GeV; Phys. Rev. D; Volume 53; p 1314-1323; Feb; 1996
- [Alca2000] J. Alcaraz, B. Alpat, G. Ambrosi, H. Anderhub, L. Ao, A. Arefiev, P. Azzarello, E. Babucci, L. Baldini, M. Basile, D. Barancourt, F. Barao, G. Barbier, G. Barreira, R. Battiston, R. Becker, U. Becker, L. Bellagamba, P. Bene, J. Berdugo, P. Berges, B. Bertucci, A. Biland, S. Bizzaglia, S. Blasko, G. Boella, M. Boschini, M. Bourquin, L. Brocco, G. Bruni, M. Buenerd, J.D. Burger, W.J. Burger, X.D. Cai, C. Camps, P. Cannarsa, M. Capell, D. Casadei, J. Casaus, G. Castellini, C. Cecchi, Y.H. Chang, H.F. Chen, H.S. Chen, Z.G. Chen, N.A. Chernoplekov, T.H. Chiueh, Y.L. Chuang, F. Cindolo, V. Commichau, A. Contin, P. Crespo, M. Cristinziani, J.P. da Cunha, T.S. Dai, J.D. Deus, N. Dinu, L. Djambazov, I. D'Antone, Z.R. Dong, P. Emonet, J. Engelberg, F.J. Eppling, T. Eronen, G. Esposito, P. Extermann, J. Favier, E. Fiandrini, P.H. Fisher, G. Fluegge, N. Fouque, Yu. Galaktionov, M. Gervasi, P. Giusti, D. Grandi, O. Grimm, W.Q. Gu, K. Hangarter, A. Hasan, V. Hermel, H. Hofer, M.A. Huang, W. Hungerford, M. Ionica, R. Ionica, M. Jongmanns, K. Karlamaa, W. Karpinski, G. Kenney, J. Kenny, W. Kim, A. Klimentov, R. Kossakowski, V. Koutsenko, M. Kraeber, G. Laborie, T. Laitinen, G. Lamanna, G. Laurenti, A. Lebedev, S.C. Lee, G. Levi, P. Levtchenko, C.L. Liu, H.T. Liu, I. Lopes, G. Lu, Y.S. Lu, K. Luebelmeyer, D. Luckey, W. Lustermann, C. Mana, A. Margotti, F. Mayet1, R.R. McNeil, B. Meillon, M. Menichelli, A. Mihul, A. Mourao, A. Mujunen, F. Palmonari, A. Papi, I.H. Park, M. Pauluzzi, F. Pauss, E. Perrin, A. Pesci, A. Pevsner, M. Pimenta, V. Plyaskin, V. Pojidaev, V. Postolache, N. Produit, P.G. Rancoita, D. Rapin, F. Raupach, D. Ren, Z. Ren, M. Ribordy, J.P. Richeux, E. Riihonen, J. Ritakari, U. Roser, C. Rossin1, R. Sagdeev, G. Sartorelli, A. Schultz von Dratzig, G. Schwing, G. Scolieri, E.S. Seo, V. Shoutko, E. Shumilov, R. Siedling, D. Son, T. Song, M. Steuer, G.S. Sun, H. Suter, X.W. Tang, S.C.C. Ting, S.M. Ting, M. Tomikoski, J. Torsti, J. Trumper, J. Ulbricht, S. Urpo, I. Usoskin, E. Valtonen, J. Vandenhirtz, F. Velcea, E. Velikhov, B. Verlaat, I. Vetlitsky, F. Vezzu, J.P. Vialle, G. Viertel, D. Vite, H. von Gunten, S. Waldmeier Wicki, W. Wallraff, B.C. Wang, J.Z. Wang, Y.H. Wang, K. Wiik, C. Williams, S.X. Wu, P.C. Xia, J.L. Yan, L.G. Yan, C.G. Yang, M. Yang, S.W. Ye, P. Yeh, Z.Z. Xu, H.Y. Zhang, Z.P. Zhang, D.X. Zhao, G.Y. Zhu, W.Z. Zhu, H.L. Zhuang, A. Zichichi und B. Zimmermann; Cosmic Protons; Physics Letters B 490: 27-35; 2000
- [Allk1975] O. Allkofer; Introduction to Cosmic Radiation; Buchreihe der Atomkernenergie. Volume 10; Thieme Verlag; 1975
- [Allk1984] O. Allkofer, P.K.F. Grieder; Cosmic Rays on Earth. Physics Data No. 25 - 1; Fachinformationszentrum Energie; Physik, Mathematik; Karlsruhe; Germany; 1984
- [Ahar2004] F. A. Aharonian, A. G. Akhperjanian, K.-M. Aye, A. R. Bazer-Bachi, M. Beilicke, W. Benbow, D. Berge, P. Berghaus, K. Bernlöhr, O. BOLZ, C. Boisson, C. Borgmeier, F. Breitling, A. M. Brown, J. Bussons Gordo, P. M. Chadwick, V. R. Chitnis, L.-M. Chounet, R. Comijs, L. Costamante, B. Degrange, A. Djannati-Ataï, L. O'C. Drury, T. Ergin, P. Espigat, F. Feinstein, P. Fleury, G. Fontaine, S. Funk, Y. A. Gallant, B. Giebels, S. Gillessen, P. Goret, J. Guy, C. Hadjichristidis, M. Hauser, G. Heinzlmann, G. Henri, G. Hermann, J. A. Hinton, W. Hofmann, M. Holleran, D. Horns, O. C. De Jager, I. Jung, B. Khélifi, Nu. Komin, A. Konopelko, I. J. Latham,

- R. Le Gallou, M. Lemoine, A. Lemi re, N. Leroy, T. Lohse, A. Marcowith, C. Masterson, T. J. L. McComb, M. De Naurois, S. J. Nolan, A. Noutsos, K. J. Orford, J. L. Osborne, M. Ouchrif, M. Panter, G. Pelletier, S. Pita, M. Pohl, G. P hlhofer, M. Punch, B. C. Raubenheimer, M. Raue, J. Raux, S. M. RAYNER, I. Redondo, A. Reimer, O. Reimer, J. Ripken, M. Rivoal, L. Rob, L. Rolland, G. Rowell, V. Sahakian, L. Saug e, S. Schlenker, R. Schlickeiser, C. Schuster, U. Schwanke, M. Siewert, H. Sol, R. Steenkamp, C. Stegmann, J.-P. Tavernet, C. G. Th oret, M. Tluczykont, D. J. Van der Walt, G. Vasileiadis, P. Vincent, B. Visser, H. J. V lk und S. J. Wagner; High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant; *Nature* 432; 75 – 77; 2004
- [Ahar2006] F. Aharonian, A.G. Akhperjanian, A.R. Bazer-Bachi, M. Beilicke, W. Benbow, D. Berge, K. Bernl hr, C. Boisson, O. Bolz, V. Borrel, I. Braun, F. Breitling, A.M. Brown, R. B hler, I. B sching, S. Carrigan, P.M. Chadwick, L.-M. Chounet, R. Cornils, L. Costamante, B. Degrange, H.J. Dickinson, A. Djannati-Atai, L.O'C. Drury, G. Dubus, K. Egberts, D. Emmanoulopoulos, P. Espigat, F. Feinstein, E. Ferrero, A. Fiasson, G. Fontaine, Seb. Funk, S. Funk, Y.A. Gallant, B. Giebels, J.F. Glicenstein, P. Goret, C. Hadjichristidis, D. Hauser, M. Hauser, G. Heinzelmann, G. Henri, G. Hermann, J.A. Hinton, W. Hofmann, M. Holleran, D. Horns, A. Jacholkowska, O.C. de Jager, B. Khelifi, Nu. Komin, A. Konopelko, K. Kosack, I.J. Latham, R. Le Gallou, A. Lemi re, M. Lemoine-Goumard, T. Lohse, J.M. Martin, O. Martineau-Huynh, A. Marcowith, C. Masterson, T.J.L. McComb, M. de Naurois, D. Nedbal, S.J. Nolan, A. Noutsos, K.J. Orford, J.L. Osborne, M. Ouchrif, M. Panter, G. Pelletier, S. Pita, G. P hlhofer, M. Punch, B.C. Raubenheimer, M. Raue, S.M. Rayner, A. Reimer, O. Reimer, J. Ripken, L. Rob, L. Rolland, G. Rowell, V. Sahakian, L. Saug e, S. Schlenker, R. Schlickeiser, U. Schwanke, H. Sol, D. Spangler, F. Spanier, R. Steenkamp, C. Stegmann, G. Superina, J.-P. Tavernet, R. Terrier, C.G. Th oret, M. Tluczykont, C. van Eldik, G. Vasileiadis, C. Venter, P. Vincent, H.J. V lk, S.J. Wagner und M. Ward; Observations of the Crab Nebula with H.E.S.S.; *Astronomy & Astrophysics* manuscript no. 5351CPM; Volume 457; Number 3; p899-915; 2006
- [Auti2003] M. Autischer; Kalibriermessungen mit dem TEPC; Diplomarbeit; TU-Graz; 2003
- [Auti2005] M. Autischer, P. Beck, S. Rollet and A. Ferrari; Comparing Simulation and Measurements Results of Angular Tpec Response in Standard Radiation Fields; *American Nuclear Society; LaGrange Park; IL; 2005*
- [Auti2007] M. Autischer, P. Beck, P. Kindl, M. Latocha and S. Rollet; Calibration and background measurements with a tissue equivalent proportional counter; *Presented at European workshop on individual monitoring of ionising radiation (IM2005); Radiation Protection Dosimetry Vol. 125 No. 1-4): 429-432; 2007*
- [Auti2007b] M. Autischer; Umsetzung von Legal Compliance und Normkonformit t in einem integrierten IT-Management System; Masterarbeit; Lehrstuhl f r Wirtschafts- und Betriebswissenschaften der Montanuniversit t Leoben; 2007
- [Badh1993] G.D. Badhwar an P. M. O'Neil; Time Lag of Twenty Two Year Solar Modulation; 23rd International Cosmic Ray Conference; Vol. 3; World Scientific; Singapore; S535;1993
- [Badh1996] G.D. Badhwar an P. M. O'Neil; Galactic cosmic radiation model and its applications; *Adv. Space Rex Vol. 17. No. 2 pp. (2)7-(2)17;1996*
- [Badh1997] G.D. Badhwar; The radiation Environment in Low-Earth Orbit; *Radiation Research* 148; S3-S10; 1997
- [Bart1999] D. T. Bartlett; Radiation Protection Concepts and Quantities for the Occupational Exposure to Cosmic Radiation; *Radiation Protection Dosimetry Vol. 86; No. 4: 263-268;1999*
- [Batt2003] G. Battistoni, L. De Biaggi, A. Ferrari, P. R. Sala, T Rancati, F. Ballarini, and A. Ottolenghi. Cosmic Ray Interactions with the Earth's Atmosphere Using FLUKA. Milano, Italy:INFN. -11; 2003.

- [Beck2000] P. Beck; ACREM Final Report; ARCS Abteilung Strahlenschutz; 2000
- [Beck2003] P. Beck, A. Ferrari, M. Pelliccioni und S. Rollet; TEPC Simulation with Fluka; ARCS Report; ARC-G-0004/03; 2003
- [Beck2005] P. Beck, A. Ferrari, M. Pelliccioni, S. Rollet and R. Villari; FLUKA Simulation of TEPC Response to Cosmic Radiation; Radiation Protection Dosimetry Vol. 116 (1-4): 327-330.
- [Bell1999] R. Bellotti, F. Cafagna, M. Circella, C. N. De Marzo, R. L. Golden, S. J. Stochaj, M. P. De Pascale, A. Morselli, P. Picozza, S. A. Stephens, M. Hof, W. Menn, M. Simon, J. W. Mitchell, J. F. Ormes, R. E. Streitmatter, N. Finetti, C. Grimani, P. Papini, S. Piccardi, P. Spillantini, G. Basini und M. Ricci; Balloon Measurements of Cosmic Ray Muon Spectra in the Atmosphere along with those of Primary Protons and Helium Nuclei over Mid-Latitude; Physical Review D; Volume 60; 1999
- [BEV2010] Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen; Austrian Map Fly 5.0; Wien 2010
- [Bhat1997] A. Bhattacharyya, B. Mitra; Changes in cosmic ray cut-off rigidities due to secular variations of the geomagnetic field; Annales Geophysicae; Volume 15; Issue 6; pp.734-739; 1997
- [Boez1997] M. Boezio, P. Carlson, T. Francke, N. Weber, M. Suffert, M. Hof, W. Menn, M. Simon, S. A. Stephens, R. Bellotti, F. Cafagna, M. Castellano, M. Circella, G. De Cataldo, C. De Marzo, N. Giglietto, P. Spinelli, M. Bocciolini, P. Papini, A. Perego, S. Piccardi, P. Spillantini, G. Basini, M. Ricci, A. Codino, N. Finetti, C. Grimani, M. Candusso, M. Casolino, M. P. De Pascale, A. Morselli, P. Picozza, R. Sparvoli, G. Barbiellini, U. Bravar, P. Schiavon, A. Vacchi, N. Zampa, J. W. Mitchell, J. F. Ormes, R. E. Streitmatter, R. L. Golden und S. J. Stochaj; The Cosmic-Ray Antiproton Flux between 0.62 and 3.19 GeV Measured Near Solar Minimum Activity; The Astrophysical Journal; volume 487: 415-423; 1997
- [Boez1999] M. Boezio, P. Carlson, T. Francke, N. Weber, M. Suffert, M. Hof, W. Menn, M. Simon, S. A. Stephens, R. Bellotti, F. Cafagna, M. Castellano, M. Circella, C. De Marzo, N. Finetti, P. Papini, S. Piccardi, P. Spillantini, M. Ricci, M. Casolino, M. P. De Pascale, A. Morselli, P. Picozza, R. Sparvoli, G. Barbiellini, U. Bravar, P. Schiavon, A. Vacchi, N. Zampa, J. W. Mitchell, J. F. Ormes, R. E. Streitmatter, R. L. Golden und S. J. Stochaj; The Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra between 0.4 and 200 GV; The Astrophysical Journal; 518: 457-472; 1999
- [Boez2003] M. Boezio, V. Bonvicini, P. Schiavon, A. Vacchi, N. Zampa, D. Bergstroem, P. Carlson, T. Francke, P. Hansen, E. Mocchiutti, M. Suffert, M. Hof, J. Kremer, W. Menn, M. Simon, M. Ambriola, R. Bellotti, F. Cafagna, F. Ciaccio, M. Circella, C. N. De Marzo, N. Finetti, P. Papini, S. Piccardi, P. Spillantini, E. Vannuccini, S. Bartalucci, M. Ricci, M. Casolino, M. P. De Pascale, A. Morselli, P. Picozza, R. Sparvoli, J. W. Mitchell, J. F. Ormes, S. A. Stephens, R. E. Streitmatter, U. Bravar, S. J. Stochaj; The Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra measured with the CAPRICE98 balloon experiment; Astroparticle Physics 19:583-604; 2003
- [Bott2009] J. F. Bottollier-Depois, P. Beck, B. Bennett, L. Bennett, R. Bütikofer, I. Clairand, L. Desorgher, C. Dyer, E. Felsberger, E. Flückiger, A. Hands, P. Kindl, M. Latocha, B. Lewis, G. Leuthold, T. Maczka, V. Mares, M.J. McCall, K. O'Brien, S. Rollet, W. Rühm und F. Wissmann; Comparison of codes assessing galactic cosmic radiation exposure of aircraft crew; Radiation Protection Dosimetry Vol. 136(4): 317-323; doi:10.1093/rpd/ncp159; 2009
- [Brad2000] P. D. Bradley; The Development of a Novel Silicon Microdosimeter for High LET Radiation Therapy; PhD thesis; University of Wollongong; Department of Engineering Physics; 2000
- [Bran1999] S. Brandt; Datenanalyse; 4. Auflage; Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg - Berlin; 1999

- [Chen1984] F. F. Chen; Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion; Vol. 1: Plasma Physics; 2nd ed.. New York; NY USA: Plenum Press; 1984
- [Cook1985] D.J. Cooke, J.E. Humble, M. A. Shea, M.A. Smart, N. Lund, I. L. Rasmussen; B. Byrnek, P. Goret und N. Petrou; Re-evaluation of cosmic ray cutoff terminology; NASA. Goddard Space Flight Center 19th Intern. Cosmic Ray Conf.; Vol. 5 p 328-331 (SEE N85-34991 23-93); 1985
- [Cook1991] D.J. Cooke, J.E. Humble, M.A. Smart, D.F. Smart und N. Lund; On Cosmic-Ray Cut-off Terminology; Nuovo Cimento; 14C: 213-234; 1991
- [Cowa1998] G. Cowan; Statistical Data Analysis; Clarendon Press; Oxford; 1998
- [Dach2004] Ts. Dachev, B. Tomov, Yu. Matviichuk, Pl. Dimitrov, D-P. Häder; Overview of the space radiation spectrometry-dosimetry instruments developed for the Bulgarian space program; Geophysical Research Abstracts; Vol. 6; 01141; 2004
- [Deut2002] Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH (DAP); Ermittlung und Angabe der Messunsicherheit nach Forderungen der ISO IEC 17025; DAP-TM 18; AK-TM-18 / Rev. 1.0 / 30.08.02; 2002
- [Duft2001] K. E. Duftschmid; Strahlenschutz – Dosimetrie ionisierender Strahlung; Vorlesungsskriptum 2001; Institut für Technische Physik; Technische Universität Graz; 2001
- [Euro1996] RAT DER EUROPÄISCHEN UNION; Festlegung der grundlegenden Sicherheitsnormen für den Schutz der Gesundheit der Arbeitskräfte und der Bevölkerung gegen die Gefahren durch ionisierende Strahlungen; Richtlinie 96/29/Euratom des Rates vom 13. Mai 1996; ABl. Nr. L 159 vom 29. Juni 1996; 1996
- [Euro1997] RAT DER EUROPÄISCHEN UNION; Richtlinie über den Gesundheitsschutz von Personen gegen die Gefahren ionisierender Strahlung bei medizinischen Exposition und zur Aufhebung der Richtlinie 84/466/Euratom; Richtlinie 97/43/Euratom des Rates vom 30. Juni 1997; ABl. Nr. L 180 vom 9. Juli 1997; 1997
- [FarW2000] Far West Techn. Inc.; Environmental radiation monitor with 5 inches tissue equivalent proportional counter; Operations and repair manual; 2000
- [FarW2002] Far West Techn. Inc.; Environmental radiation monitor with 5 inches tissue equivalent proportional counter; Operations and repair manual with Addons for the used cylindrical SEPC Detector; 2002
- [Fass2003] A. Fasso, A. Ferrari, S. Roesler, P.R. Sala, G. Battistoni, F. Cerutti, E. Gadioli, M.V. Garzelli, F. Ballarini, A. Ottolenghi, A. Empl and J. Ranft; The physics models of FLUKA: status and recent developments; Computing in High Energy and Nuclear Physics 2003 Conference (CHEP2003); La Jolla; CA; USA; March 24-28; 2003; (paper MOMT005); eConf C0303241 (2003); arXiv:hep-ph/0306267; 2003
- [Fass2005] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft, and P.R. Sala; FLUKA: a multi-particle transport code; INFN/TC_05/11; SLAC-R-773; CERN-2005-10; 2005
- [Fass2009] A. Fasso, A. Ferrari, J. Ranft, P.R. Sala, G. Battistoni, F. Cerutti, T. Empl, M.V. Garzelli, M. Lantz, A. Mairani, V. Patera, S. Roesler, G. Smirnov, F. Sommerer, V. Vlachoudis; Fluka-2008; Onlinemanual v. 22.3.2009; http://www.fluka.org/fluka.php?id=man_onl; 2009
- [Gais2000] T. K. Gaisser; Origin of Cosmic Radiation; Bartol Research Institute; University of Delaware Newark; DE 19716; published in Proceedings of the International Symposium on High energy Gamma-Ray Astronomy in Heidelberg; AIP Conf.Proc. 558; p27-42; Nov 2000



- [Gais2001] T. K. Gaisser, M. Honda, P. Lipari and T. Stanev; Primary Spectrum to 1 TeV and Beyond; Proc.of ICRC 2001; p1643-1646; Hamburg; 2001
- [Göld2004] M. Göldner; The TEPC as a reference instrument to assess the radiation exposure in aircrafts: Results of simulation and comparison with measurements; Master Thesis; Technical University of Graz; Institute of Technical Physics; 2004
- [Haus2007] C. E. Hauschka; Corporate Compliance - Handbuch der Haftungsvermeidung im Unternehmen; Verlag H.C.Beck; ISBN 3-406-54708-7; Münschen 2007
- [Hein1999] W. Heinrich, S. Roesler, and H. Schraube; Physics of Cosmic Radiation Fields. Radiation Protection Dosimetry Vol. 86 (4); p253-258; 1999
- [Hein2002] W. Heinrich; Galactic and Solar Cosmic Rays; Siegen; Germany:University of Siegen 2002
- [Hess1912] V. F. Hess; Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten; Phys. Z. 13; 1084; 1912
- [Hoff1997] W. Hoffmann; HESS - an array of imaging atmospheric Cherenkov telescopes for stereoscopic observations of air showers in the 100 GeV energy range; Proc. of the Workshop "Towards a major atmospheric Cherenkov detector - V"; O.C. de Jager (Ed.); p. 405; Kruger Park; 1997
- [Hoff2002] K. H. Hoffmann und M. Schreiber; Computational Statistical Physics; Springer Verlag; ISBN 3-540-42160-2; 2002
- [Hran2002] C. Hranitzky; Development of a thermoluminescence based area monitoring dosimeter for measuring ambient dose equivalent $H^*(10)$ in photon radiation fields; Dissertation an der TU-Graz; 2002
- [ICRP1991] ICRP60; Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 60; Pergamon Press; Oxford New York Frankfurt Seoul Sydney Tokyo: International Commission on Radiological Protection; 1991
- [ICRP1996] ICRP74; Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation 74; Pergamon Press; Oxford New York Frankfurt Seoul Sydney Tokyo: International Commission on Radiological Protection; 1996
- [ICRU1983] ICRU Report 36; Microdosimetry; Bethesda; MD; USA: International Commission on Radiation Units and Measurements; 1983
- [ICRU1993] ICRU Report 51; Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry; Bethesda; MD; USA: International Commission on Radiation Units and Measurements; 1993
- [ISO1995] International Organization for Standardization; Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Measurement. BIPM; IEC; IFCC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML; Printed in Switzerland; ISBN 92-67-10188-9; First Edition 1993; Corrected and reprinted; 1995
- [Klia1995] P. Kliauga, J. Barthe und A. J. Waker; Design of Tissue-Equivalent Proportional Counters; Radiation Protection Dosimetry Vol. 61; 309:322; 1995
- [Land2000] D. P. Landau und K. Binder; A Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics; Cambridge University Press; ISBN 0-521-65366-5; 2000
- [Lato2007] M. Latocha, M. Autischer, P. Beck, J. F. Bottolier – Depois, S. Rollet and F. Trompier; The results of cosmic radiation in-flight TEPC measurements during the CAATER flight campaign and comparison with simulation; *Presented* at European workshop on individual monitoring of ionising radiation (IM2005); Radiation Protection Dosimetry Vol. 125(1-4): 429-432; 2007



- [Lato2009] M. Latocha, P. Beck, and S. Rollet; AVIDOS—a software package for European accredited aviation dosimetry; Radiation Protection Dosimetry Vol. 136(4): 286-290; 2009
- [Lato2010] M. Latocha, AIT Seibersdorf; Persönliches Gespräch und E-Mail v. 3.3.2010
- [Lind2004] L. Lindborg, I. McAulay, T.D. Bartlett, P. Beck, H. Schraube, K. Schnuer and F. Spurny; Cosmic Radiation Exposure of Aircraft Crew Compilation of Measured and Calculated Data; A report of EURADOS WG5; Office for Official Publications of the European Communities; Luxemburg 2004; ISBN 92-894-8448-9
- [LiuL2004] Liulin-4A-SPECTROMETER-MDU Operating Manual; Nov 2004
- [Menn1997] W. Menn, L. M. Barbier, E. R. Christian, A. J. Davis, R. L. Golden, M. Hof, K. E. Krombel, J. F. Krizmanic, A. W. Labrador, R. A. Mewaldt, J. W. Mitchell, J. F. Ormes, I. L. Rasmussen, O. Reimer, S. M. Schindler, M. Simon, S. J. Stochaj, R. E. Streitmatter and W. R. Webber; Measurement of the absolute proton and helium flux at the top of the atmosphere using IMAX; in Proceedings of the 25th International Cosmic Ray Conference; Durban South Africa; Volume 3: 409; 1997
- [Mili1926] R. A. Millikan and R. M. Otis; High Frequency Rays of Cosmic Origin II. Mountain Peak and Airplane Observations; Physical Review 27; p. 645 - 658; 1997
- [More1988] F. Moreno-Insertis and M. Vazquez; A statistical study of the decay phase of sunspot groups from 1874 to 1939; Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361); vol. 205; no. 1-2; Oct. 1988; p. 289-296; 1988
- [Öste1992] Republik Österreich; Akkreditierungsgesetz; Bundesgesetzblatt Nr. 468/1992; 1992
- [Öste2004] Republik Österreich; Strahlenschutz-EU-Anpassungsgesetz 2004; Bundesgesetzblatt Nr. 137/2004; 2004
- [Öste2006] Republik Österreich; Strahlenschutzverordnung fliegendes Personal; Bundesgesetzblatt Nr. 235/2006; 2006
- [Pell2000] M. Pelliccioni; Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code; Radiation Protection Dosimetry Vol. 88; No. 4; 2000
- [Plan1901] M. Planck; Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum; Annalen der Physik; Band 309; F. 4; Band 4; S.553ff; Weinheim; Berlin; 1901
- [Roes2002] S. Roesler, W. Heinrich, and H. Schraube. Monte Carlo Calculation of the Radiation Field at Aircraft Altitudes. Radiation Protection Dosimetry Vol. 98 (4):367-388; 2002.
- [Roll2004] S. Rollet, P. Beck, A. Ferrari, M. Pelliccioni und M. Autischer; Dosimetric considerations on TEPC Fluka-Simulation and Measurement; Radiation Protection Dosimetry Vol. 110; p 833-837; 2004
- [Roll2005] S. Rollet; M. Autischer, P. Beck, M. Latocha, G. Battistoni, J. F. Bottolier, F. Trompier and A. Ferrari; Simulation of Tepc Response to Cosmic Radiation during dedicated Flight Campaign; American Nuclear Society; LaGrange Park; IL; 2005
- [Roll2007] S. Rollet, M. Autischer, P. Beck and M. Latocha; Measurement and simulation of lineal energy distribution at the cern high energy facility with a tissue equivalent proportional counter; Presented at European workshop on individual monitoring of ionising radiation (IM2005); Radiation Protection Dosimetry Vol. 125; 425-428; 2007
- [Ross1955] H. H. Rossi und W. A. Rosenzweig; Device for the Measurement of Dose as a Function of Specific Ionisation; PubMed - Radiology 64(3); p404-411; 1955

- [Ross1994] H. H. Rossi M. Zaider; Microdosimetry and its Applications; Physics Today; Volume 50; Issue 12; Springer Verlag; 1994
- [Ryan1972] M. J. Ryan, J. F. Ormes und V. K. Balasubrahmanyam; Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra above 50 GeV; Physical Review Letters 28: 985-988; 1992
- [Sanu2000] T. Sanuki, M. Motoki, H. Matsumoto, E. S. Seo, J. Z. Wang, K. Abe, K. Anraku, Y. Asaoka, M. Fujikawa, M. Imori, T. Maeno, Y. Makida, N. Matsui, H. Matsunaga, J. Mitchell, T. Mitsui, A. Moiseev, J. Nishimura, M. Nozaki, S. Orito, J. Ormes, T. Saeki, M. Sasaki, Y. Shikaze, T. Sonoda, R. Streitmatter, J. Suzuki, K. Tanaka, I. Ueda, N. Yajima, T. Yamagami, A. Yamamoto, T. Yoshida, und K. Yoshimura; Precise Measurement of Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra with the BESS Spectrometer; The Astrophysical Journal; volume 545; part 1: 1135-1142; 2000
- [Scha1999] E. Schachinger; Physik & Simulation von Strahlungstransport; Vorlesungsskriptum; TU-Graz; 1999
- [Schr2000] U. J. Schrewe; Global measurements of the radiation exposure of civil air crew from 1997 to 1999; Radiation Protection Dosimetry Vol. 91; no4; pp. 347-364 ISSN 0144-8420; 2000
- [Schu1993] H. Schuhmacher und U.J. Schrewe; Dose Equivalent Measurements on Board Civil Aircraft; PTB-Report-N-13; Braunschweig; 1993
- [Shea2003] M.A. Shea und D.F. Smart; Preliminary Study of the 400-Year Geomagnetic Cutoff Rigidity Changes, Cosmic Rays and Possible Climate Changes; 28th International Cosmic Ray Conference; Universal Academy Press: 4205-4208; 2003
- [Seki1985] Y. Sekido und H. Elliot; Early History of Cosmic Ray Studies - Personal Reminiscences with Old Photographs; Astrophysics and space science library; Vol. 118; Dordrecht/Boston/Lancaster; 1985
- [Seo 1991] E. S. Seo, J. F. Ormes, R. E. Streitmatter, S. J. Stochaj, W. V. Jones, S. A. Stephens, und T. Bowen; Measurement of cosmic-ray proton and helium spectra during the 1987 solar minimum; The Astrophysical Journal; volume 378; 1991
- [Stan2004] T. Stanev; High Energy Cosmic Rays; Springer-Verlag; ISBN: 3540406530; 2004
- [Tail2002] G. C. Taylor, R. D. Bentley, T. J. Conroy, R. Hunter, J. B. Jones, A. Pond, D. J. Thomas; The evaluation and use of a portable TEPC system for measuring in-flight exposure to cosmic radiation; Radiation Protection Dosimetry; 99(1-4):435-8; 2002
- [Task2004] S. Taskaev, B. Bayanov, V. Belov, V. Kindyuk und E. Oparin; Lithium neutron producing target for BINP accelerator-based neutron source; Applied Radiation and Isotopes 61 p817-821; 2004
- [Task2006] S. Taskaev, B. Bayanov und V. Belov; Neutron producing target for accelerator based neutron capture therapy; Journal of Physics: Conference Series 41; p460-465; 2006
- [Thei2002] C. Theis und W. Kernbichler; Grundlagen der Monte Carlo Methoden; Bericht und Vorlesungsskriptum der TU-Graz; 2002
- [Thei2006] C. Theis, K.H. Buchegger, M. Brugger, D. Forkel-Wirth, S. Roesler, H. Vincke; Interactive three dimensional visualization and creation of geometries for Monte Carlo calculations; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research; A 562; p827-829; 2006
- [Usos2005] I. G. Usoskin, M. Schüssler, S. K. Solanki und K. Mursula; Solar activity, cosmic rays, and Earth's temperature: A millennium-scale comparison; Journal of Geophysical Research; Volume 110; 2005

- [Vlac2009] V. Vlachoudis; FLAIR: A Powerful But User Friendly Graphical Interface For FLUKA; Proc. Int. Conf. on Mathematics; Computational Methods & Reactor Physics (M&C 2009); Saratoga Springs; New York; 2009
- [Wake1995] A. J. Waker; Principles of experimental microdosimetry; AECL; Chalk River Laboratories; 1995
- [Wils2002] John W. Wilson, Francis F. Badavi, Myung-Hee Y. Kim, Martha S. Cloudsley, John H. Heinbockel, Francis A. Cucinotta, Gautan D. Badhwar, William Atwell and Stuart L. Huston; Natural and Induced Environment in Low Earth Orbit. Hampton:NASA. NASA/TM-2002-211668:-22; 2002.
- [Wiss2004] F. Wissmann; Physikalisch Technische Bundesanstalt; E-Mail v. 23.12.2004



© Michael Autischer