

Neutrinos und Strahlenschutz – die Herausforderungen eines zukünftigen Myonencolliders

„Neutrinos sind für den Strahlenschutz nicht relevant.“ – Diese Aussage erscheint plausibel, angesichts der Tatsache, dass uns permanent eine extrem große Anzahl an Neutrinos unterschiedlichsten natürlichen als auch künstlichen Ursprungs ohne radiologisch relevanten Effekt durchströmen. Eine Ausnahme bilden jedoch unter Umständen Neutrinos, die durch den Zerfall der kurzlebigen Myonen in einem Myonencollider erzeugt werden. Dies ist auf den ersten Blick überraschend, da Neutrinos aufgrund ihrer geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeit nicht intuitiv im Fokus des Strahlenschutzes stehen.

Myonencollider

Mit der Entwicklung neuer Technologien und Konzepte rücken Myonencollider wieder in das Interesse und in die Reichweite einer neuen Generation von Teilchenbeschleunigern. Nach dem letzten Update der europäischen Strategie für Teilchenphysik [1] hat das CERN eine internationale Kollaboration ins Leben gerufen, die die Machbarkeit eines solchen Projektes untersuchen soll [2, 3]. Myonencollider bieten einzigartige Vorteile gegenüber Elektronencollidern bezüglich Energieeffizienz, Anlagengröße und Skalierbarkeit und auch gegenüber Protonencollidern mit gleicher oder besserer Ausbeute für die Physik

bei signifikant niedrigerer Kollisionsenergie.

Ein Myonencollider, aufbauend auf Arbeiten früherer Projekte [4, 5] und in der Europäischen Strategie für Teilchenphysik konzeptuell beschrieben, besteht aus mehreren Anlagen wie in Abbildung 1 konzeptuell dargestellt:

- dem Injektor
- einem Beschleunigerring und
- dem eigentlichen Collider

Mithilfe eines hochenergetischen Protonenstrahls, der im Injektor erzeugt wird und auf ein Festkörpertarget gerichtet ist, werden Hadronen produziert, die in Myonen zerfallen. Diese Myonen müssen gebündelt und gekühlt werden, bevor sie dann über mehrere

Stufen auf die maximale Energie beschleunigt und in Kollision gebracht werden. Die technischen Herausforderungen sind insbesondere die kurze Lebensdauer der Myonen von nur $\gamma \times 2,2 \mu\text{sec}$ und die Produktion der notwendigen Anzahl an gebündelten Myonen mit geringer Emittanz. Das aktuelle Projekt verfolgt die Erstellung einer Konzeptstudie für den Bau eines Myonencolliders mit einer Kollisionsenergie von 3 bzw. 10 TeV.

Lebensdauer der Myonen:
 $\gamma \times 2,2 \mu\text{sec}$

Strahlenschutzaspekte und Optimierung

Im Rahmen des Myonencollider-Projekts sind mehrere, den Strahlenschutz betreffende Aspekte zu betrachten. Die klassischen Risiken, die beim Betrieb auftreten, z. B. durch Streustrahlung im Injektorkomplex und durch Aktivierung von Material, Wasser, Luft oder Erdoberfläche in der Umgebung des Hochleistungstargets, sind lokal begrenzt und lassen sich konventionell behandeln und optimieren.

Durch die Designoptimierung der Komponenten, eine geeignete Materialauswahl, einen optimalen Standort, die Installation entsprechender Rückhaltesysteme und optimierter Abschirmungen können die Auswirkungen auf das Personal und die Umgebung minimiert werden. Es bestehen bereits ausgiebige Erfahrungen bei existierenden Anlagen wie auch Designstudien [6, 7] mit ähnlichen Problemstellungen, um den Strahlenschutz beim Betrieb, bei der Wartung und beim Rückbau zu gewährleisten. Hingegen stellt die neutrinoinduzierte Strahlung eine andersgelagerte, neuartige Problematik dar, die neue Optimierungsansätze erfordert, um eine mögliche Dosis vernachlässigbar gering zu halten.

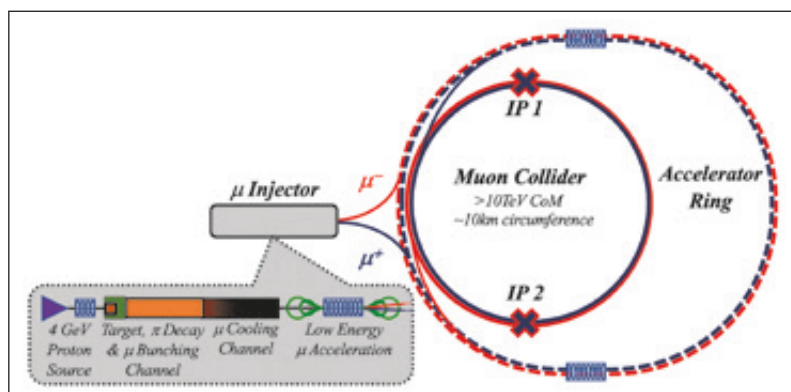


Abb. 1: Ein Konzeptschema für einen Myonencollider (aus [1]) mit einem Injektor, Beschleuniger- und Colliderring. Die Produktion der Myonen erfolgt hauptsächlich durch den Zerfall von Pionen, die mit Protonen auf ein Target der Megawatt-Klasse erzeugt werden.

Produktion von Neutrinos

Myonen zerfallen in Elektronen bzw. Positronen und ein Neutrino-Antineu-

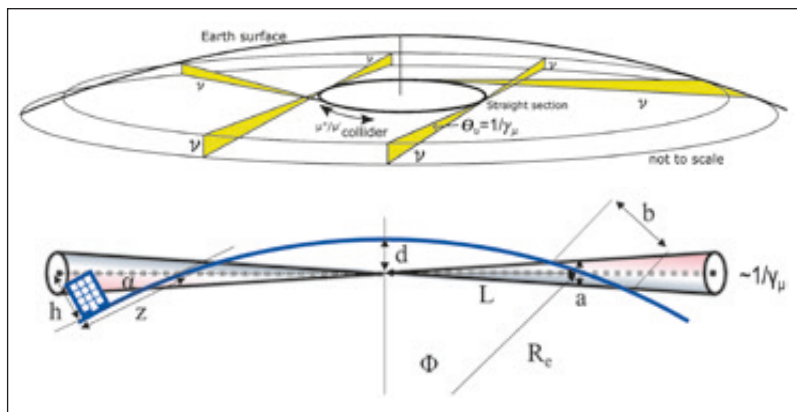


Abb. 2: Vereinfachte geometrische Darstellung des Verlaufs der Neutrinos nach deren Produktion in einem unterirdisch gelegenen Myonenbeschleuniger.
 h: Höhe über Grund, z: Entfernung vom Zentralstrahl, a: Breite des austretenden Neutrinostrahls, b: Länge des austretenden Neutrinostrahls auf der Erdoberfläche, L: Abstand zwischen Beschleunigermittelpunkt und Erdoberfläche in der Beschleunigerebene, d: Tiefe des Beschleunigers unter der Erdoberfläche

trino-Paar unterschiedlicher Flavors. Aufgrund der hohen Energie der Myonen im TeV-Bereich sind die Zerfallsprodukte im Laborsystem sehr stark vorwärts fokussiert mit einem Öffnungswinkel von ungefähr $1/\gamma$. Um eine grobe Vorstellung der örtlichen Verteilung der Neutrinos zu bekommen, hier ein vereinfachtes Beispiel: Bei einer Myonenenergie von 1 TeV ist der Öffnungswinkel so klein, dass in 100 km Entfernung vom Produktionsort die Neutrinos sich über einen Querschnitt von nur 2,5 m Durchmesser verteilen. Die Neutrinos treten in einem Konus in etwa tangential aus dem Collider aus und erzeugen so bei einem idealen kreisförmigen Beschleuniger eine dünne Neutrinoscheibe (siehe Abbildung 2). Bei einem realen Beschleuniger gibt es jedoch gerade Abschnitte, in denen sich die Zerfälle überlagern und unterschiedliche Amplituden in der Emissionsebene erzeugen, das heißt, die Neutrinoflussdichten sind nicht gleich verteilt. Zudem spielt die Divergenz des Myonenstrahls eine wesentliche Rolle in der Aufweitung des Neutrinostrahls.

Räumliche Verteilung der Strahlung

Je nach Tiefe und Ausrichtung des Colliderrings ändert sich der Austrittswinkel der Neutrinos gegenüber der

idealisierten Erdoberfläche (siehe Abbildung 2). Bei den technisch realisierbaren Ausrichtungen bleibt dieser jedoch sehr klein, sodass die Neutrinos, und mit ihnen ihre Sekundärstrahlung, über eine größere Distanz von einigen 10 bis 100 Metern aus dem Boden austreten. Die Neutrinos gewinnen nur langsam an Höhe, produzieren allerdings weniger Streustrahlung in der Luft, solange sie nicht auf weitere dichte Strukturen treffen. Bis die Neutrinos ausreichend an Höhe gewonnen haben, können sie je nach Topografie noch über einige Kilometer oberflächennah sein. Sie können auch wieder in Berge oder Hügel eintreten und

an anderer Stelle erneut eine relevante Streustrahlung erzeugen. Die Topografie spielt eine wesentliche Rolle für die reale Verteilung der Streustrahlung.

Neutrinos und das Sekundärstrahlungsfeld

Die Energie der produzierten Neutrinos ist um einige Größenordnungen höher als die der solaren Neutrinos. Mit der Energie steigt der Wirkungsquerschnitt für die dominierende tiefinelastische Streuung in Hadronen. Die Schwächungslänge von Neutrinos ist extrem groß und skaliert in etwa umgekehrt proportional mit ihrer Energie. Die Reduktion der Neutrinos durch das Erdreich bleibt daher selbst über große Distanzen gering, auch bei den hier zu erwartenden Neutrinoenergien im TeV-Bereich.

Die Streustrahlung besteht aus einem gemischten Strahlungsfeld von u. a.

- Neutronen,
- Elektronen,
- Positronen,
- Protonen,
- Pionen,
- Myonen und
- Photonen.

Abbildung 3 zeigt typische mit dem Strahlungstransportcode FLUKA [8, 9] gerechnete Fluenzspektren für die

Tiefinelastische Streuung in Hadronen

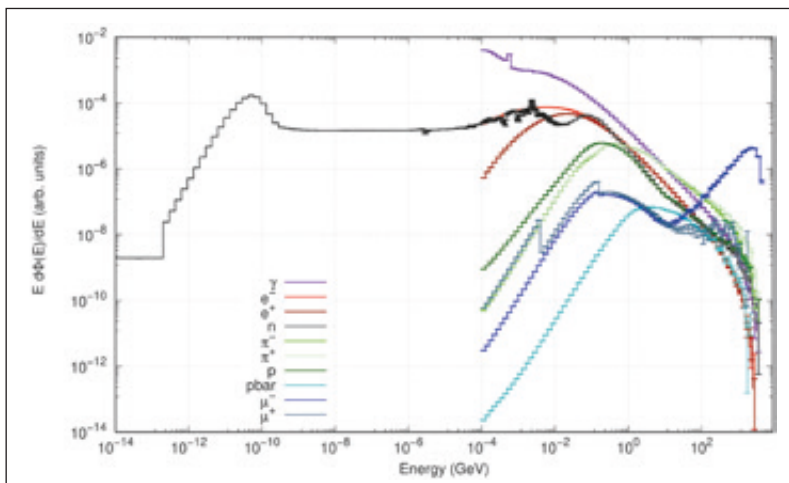


Abb. 3: Teilchenfluenzspektren nach dem Aufbau der Sekundärteilchenkaskade ausgelöst durch Myon-Neutrinos

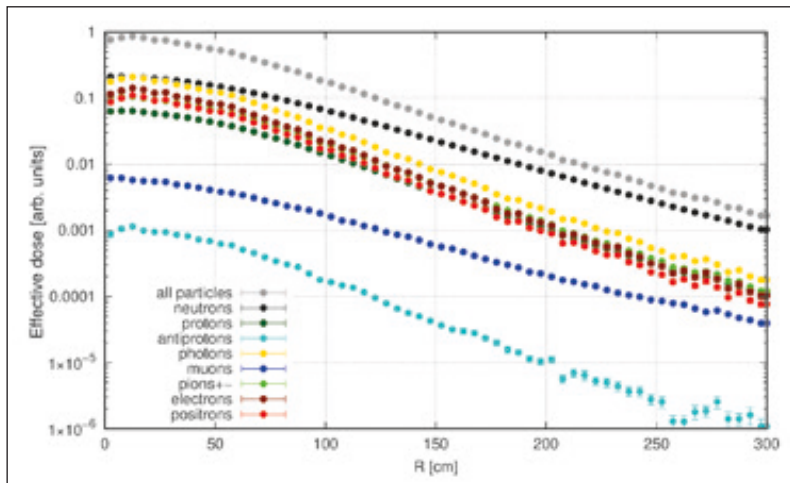


Abb. 4: Dosisbeitrag verschiedener Teilchenarten an der Gesamtdosis in radialem Abstand von der Neutrinostrahlachse ausgelöst durch Myon-Neutrinos

verschiedenen Teilchenarten nach dem Aufbau der Sekundärteilchenfeldes. Nicht alle Teilchen sind gleichermaßen dosisrelevant. Neutronen liefern den größten Beitrag zur effektiven Dosis. Abbildung 4 zeigt den effektiven Dosisbeitrag der verschiedenen Teilchenarten in Abhängigkeit vom Abstand von der Neutrinostrahlachse.

Strahlenschutzaspekte

Dosisaufbau

Aufgrund der hohen Neutrinoflüsse, insbesondere in Verlängerung der geraden Abschnitte im Beschleuniger, reichen die geringen Wechselwirkungswahrscheinlichkeiten aus, um für den Strahlenschutz relevante Flussdichten an geladenen und ungeladenen Sekundärteilchen zu produzieren. Die Rele-

vanz für den Strahlenschutz ergibt sich also nicht aus den Neutrinos direkt, sondern aus der sekundären Strahlung, die durch die Wechselwirkung mit Hadronen erzeugt wird. Diese wird entlang des Neutrino-pfads noch in erheblicher Entfernung zum ursprünglichen Entstehungsort der Neutrinos erzeugt. Eine Verringerung der Flussdichte erfolgt in erster Linie über eine Aufweitung des Neutrino-Strahlungsfeldes. Der Dosisaufbau erfolgt über wenige Meter durchstrahlter dichter Materie, abhängig von der Reichweite der Sekundärstrahlung. Dabei können höhere Strahlungswerte stark lokalisiert und abhängig von der Topografie auftreten. Sobald die Neutrinos weniger dichte Materie durchstrahlen, wie z. B. Luft, sinkt die Sekundärteil-

chenproduktion pro Volumeneinheit und damit die entsprechende Dosis. Ein menschlicher Körper ist verhältnismäßig dünn oder zu „kurz“, um einen relevanten Dosisaufbau direkt zu erzeugen. Potenziell dosisrelevant wäre daher nur der Aufenthalt einer Person direkt am Austrittspunkt der Neutrinos und Sekundärstrahlung hinter wenigen Metern dichter Materie, z. B. Erdreich oder Gebäudestrukturen.

Abhängig von der Topografie

Zur Quantifizierung der zu erwartenden neutrinoinduzierten Dosen sind Monte-Carlo-Simulationen das Mittel der Wahl (siehe Abbildung 5). Die Beschleunigerparameter (Energie, Strahlstrom, Strahloptik, Beschleuniger-aufbau) sowie die Betriebsdauer sind relevante Eingangsinformationen zur Abschätzung der Neutrinoflussdichten. Die Lage und Neigung des Beschleunigers sind entscheidend für den Austrittspunkt und -winkel der Strahlung sowie die Ausdehnung und Intensität des Strahlungsfeldes. Je nach Wahl dieser Faktoren können die auftretenden Jahresdosen in Bodennähe im Bereich von wenigen μSv oder mehrere mSv betragen.

Dosisbegrenzung und -minimierung

Potenziell relevante Strahlenfelder können in weitläufigen Arealen in großer Entfernung von der Quelle auftreten. Realistischerweise sind daher nur ge-

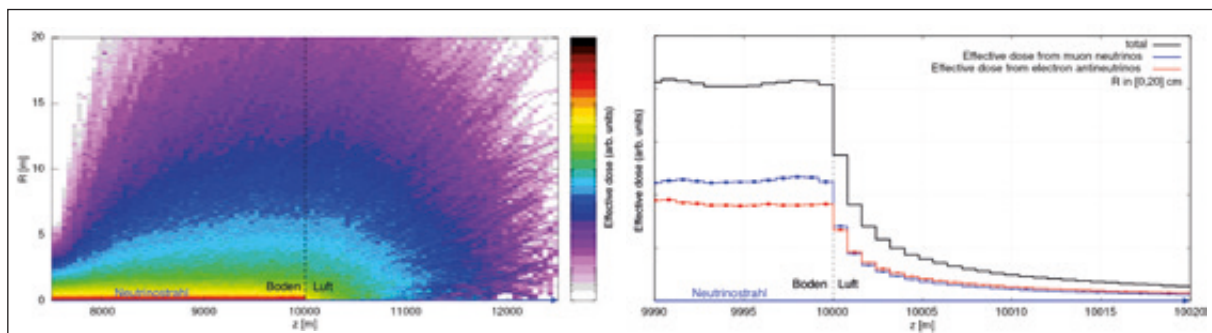


Abb. 5: Effektive Dosis als Funktion des Radialabstands von der Neutrinostrahlachse gegenüber dem Abstand vom Zerfallsort der negativen Myonen (links).

Die rechte Abbildung zeigt die mittlere effektive Dosis in der Strahlachse in der Nähe des Übergangs von Boden zu Luft gegenüber dem Abstand vom Zerfallsort der negativen Myonen. Die Neutrinowechselwirkungen in der Monte-Carlo-Simulation wurden erst ab einer Distanz von 7,5 km erzwungen. Dies ist ausreichend, da der Dosisaufbau innerhalb von nur wenigen Metern erfolgt.

ringe Dosen im vernachlässigbaren Bereich von einigen μSv pro Jahr gesellschaftlich akzeptabel. Die Lage und das Design des Colliders sind daher auf eine unwesentliche Dosis zu optimieren.

Es werden insbesondere auch technische Lösungen untersucht, die eine dynamische Veränderung des Myonenstrahls in vertikaler Richtung erlauben. Dies würde zu einem größeren effektiven Öffnungswinkel des Neutrinostrahls mit einer Reduktion der Flussdichten führen, was eine effektive Dosisreduktion zur Folge hat.

Eine optimierte Ausrichtung des Colliders würde es erlauben, sowohl die Anzahl und Fläche der Dosisaufbauzonen in der Erde zu begrenzen als auch in Bereiche zu legen, in denen sich Menschen nur selten aufhalten, z. B. Hochgebirge oder Gewässer, und ein entsprechend geringer Aufenthaltsfaktor angewendet werden kann. Dies müssen nachgewiesenermaßen Gebiete sein, in denen keine permanente Besiedlung während der Betriebszeit des Colliders erfolgen wird. Die Auszonung von Bereichen, in denen höhere Dosen auftreten, könnte eine weitere mögliche Kontrollmaßnahme darstellen.

Dosisüberwachung

Während des Betriebes stellt sich die Frage der Dosisüberwachung. Aufgrund der Anzahl und der Ausdehnung

sowie der eventuellen zeitlichen Variation der auftretenden Strahlenfelder muss geklärt werden, wie die Referenzperson ermittelt werden kann, für die sowohl ein entsprechender Dosisreferenzwert als auch Dosisgrenzwert eingehalten werden muss.

Eine Immissionsüberwachung dürfte sich nicht trivial gestalten aufgrund der erwarteten niedrigen Jahresdosen und der örtlichen Bestimmung der Strahlungsmaxima. Eine kontinuierliche messtechnische Emissionsüberwachung in Beschleunigernähe kombiniert mit den Ergebnissen der Strahlungstransportrechnungen inklusive eines konservativen Oberflächenmodells könnte einen möglichen Ansatz darstellen, um die Expositionen der Referenzperson zu überwachen.

Öffentliche Akzeptanz

Neben dem praktischen Strahlenschutz, d. h. der Minimierung einer realen Exposition von Personen, stellt sich die Frage der Kommunikation mit und Akzeptanz durch die Bevölkerung. Es ist erwartbar, dass mit zunehmender Entfernung von einer Forschungsanlage die Akzeptanz für eine potenzielle Exposition durch eine solche abnimmt. Der Nachweis und die Kommunikation, dass die Exposition vernachlässigbar ist, sind von entschei-

dender Bedeutung, um die Zustimmung der Bevölkerung und der Behörden für die Installation und den Betrieb einer Beschleunigeranlage zu gewinnen. Des Weiteren sind regulatorische Fragen für grenzüberschreitenden Strahlenschutz zu klären.

Fazit

Die Konstruktion und der Betrieb eines Myonencolliders stellen eine große technische Herausforderung dar. Dazu ergeben sich neue Fragen für den Strahlenschutz aufgrund der möglichen hohen Neutrinoflussdichten und deren Optimierung auf ein vernachlässigbares Niveau, die bereits in der Phase der Machbarkeitsstudie berücksichtigt werden müssen.

Die Fragestellungen sind vielfältig und komplex und betreffen die Vorhersage der Dosen, die an konkreten Orten auftreten können, mögliche technische Maßnahmen der Dosisreduktion, regulatorische Fragestellungen für die grenzüberschreitenden Expositionssituationen und die Frage der Kommunikation und Akzeptanz der Bevölkerung und Behörden bezüglich der Auswirkungen eines Beschleunigers, der in großer Entfernung betrieben wird.

**Claudia Ahdida, Giuseppe Lerner,
Heinz Vincke, Pavol Vojtyla,
Markus Widorski** □

Effektive Dosisreduktion

Kontinuierliche Emissionsüberwachung

LHC-ErUM-FSP informiert über Forschungsprojekte

Auf der Suche nach den Spielregeln des Universums

Deutsche Wissenschaftler:innen forschen in internationaler Zusammenarbeit am LHC Large Hadron Collider (LHC)

Die 4 Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb sind riesige, hochkomplexe Teilchendetektoren, die bis zu 40 Millionen Mal pro Sekunde die Spuren der Kollisionen aufzeichnen können.

Das ATLAS-Experiment untersucht die Eigenschaften des Higgs-Teilchens und forscht nach bisher unbekanntem physikalischen Phänomenen. **Das CMS-Experiment** erforscht das Higgs-Boson und sucht nach physikalischen Phänomenen jenseits des Standardmodells. **Das LHCb-Experiment** konzentriert sich auf die präzise Vermessung von Zerfällen leichter Teilchen, die ein Beauty- oder Charm-Quark enthalten. **Das ALICE-Experiment** untersucht das Quark-Gluon-Plasma und den Ursprung unseres Universums.

Mehr Informationen unter www.lhc-deutschland.de