

# Abschlussklärung des Strategieworkshops „Teilchenphysik“ 3.-4. Mai 2018 , Bonn<sup>1</sup>

Die 159 Teilnehmer des Workshops haben sich hauptsächlich mit offenen Fragen der Teilchenphysik, stringenten Tests des Standardmodells und der Suche nach Physik jenseits des Standardmodells beschäftigt. Hierbei wurde besonders auf zukünftige Projekte mit großem Interesse innerhalb der Community in Deutschland eingegangen, die für die Entwicklung der „European Strategy for Particle Physics“ ab 2019 von Interesse sind. Abgedeckt wurden die hierfür relevanten Themen der **Elementarteilchenphysik, der Hadron- und Kernphysik<sup>2</sup> und der Astroteilchenphysik<sup>3</sup>**. Dies bedingt, dass diverse Teilgebiete der genannten Bereiche nicht behandelt worden sind. Als Startpunkt für die Diskussion dienten die Abschlussklärungen der vier vorhergehenden thematischen Workshops<sup>4</sup>.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Diskussion separat für die Themenbereiche Physik an Collidern, non-Collider Physik und Neutrino-Physik dargestellt.

## Physik an Collidern

Collider ermöglichen die höchsten im Labor zugänglichen Energien und sind daher unverzichtbar für die weitere Erforschung der Physik auf den kleinsten Skalen. Weiterhin bieten sie durch die präzise Untersuchung der schwersten bekannten Elementarteilchen (Higgs-Boson, Bottom- und Top-Quarks, W- und Z-Bosonen) sowie die Möglichkeit neue Teilchen direkt zu produzieren, einzigartige Möglichkeit, Antworten auf große offene Fragen der Teilchenphysik und der Kosmologie zu finden. Collider bieten auch die Möglichkeit die starke Wechselwirkung in verschiedenen interessanten Bereichen zu studieren.

Die Teilnehmer stellen fest, dass die weitere erfolgreiche Datennahme am LHC und der Bau seiner Hochluminositäts-erweiterung HL-LHC ein ausgezeichnetes Entdeckungspotenzial bieten, sowohl durch Präzisionsmessungen als auch durch die Suche nach neuen Teilchen. Neue Entdeckungen am LHC können auch richtungsweisend für zukünftige Großprojekte sein. **Die starke deutsche Beteiligung an den Experimenten am LHC und am HL-LHC soll daher unvermindert fortgesetzt werden.**

## Grundlegende physikalische Fragestellungen

**Higgs-Boson:** die Eigenschaften des am LHC entdeckten Higgs-Bosons sind bislang kompatibel mit den vom Standardmodell vorhergesagten, aber auch mit denen einer Vielzahl von Erweiterungen. Eine hochpräzise und umfassende Untersuchung des Higgs-Bosons ist mit hoher Priorität notwendig (Präzisionsmessung der Kopplung an alle bekannten Teilchen, Messung der totalen Zerfallsbreite, Messung des Higgs-Potenzials, Suche nach neuen Higgs-Zerfällen, z.B. in unsichtbare Teilchen, Suche nach weiteren Higgs-Bosonen). Diese Messungen geben Antworten auf wesentliche Fragen: Wie wird die Higgs-Masse vor Einflüssen der Physik bei hohen Skalen geschützt? Ist das Higgs-Boson elementar oder besitzt es Substruktur? Gibt es einen erweiterten Higgs-Sektor? Ist der Higgs-Sektor verknüpft mit neuer Physik? Ist das Higgs-Boson ein Schlüssel zur Erklärung der Materie-Antimaterie-Asymmetrie? Gibt es einen Zusammenhang zwischen der elektro-schwachen Symmetriebrechung und der Inflation im frühen Universum?

**Präzisionsmessungen mit schweren Teilchen (Top-Quark, W, Z):** die Massen von Top-Quark, W- und Z-Boson stellen wichtige Parameter dar, deren hochpräzise Messung für das Verständnis von Modellen neuer Physik

---

<sup>1</sup> [Agenda](#) und Kontakte: [C. Zeitnitz](#) (KET), [F. Maas](#) (KHuK), [C. Weinheimer](#) (KAT)

<sup>2</sup> Europäische Strategie der Hadron- und Kernphysik: [NuPECC Long Range Plan 2017](#)

<sup>3</sup> Europäische Strategie der Astroteilchenphysik 2017-2026: [APPEC Roadmap](#)

<sup>4</sup> [KET Workshop on Future e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> Colliders \(3.-4.5.2016 München\)](#)

[The Future of Neutrino Physics \(23.-24.02.2017 Heidelberg\)](#)

[The Future of Non-Collider-Physics \(27.-28.4.2017 Mainz\)](#)

[Workshop on Future Hadron Colliders at the Energy Frontier \(14.-15.12.2017 Hamburg\)](#)

wesentlich ist. Die Messung der Kopplungen und Mischungswinkel, die im Standardmodell präzise vorhergesagt werden, und die Suche nach neuen Zerfällen, die im Standardmodell stark unterdrückt sind, sind sensitiv auf Effekte neuer Physik und komplementär zur direkten Suche nach neuen Teilchen.

**Suche nach neuen Teilchen:** Die direkte Suche nach neuen Teilchen muss einerseits zu höheren Massen und andererseits zu kleineren Kopplungen ausgeweitet werden. Teilchen mit Massen jenseits der Sensitivität des LHC werden in vielen Theorien jenseits des Standardmodells vorhergesagt. Sie könnten indirekt Präzisionsmessungen im Bereich der elektroschwachen oder Flavour-Physik beeinflussen. Falls am LHC/HL-LHC neue Teilchen in den nächsten Jahren entdeckt oder signifikante Anomalien im Bereich der Präzisionsmessungen beobachtet werden, ist es wichtig, einen Collider bei möglichst hoher Energie zur Verfügung zu haben. Nur hiermit könnten diese studiert und nach verwandten Teilchen gesucht werden. Es ist auch möglich, dass neue Teilchen niedriger Masse existieren, die aber nur sehr schwach mit den bekannten Teilchen wechselwirken und daher bisher nicht entdeckt wurden. Für die Suche nach derartigen Teilchen ist eine möglichst hohe Luminosität und möglichst niedriger Untergrund wichtig. Besonders interessant ist die Frage, ob die dunkle Materie im Universum durch neue Teilchen erklärt werden kann. Daher stellt die Suche nach derartigen Teilchen einen Schwerpunkt dar. Auch Suchen nach weiteren Higgs-Bosonen sowie nach Teilchen, die das Higgs-Boson auf der elektroschwachen Skala stabilisieren (z.B. Supersymmetrie, zusätzliche Raum-Dimensionen), sind von großem Interesse.

**Flavour-Physik:** Die Flavourphysik öffnet ein Fenster zur Physik jenseits des Standardmodells weit oberhalb der direkt zugänglichen Energieskalen. Sie wird im Quark-Sektor an Collidern studiert: momentan mit dem BELLE-2 Detektor bei SuperKEKB und dem LHCb-Detektor am LHC. Neue schwere Teilchen können unter anderem die Zerfallseigenschaften von b- und c-Hadronen maßgeblich ändern und damit indirekt einen Hinweis auf neue Physik geben. Die Suche nach Leptonflavour-Verletzung in Tau- und Myonzerfällen eröffnet ein weiteres Fenster auf neue Physik und wird sowohl an Collidern als auch mit dedizierten Experimenten studiert.

**Starke Wechselwirkung:** Es gibt noch viele offene Fragen im Verständnis der starken Wechselwirkung. Grundlegende Aspekte wie „Confinement“ und der Anstieg von Streuquerschnitten mit wachsender Energie sind nicht verstanden. Das verbesserte Verständnis der stärksten Kraft in der Natur ist ein wichtiges Ziel für die Teilchen- und Kernphysik. Einige der wichtigen Themen in diesem Zusammenhang sind die Präzisionsmessung der Struktur von Hadronen, Messungen bei sehr kleinen Bjorken-x ("saturation") und Messungen in sehr dichten Medien. Die Messungen zur Struktur von Hadronen haben direkte Implikationen für das physikalische Potenzial von Hadron-Hadron-Collidern.

### *Elektron-Positron-Collider*

Ein Elektron-Positron-Collider mit Energien zwischen 90 GeV und mehreren TeV hat ein großes und klar definiertes Physikpotenzial.

Insbesondere nach der Entdeckung des Higgs-Bosons bietet ein  $e^+e^-$ -Collider bei einer Energie von  $\sim 250$  GeV eine einzigartige Gelegenheit, das Higgs-Boson im Detail zu untersuchen. Viele der Higgs-Kopplungen können bei einer derartigen "Higgs-factory" mit hoher Präzision gemessen und die totale Zerfallsbreite des Higgs-Bosons kann bestimmt werden. Die geplante Datennahme bei Energien von ca. 90 und 160 GeV ermöglicht auch eine Hochpräzisionsmessung verschiedener Eigenschaften der W- und Z-Bosonen. Eine Hochpräzisionsmessung der Masse und Kopplungen des Top-Quarks erfordert 350 GeV. Eine Messung des Higgs-Potenzials erfordert eine Energie von mindestens 500 GeV. Elektron-Positron-Collider haben auch ein hohes Potenzial für die Suche nach neuen Teilchen, insbesondere bei relativ schwachen Kopplungen. Dieses Programm ist komplementär zum LHC/HL-LHC und rechtfertigt den zeitnahen Bau einer solchen Maschine.

- Der in Japan vorgeschlagene **ILC** ist ein Linearbeschleuniger, basierend auf der (führend in Deutschland entwickelten) Technologie, die für den European XFEL in Hamburg erfolgreich genutzt wird und ist daher technologisch sehr ausgereift. Mit einer Anfangsenergie von 250 GeV kann er zunächst als „Higgs Factory“ dienen und später zu höheren Energien ausgebaut werden. Das ILC-Design wurde 2013 in einem Technical Design Report beschrieben. Der ILC könnte 2032 mit der Datennahme anfangen.
- **CLIC** ist ebenfalls ein Linearbeschleuniger, der am CERN entwickelt wird. Er hat das Potenzial, Energien im Multi-TeV Bereich zu erreichen. Eine erste Stufe bis 380 GeV ist für Präzisionsmessungen des Higgs-Bosons und des Top-Quarks optimiert. Die CLIC Technologie wurde experimentell verifiziert und wurde 2012 in

einem Conceptional Design Report (CDR) dokumentiert. Die Datennahme für die erste Stufe könnte 2035 beginnen.

- Die Kreisbeschleuniger **CepC** in China und **FCC-ee** am CERN, die in Ringen von ca. 100 km Umfang vorgesehen sind, können Energien bis zu 350 GeV erreichen, und somit ebenfalls als Higgs-Factory genutzt werden. Insbesondere bei niedrigeren Energien, d.h. 90 und 160 GeV, lässt sich eine höhere Luminosität als für Linearbeschleuniger erreichen. Eine Erweiterung zu höheren Energien ist aufgrund der zu hohen Synchrotronstrahlung unmöglich. Der CDR von CepC ist für 2018 vorgesehen und die Datennahme könnte 2030 beginnen. Für den FCC-ee wird ebenfalls für 2018 ein CDR erwartet, und die Datennahme könnte ca. 2039 anfangen.

### **Ein Elektron-Positron-Collider soll mit höchster Priorität realisiert werden, ausbaubar zu mindestens 500 GeV.**

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse, die sich mit einem Elektron-Positron-Collider gewinnen lassen, sind komplementär zu den Erkenntnissen am HL-LHC. Die Datennahme an einem  $e^+e^-$ -Beschleuniger parallel zur HL-LHC Datennahme ist wünschenswert.

**Wir unterstützen mit Nachdruck die japanische Initiative den ILC als „Higgs-Factory“ bei einer anfänglichen Energie von ca. 250 GeV zeitnah als internationales Projekt in Japan zu realisieren.** Hierbei sollte von Beginn an die Ausbaubarkeit zu höheren Energien (mindestens 500 GeV) eingeplant werden, um die Top-Quark-Masse und das Higgs-Potenzial messen zu können, sowie um das Potenzial für Suchen nach neuen Teilchen zu erhöhen.

#### *Hadron-Hadron-Collider*

Mit Hadron-Hadron-Collidern lassen sich die höchsten Energien erreichen und sie haben daher ein großes Entdeckungspotenzial. Experimente an einem Hadron-Hadron-Collider bei Energien jenseits des LHC können viele fundamentale Fragen der Teilchenphysik im Detail studieren, wie zum Beispiel die Struktur des Higgs-Potenzials, die Suche nach weiteren Higgs-Bosonen, anderen Teilchen hoher Masse und massiven Dark Matter-Kandidaten. Hadron-Beschleuniger haben auch ein hervorragendes Potenzial im Bereich der Flavour-Physik, sowohl durch Untersuchungen von b-Hadronen als auch durch Untersuchungen von Top-Quarks. Zudem ermöglichen sie auch Schwerionenkollisionen und damit Studien extremer Quark-Gluon-Materie.

Die am CERN vorgeschlagenen Projekte **HE-LHC** (27 TeV pp) und **FCC-hh** (100 TeV pp) basieren auf der gleichen Beschleunigertechnologie und der Entwicklung von Hochfeldmagneten. Beide bieten ein hochinteressantes wissenschaftliches Potenzial und sollten zielgerichtet weiterentwickelt werden. HE-LHC (FCC-hh) könnte ab 2040 (2043) mit der Datennahme beginnen. Die in China durchgeführte Studie **SppC** bietet ein ähnliches physikalisches Potenzial wie FCC-hh und wird mit Interesse verfolgt.

**Für die genannten Projekte sind umfangreiche Entwicklungsarbeiten im Bereich der Hochfeldmagnete und der Detektoren notwendig. Diese sollten mit hoher Priorität durchgeführt werden.**

Da die Entwicklungsarbeiten im Bereich der Magnete weitgehend unabhängig von der Energie des geplanten Beschleunigers sind, und es momentan noch keine Hinweise auf die bevorzugte Energieskala gibt, ist es verfrüht sich auf einen Wert für die Energie festzulegen.

**Die Fortführung und der Ausbau der erfolgreichen Experimente zur Flavour-Physik sollten, sowohl am LHC mit allen Ausbaustufen, als auch bei zukünftigen Hadron-Beschleunigern, Teil des wissenschaftlichen Programms sein.** Dies bezieht sich insbesondere auch auf den Ausbau von LHCb für die Nutzung des HL-LHC jenseits von 2030.

#### *Schwerionen-Collider*

Schwerionen-Kollisionen bei substanziell erhöhten Luminositäten und Energien eröffnen exzellente neue Möglichkeiten zur Untersuchung stark wechselwirkender Materie bei hohen Temperaturen. Hierdurch können Fragen zum Zusammenhang zwischen den makroskopischen Fluid-Eigenschaften des Quark-Gluon Plasmas und der mikroskopischen QCD Physik im Detail studiert werden.

Der Zugang zu neuen Bereichen hoher Energiedichten und Temperaturen erlaubt es, die Eigenschaften heißer und dichter Materie mit neuen, bisher nicht zugänglichen Observablen präzise zu untersuchen. Zur Charakterisierung der makroskopischen Eigenschaften eines expandierenden QCD-Fluids sind insbesondere Messungen von identifizierten Teilchen mit sehr kleinen Transversalimpulsen ( $< 20$  MeV/c) von großem Interesse. Aufbauend auf dem für LHC Run-3 und Run-4 entwickelten ALICE Upgrade wird die Entwicklung eines neuartigen Detektors, basierend auf modernster strahlenharter Siliziumtechnologie, in der nächsten Zeit realisierbar. **Messungen mit einem derartigen Experiment der nächsten Generation können bereits am HL-LHC ab 2030 beginnen und finden an zukünftigen Beschleunigern mit höheren Energien eine natürliche Fortsetzung.**

Zur Erforschung des QCD Phasendiagramms wird zusätzlich weltweit die Variation der Kollisionsenergie hin zu niedrigeren Temperaturen und höheren Dichten verfolgt. Für die deutschen Gruppen im Bereich der Hadron- und Kernphysik ist in diesem Kontext das zukünftige Compressed-Baryonic-Matter-Experiment an FAIR von besonderem Interesse.

### *Elektron-Hadron-Collider*

Ein Elektron-Hadron-Collider bei deutlich erhöhten Luminositäten hat ein interessantes wissenschaftliches Potenzial, das komplementär zu Hadron-Hadron-Collidern und Elektron-Positron-Collidern ist.

- Die Ergänzung des HL-LHC durch einen „Energy Recovery Electron Linac“ (ERL) in zirkularer Konfiguration (LHeC) ermöglicht am CERN ein Elektron-Proton und Elektron-Kern-Experiment mit einer Schwerpunktenergie über einem TeV und dem etwa 1000-fachen der HERA-Luminosität. Der LHeC ermöglicht präzise Messungen der QCD, der Proton-Struktur, der elektroschwachen Wechselwirkung, der Eigenschaften von Top-Quarks und Higgs-Bosonen, sowie Suchen nach neuer Physik jenseits des Standardmodells. Er würde parallel zum HL-LHC Daten nehmen und den HL-LHC substantziell ergänzen. Falls am CERN ein HE-LHC oder FCC-hh realisiert wird, können die Elektronen des ERL mit den jeweiligen Hadronen zu Kollisionen gebracht werden und entsprechend das Potenzial dieser Beschleuniger weiter stärken. **Die Fortführung von Studien zum Physikpotenzial und die Entwicklung der benötigten Beschleunigertechnologie wird unterstützt.**
- Der EIC in den USA bietet auf mittlerer Zeitskala eine präzise Vermessung der Struktur von Nukleonen und Kernen und wie sie sich aus Quarks und Gluonen zusammensetzen. Dies wird durch die immensen Fortschritte im Bereich der Beschleunigertechnologie und der Theorie der starken Wechselwirkung ermöglicht. Das Programm umfasst die 3-dimensionale Struktur von Hadronen im Orts- und Impulsraum, die longitudinale und transversale Spin-Struktur von Hadronen, Gluon-Saturation bei kleinem  $x$ , Parton-Korrelationen in Nukleonen und Kernen und Vieles mehr. Die genaue Kenntnis der Quark- und Gluonverteilungen im Nukleon und in Kernen ist für die Interpretation von Teilchen-Reaktionen in der Kern-, Hadronen- und Hochenergiephysik notwendig. **Eine Beteiligung deutscher Gruppen am EIC ist daher von besonderem Interesse für die Entwicklung der Hadronen- und Kernphysik.**

### *Non-Collider Projekte*

Viele wichtige physikalische Fragestellungen können durch Experimente mit natürlichen Teilchenquellen oder an Beschleunigern durch Fixed-Target oder Beam-Dump-Experimente komplementär zu Collider-Experimenten studiert werden. Solche Experimente bieten aufgrund höchster Präzision oder sehr hohen Teilchenintensitäten einmalige Möglichkeiten bekannte physikalische Prozesse besser zu verstehen und neue physikalische Phänomene zu entdecken. Zusätzlich erlauben sie vorbereitende Messungen für zukünftige Projekte, geben die Möglichkeit innovative Technologien und neue Messmethoden zu entwickeln und zu testen. Weiterhin ermöglichen sie eine exzellente Ausbildung für den wissenschaftlichen Nachwuchs. Die existierende Infrastruktur in Deutschland und Europa bietet hervorragende Möglichkeiten für ein breites Spektrum von neuartigen und aussichtsreichen Ansätzen. An den hier diskutierten Projekten besteht in Deutschland ein besonderes Interesse.

### *Dunkle Materie, sehr schwach wechselwirkende und langlebige Teilchen*

Klare kosmologische und astrophysikalische Evidenzen zeigen, dass es im Universum fünfmal mehr Materie in Form von exotischer, sogenannter „Dunkler Materie“ als die uns bekannte Materie gibt. Mit verschiedenen Methoden wird nach noch unbekanntem Teilchen dieser Dunklen Materie gesucht. Besonders interessant sind schwere schwach wechselwirkende Teilchen (WIMPs) und leichte Axionen. Viele Modelle, die WIMPs oder axionartige Teilchen beschreiben, sagen zudem die Existenz von langlebigen neuen Teilchen vorher.

WIMPs wären auf natürliche Weise beim Urknall mit der richtigen Dichte erzeugt worden. Zurzeit führen die Experimente CRESST-III (niedrige Massen) und XENON1T (mittlere und große Massen), mit deutscher Beteiligung, die direkte WIMP-Suche an. Mit dem weiteren Ausbau von CRESST-III auf 100 Detektoren und XENON1T auf XENONnT wird diese Suche deutlich empfindlicher werden. Als langfristig strategisches Ziel ist der Flüssig-Xenon-Detektor **DARWIN** zu nennen. Die signifikant erhöhte Sensitivität auf WIMPs wird hier durch ein breites Neutrino-Physikprogramm ergänzt. **Es wird daher nachdrücklich empfohlen, das DARWIN Experiment zu realisieren.**

Axionen und axion-ähnliche Teilchen sind durch das CP-Problem der starken Wechselwirkung und Erweiterungen des Standardmodells motiviert. Sie bieten einen einzigartigen Zugang zu fundamentalen Energieskalen weit jenseits des TeV Bereichs. Darüber hinaus sind sie sehr gute Kandidaten für die dunkle Materie im Universum. Gruppen aus Deutschland spielen eine international führende Rolle in der Theorie und der Entwicklung von Experimenten, die komplementäre Bereiche der Axion-Phänomenologie abdecken. Erste erfolgreich realisierte Experimente von deutschen Gruppen und der Beginn des Aufbaus von ALPS-II bei DESY in Hamburg bilden eine hervorragende Basis für eine koordinierte Weiterentwicklung des Axion-Programms in Deutschland. Die Entwicklung von kleineren Experimenten mit großem Entdeckungspotenzial muss weiterverfolgt werden. **Unterstützt wird die starke Beteiligung deutscher Gruppen bei der Entwicklung des großen Helioskops IAXO und dem Experiment MADMAX, welches die Suche nach axionartiger dunkler Materie erlaubt. Die Möglichkeit der langfristigen Realisierung beider Projekte am Standort DESY in Hamburg wird sehr begrüßt.**

Einen sehr vielversprechenderen Ansatz zur Suche nach sehr schwach wechselwirkenden oder langlebigen Teilchen (z.B. leichte dunkle Materie, dunkle Photonen, sterile Neutrinos) bieten Beam-Dump-Experimente, bei denen solche Teilchen mit hoher Rate erzeugt und nachgewiesen werden könnten. Experimente mit deutscher Beteiligung, wie das BDx-Experiment am Elektronenbeschleuniger MESA und das NA62++ Experiment am CERN SPS, sind zurzeit in Vorbereitung und sollten weiter unterstützt werden. Ein noch höheres Entdeckungspotenzial sowie einmalige Möglichkeiten zum Studium von Tau-Neutrinos, bietet das vorgeschlagene SHiP-Experiment am Protonenbeschleuniger SPS am CERN. Deutsche Gruppen liefern hierzu bereits signifikante Beiträge zu Studien und zur Planung. **Eine führende Mitwirkung von deutschen Gruppen an Experimenten mit signifikantem Entdeckungspotenzial und komplementär zu Collider-Experimenten wird nachdrücklich empfohlen.**

### *Suche nach neuer Physik mit Präzisionsexperimenten*

Komplementär zur direkten Suche nach neuen Teilchen haben Präzisionsexperimente ein sehr großes Entdeckungspotenzial für Physik jenseits des Standardmodells. So ermöglicht die geplante Präzisionsmessung des schwachen Mischungswinkels bei niedrigen Energien mit dem P2-Experiment am MESA-Beschleuniger in den kommenden Jahren einen empfindlichen Test des Standardmodells. Dies unterstreicht die führende Rolle von deutschen Gruppen an aktuellen und zukünftigen Präzisionsexperimenten.

Die Suche nach elektrischen Dipolmomenten von Teilchen ermöglicht es, neue Quellen von CP-Verletzung zu entdecken, ohne die es kaum möglich scheint, das Verschwinden der Antimaterie in der Entwicklung des Universums zu erklären. Einen neuen Zugang, mit einer deutlichen Steigerung der Sensitivität, erlauben Experimente mit geladenen Teilchen in Speicherringen. **Wir unterstützen sehr den schrittweisen Aufbau eines EDM Experiments in Deutschland, mit dem Ziel einer erstmaligen Messung des elektrischen Dipolmoments des Protons.**

Die Suche nach extrem seltenen Zerfällen von geladenen Kaonen wird erfolgreich am NA62-Experiment durchgeführt und bietet eine weltweit einmalige Sensitivität für den Nachweis langlebiger, schwach wechselwirkender Teilchen. Ein Ausbau des Experiments, wie im KLEVER Projekt vorgeschlagen, würde eine komplementäre und somit sehr interessante Messung von Zerfällen neutraler Kaonen ermöglichen. Das Mu3e-Experiment nutzt einen Myonstrahl am PSI für die Suche nach Zerfällen, die die Leptonenfamilienzahl verletzen.

**Der vorgeschlagene Bau eines neuen hochintensiven Myonstrahls (HiMB) am PSI wäre wünschenswert, um das volle Potenzial des Mu3e Detektors auszunutzen.**

### *Studien der starken Wechselwirkung an fixed target Experimenten*

Ein präzises Verständnis der starken Wechselwirkung im Bereich großer Kopplungsstärke, zu dem das PANDA-Experiment wichtige Beiträge liefern wird, hat direkte Auswirkungen auf fundamentale Fragestellungen der Teilchen-, Atom- und nuklearen Astrophysik. Beispiele sind das Phasendiagramm der Quantenchromodynamik (QCD), die Struktur und Anregungszustände der Hadronen und der Atomkerne, die Entwicklung des Universums und die Elementsynthese sowie die hadronischen Beiträge zum anomalen magnetischen Moment des Myons. In diesem Zusammenhang hat die zügige Fertigstellung des internationalen FAIR Beschleunigerzentrums für die deutschen Gruppen der Hadron- und Kernphysik höchste Priorität.

Der bestehende, flexible Aufbau des COMPASS Spektrometers, mit verschiedenen Möglichkeiten der Erweiterung, sollte als Basis für zukünftige Schlüsselexperimente zur starken Wechselwirkung am M2-Strahl des CERN-SPS dienen. Beispiele hierfür sind die vorgeschlagenen neuen Experimente zu grundlegenden Fragestellungen der starken Wechselwirkung, wie Spektroskopie mit hoher Statistik von Mesonen mit Strangeness-Anteil, Spektroskopie von exotischen Zuständen - komplementär zu LHCb und PANDA - sowie Untersuchungen der Struktur von Nukleonen und Mesonen. Studien zur weiteren Ausnutzung des M2-Strahls sollten vorangetrieben werden, wobei Synergien zwischen verschiedenen vorgeschlagenen Experimenten vorgesehen und berücksichtigt werden sollten.

## Physik der Neutrinos

Neutrino-Physik ist ein sehr dynamisches, breites Arbeitsfeld mit höchstem Physikpotenzial an der Schnittstelle von Teilchen-, Astroteilchen- und Kernphysik. Über den Nachweis von Neutrino-Oszillationen wurde eine erste klare Evidenz für Physik jenseits des Standardmodells erbracht. Zentrale physikalische Zielsetzungen umfassen die Aufdeckung der unbekannteten Eigenschaften von Neutrinos: ihre absolute Massenskala und Massenhierarchie, sowie ihre Teilchen-Antiteilchen-Eigenschaften. Experimente mit Neutrinos ermöglichen den Zugang zur CP-Verletzung im leptonen Sektor sowie die Suche nach Leptonzahl-Verletzung.

Im Folgenden werden zu jedem Thema die Projekte diskutiert. Die Reihung enthält aber keine Wertung.

### *Neutrinomasse*

Die Untersuchung der Kinematik des  $\beta$ -Zerfalls von Tritium und des Elektron-Einfangs (EC) von Ho-163 ermöglicht eine Bestimmung der absoluten Massenskala von Neutrinos mit sub-eV Sensitivität, sowie die Suche nach sterilen Neutrinos auf der eV- und keV-Skala mit hoher Empfindlichkeit, was von fundamentaler Bedeutung für Neutrino-Massenmodelle und die Kosmologie ist.

- das Großexperiment **KATRIN** wird mit den jetzt beginnenden Tritium-Messungen nach 5 Jahren eine Sensitivität von zunächst 200 meV erreichen. **Da KATRIN weltweit einzigartig ist und kein Experiment seine unmittelbare Nachfolge antreten kann, soll prioritär durch dessen Ausbau die Sensitivität weiter gesteigert werden.** Ein interessantes Physikpotenzial ergibt sich bei KATRIN auch durch die Suche nach sterilen Neutrinos auf der eV-Skala als Test der Reaktor-anomalie sowie auf der keV-Skala (Kandidaten für warme Dunkle Materie) bei extrem kleinen Mischungswinkeln.
- Mit mehreren experimentellen Methoden wird versucht, eine Empfindlichkeit jenseits von KATRIN zu erreichen. **PROJECT-8's** Ziel ist das Tritium Betaspektrum mit der Cyclotron Radiation Emission Spectroscopy (CRES)-Technik präzise zu vermessen. Dabei sind Entwicklungsarbeiten für eine atomare Tritiumquelle essenziell, um die systematischen Begrenzungen durch molekulare Endzustandswechselwirkungen zu beseitigen. Das **ECHO** Experiment setzt hochauflösende Arrays von Kryobolometern zur Spektroskopie des Elektroneneinfach-Spektrums von Ho-163 ein. **Die Entwicklung beider komplementären Techniken sollte unterstützt werden, um den Bereich der invertierten Massenskala jenseits von KATRIN abzudecken.**

### *Natur der Neutrinos – Leptonzahl-Verletzung*

Experimente zum, im Standardmodell verbotenen, neutrinolosen Doppelbeta-Zerfall ( $0\nu\beta\beta$ ) erlauben eine sehr empfindliche Suche nach der Verletzung der Leptonzahl und nach der Natur der Neutrinos (Majorana- versus Dirac-Teilchen). Die zur Zeit empfindlichsten Experimente nutzen die Isotope Ge-76 und Xe-136. Die Steigerung



der Sensitivität erfordert eine Vergrößerung der Targetmasse bei weiterer Reduktion von Untergrundsignalen und Optimierung der Energieauflösung. Die Unsicherheit der Kernmatrixelemente erfordert die Untersuchung des Prozesses mit mindestens zwei unterschiedlichen Isotopen.

- Die bisherigen **GERDA-II** Messungen am LNGS-Labor haben gezeigt, dass Detektorarrays mit angereichertem Ge-76 sowohl die niedrigste Untergrundrate als auch die beste Energieauflösung weltweit von 0νββ-Experimenten aufweisen. LEGEND-200 als gemeinsames Nachfolgeexperiment von GERDA und MAJORANA wird die Empfindlichkeit für Ge-76 weiter deutlich steigern. Deutsche Gruppen nehmen eine führende Rolle in diesen Projekten ein.
- Für 0νββ-Experimente mit Xe-136 existieren zwei vielversprechende Ansätze mit deutscher Beteiligung: **EXO-200** und sein geplanter Nachfolger **nEXO** basieren auf angereichertem Xe-136 als aktives Target während das in Planung befindliche Dark Matter-Experiment **DARWIN** eine zu nEXO ähnliche Menge von Xe-136 in einem Xenondetektor ohne Anreicherung besitzt. DARWIN bietet, durch die Kombination mit der Suche nach Dunkler Materie, ein von zukünftigen Erkenntnissen zur Neutrino-Massenskala unabhängiges Entdeckungspotenzial.
- Neben diesen großen Projekten mit Ge-76 und Xe-136 gibt es im europäischen und außereuropäischen Umfeld weitere laufende und geplante Szintillator- oder Kryobolometerbasierte Experimente mit den Isotopen Te-130, Xe-136 und Mo-100. Gerade Szintillatorbasierte Experimente erlauben es zwar leichter, große Targetmengen einzusetzen, allerdings ist die Energieauflösung und damit das Entdeckungspotential deutlich geringer.

**Das einzigartige Entdeckungspotenzial von 0νββ sollte durch den Ausbau von GERDA zu LEGEND-200 weiter intensiv verfolgt werden. Der weitere Ausbau zu LEGEND-1000 erscheint ebenfalls vielversprechend und sollte, basierend auf den Erfahrungen mit LEGEND-200, verfolgt werden. Parallel dazu wird DARWIN, neben der Suche nach WIMPS, der Messung von solaren Neutrinos und der Rolle als Detektor für Supernova-Neutrinos, auch bei 0νββ eine starke Rolle einnehmen, weswegen es ebenfalls nachdrücklich empfohlen wird.**

#### *Neutrino-massenhierarchie und Oszillationsparameter*

Das Verständnis der Massenhierarchie von Neutrinos ist sehr wichtig für Neutrino-Modelle sowie zur Eingrenzung der CP-verletzenden Phase. Es existieren drei komplementäre Zugänge zur ihrer Bestimmung: a) **Reaktor-neutrinos** mit einer Präzisions-Messung der  $e^+$ -Energieverteilung bei mittlerer Baseline (~50 km) und Zugang durch Interferenz der Oszillations-Parameter  $\Delta m^2_{13}$  und  $\Delta m^2_{23}$  b) long-baseline (LBL) **Beschleuniger-Experimente** mit Zugang über materieinduzierte Effekte im  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  appearance Kanal c) **Neutrino-Teleskope** mit multi-Mt Massen für atmosphärische Neutrinos mit Zugang über materieinduzierte Flavour-Umwandlungen bei Neutrinos bzw. Antineutrinos.

- Das physikalische Potenzial des ab 2021 beginnenden **JUNO** Experiments mit einem 20 kt Flüssigszintillator soll (unter sehr sichtbarer Beteiligung deutscher Gruppen) in einer mehrjährigen Messphase voll ausgeschöpft werden.
- Die gemeinsame Analyse der beiden LBL-Experimente **T2K-II** und **NOvA** (letzteres ohne Beteiligung aus Deutschland) kann einen entscheidenden Beitrag zur Bestimmung der Massenhierarchie durch Ausnutzung materie-induzierter Effekte leisten. Das im Bau befindliche **DUNE** Experiment wird mittelfristig eine zweifelsfreie Bestimmung der Massenhierarchie ermöglichen.
- Die beiden Neutrino-Teleskope **ORCA** und **PINGU** bieten ähnliche Sensitivität auf die Massenhierarchie. Die Zeitskala ihrer Realisierung hängt von zukünftigen Förderentscheidungen in den USA und in Europa ab. Das geplante erste Upgrade von IceCube mit weiteren Strings bietet interessante Perspektiven. Die deutschen Gruppen sind weit überwiegend bei IceCube am Südpol engagiert.

Eine klare Bestimmung der Massenhierarchie mit  $> 5 \sigma$  erfordert die Verfolgung der drei komplementären Messungen mit Reaktor-, Beschleuniger-, und atmosphärischen Neutrinos, da dies nur durch die gemeinsame Analyse aller Daten erreicht werden kann. **Eine signifikante Beteiligung von deutschen Gruppen an einem der beiden Experimente mit atmosphärischen Neutrinos ist sehr wünschenswert.**

#### *CP-Verletzung*

Der Nachweis von CP-Verletzung im Lepton-Sektor und die Messung der damit verbundenen Phase ist von zentraler Bedeutung für die Teilchenphysik. Erste Schritte zur Suche nach CP-Verletzung werden von T2K sowie dem T2K-II Experiment mit einem Upgrade des Near-Detektors sowie des Beschleunigers geleistet. Das im Bau befindliche long-baseline-Experiment **DUNE** sowie das geplante **T2HK** Experiment sind die einzigen mittelfristigen Projekte mit dem Potenzial für eine präzise Messung der CP-Verletzung und bieten darüber hinaus

ein breites Physikprogramm, wie z.B. die Messung von Supernova-Neutrinos und die Suche nach dem Proton-Zerfall.

- DUNE und T2HK unterscheiden sich in der verwendeten Detektortechnologie, und bieten damit komplementäre Schwerpunkte im Physikprogramm: Beide Experimente bieten eine vergleichbare Empfindlichkeit in Standardmodell-Szenarien, jedoch eröffnet der Breitband-Neutrinostrahl von DUNE den Vorteil von deutlich mehr Redundanz für die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells.
- In Deutschland hat sich ein signifikantes Interesse an einer sichtbaren Beteiligung in der Long-Baseline-Neutrino-Physik bei **LBNF/DUNE** gebildet. Dieses stützt sich auf die Expertise in den Bereichen hochgranularer Kalorimeter und Flüssigszintillatoren und ermöglicht Verbindungen zu den Aktivitäten am Fermilab und an der Neutrino-Plattform am CERN.
- Die Entwicklung wasserbasierter Flüssigszintillatoren als komplementäre Detektortechnik für das LBL Programm erlaubt eine deutliche Erweiterung des Physikpotenzials für astrophysikalische Neutrinos und der Suche nach dem neutrinolosen Doppelbetazerfall.

**Eine sichtbare Beteiligung deutscher Gruppen an long-baseline Experimenten, insbesondere bei LBNF/DUNE, wird mit Nachdruck unterstützt.**

## Theorie

Eine breite theoretische Bearbeitung der Themen dieses Workshops ist für die physikalische Interpretation der experimentellen Daten unerlässlich. Durch die Theorie werden auch die Querverbindungen zwischen den verschiedenen Themen hergestellt und Chancen für zukünftige Experimente frühzeitig herausgearbeitet. **Die adäquate Unterstützung theoretischer Arbeiten ist daher sowohl für Strategieentscheidungen, als auch für den Erfolg der Experimente essenziell.**

## Technologieentwicklung im Bereich Beschleuniger und Detektoren

Viele der behandelten Projekte sind mit der zurzeit verfügbaren Beschleuniger- und Detektortechnologie nicht realisierbar. Fast alle Projekte basieren daher darauf, dass Entwicklungsarbeiten in diesen Bereichen durchgeführt werden. Beispiele sind die Entwicklung von Hochfeldmagneten, Energy-Recovery Technik, der Plasma-Wake-Field Technologie und extrem schneller, strahlenharter und kostengünstiger Detektoren mit hoher Granularität. **Die Unterstützung von Entwicklungsarbeiten im Bereich der Beschleuniger- und Detektorphysik ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung und Durchführung der oben skizzierten Projekte.**

## Technologieentwicklung im Bereich Software und Computing

Die extremen Datenraten vieler neuer Projekte stellt sehr hohe Anforderungen an die Datenspeicherung und Verarbeitung und macht es notwendig sehr verschiedene verfügbare Computingressourcen zu nutzen. Diese Heterogenität der Computingressourcen stellt eine große Herausforderung für eine effiziente und performante Verarbeitung der Daten dar. **Es bedarf daher bereits jetzt erheblicher Entwicklungsarbeiten um die Computing-Konzepte weiter zu entwickeln. Auch die Weiterentwicklung und Optimierung der Software ist unerlässlich, um die künftigen Datenmengen verarbeiten zu können.**

## Wichtigkeit der großen Labore

Fast alle diskutierten Projekte erfordern eine existierende Infrastruktur, die normalerweise nur an Großforschungseinrichtungen vorhanden ist. Die zentralen Labore, welche die universitären Gruppen unterstützen und Infrastruktur zur Verfügung stellen, sind die Helmholtz-Zentren DESY (Hamburg und Zeuthen), KIT, GSI/FAIR, das Institut für Physik (München) und für Kernphysik (Heidelberg) der MPG und die europäischen Labore CERN (Genf) und das Untergrundlabor LNGS im Gran Sasso Massiv. **Die Teilnehmer sind sich darin einig, dass der langfristige Betrieb der genannten Labore essenziell für die entsprechenden Projekte ist.**



## Nachwuchsförderung

### Stellungnahme der Young High Energy Physicists Association - yHEP

Die Teilchenphysik steht vor einer Vielzahl von offenen Fragen, die auch künftige Generationen von Forschern faszinieren werden. Eine herausragende europäische Forschungslandschaft in der Hochenergiephysik, mit planbaren Karriereperspektiven für junge Wissenschaftler, ist unabdinglich, um die Attraktivität des Feldes zu erhalten und wissenschaftlichen Fortschritt sicherzustellen. Um den Verlust von zentralen Fachkompetenzen zu verhindern, müssen die Arbeitsbedingungen und Zukunftsaussichten von befristet beschäftigten Wissenschaftlern substantiell verbessert werden. Dies umfasst diskriminierungsfreie Entwicklungs- und Karrieremöglichkeiten für Postdoktoranden sowie ausreichend Zeit und Freiraum für exzellente Forschung neben anderweitigen Dienstverpflichtungen. Zusätzlich muss die Vereinbarkeit von Familie und Wissenschaftsbetrieb sichergestellt werden. Die Personalstrukturen müssen wesentlich stärker als bisher an die langfristigen Laufzeiten von Experimenten angepasst werden, um die Kontinuität von unentbehrlicher Expertise in Forschung und gemeinschaftlicher Forschungsinfrastruktur (Computing, Software, Detektoren) zu gewährleisten.

**Die Teilnehmer unterstützen die Forderungen des wissenschaftlichen Nachwuchses mit Nachdruck, damit auch zukünftig, trotz der sehr langen Zeitskalen vieler der oben genannten Projekte, exzellente Forschung an vorderster Front möglich sein wird.**