

KHuK-Empfehlungen zur bevorstehenden Strategiediskussion in Vorbereitung der ErUM-Pro-Ausschreibung "Teilchen" 2024-2027

Komitee für Hadronen- und Kernphysik (KHuK)

1. Februar 2023



Die Forschung im Bereich der Hadronen- und Kernphysik hat wesentlich zu unserem heutigen Wissen über die Struktur der Materie und die Entwicklung des Universums beigetragen. Dennoch sind wichtige Fragen ungeklärt:

- ↪ Wie genau erzeugt die Starke Kraft den Einschluss der Quarks und Gluonen?
- ↪ Wie entstehen die komplexen Strukturen der Hadronen und Kerne?
- ↪ Wie verhält sich Kernmaterie unter extremen Bedingungen?
- ↪ Wie genau entstehen die schweren Elemente im Universum und wo sind die Grenzen der Stabilität?
- ↪ Wie können fundamentale Symmetrien getestet werden? Gibt es Physik jenseits des Standardmodells?

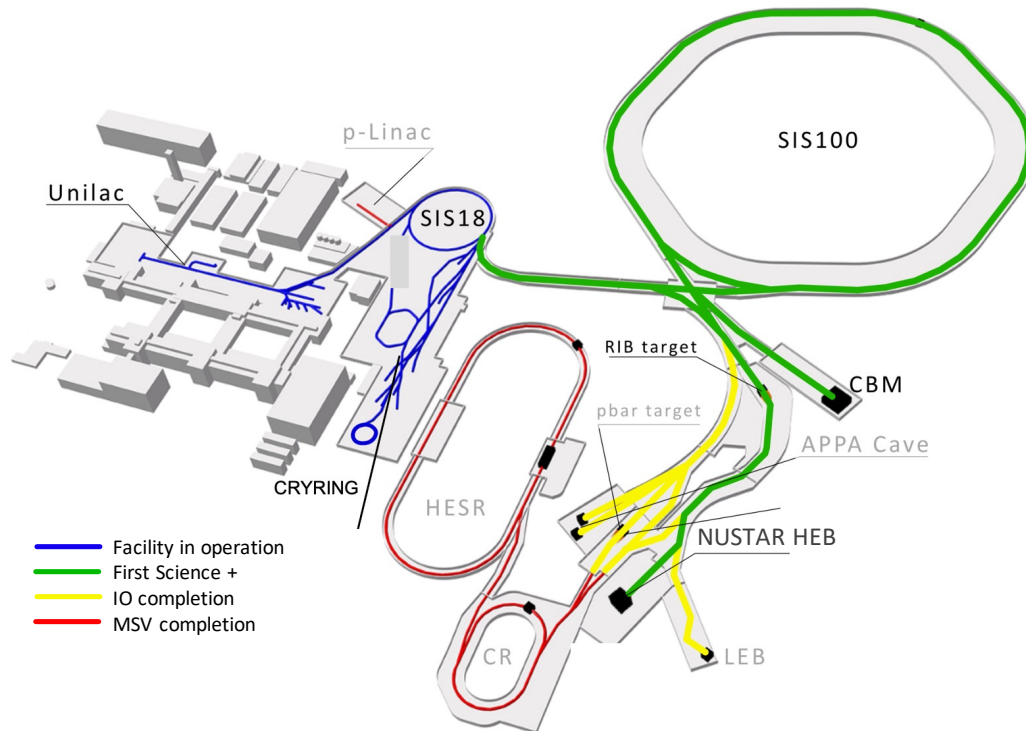
Die Beantwortung dieser grundlegenden Fragen – mit all ihren faszinierenden Auswirkungen auf unser Verständnis der Entwicklung des Universums, der Materie auf der Erde und in den Sternen – erfordert eine neue Generation von Beschleuniger- und Experimentieranlagen. Der theoretischen Kern- und Hadronenphysik kommt die wichtige Aufgabe zu, die wesentlichen Fragestellungen des Feldes zu erarbeiten sowie die Experimente zu begleiten und ihre Ergebnisse zu interpretieren. Eine entscheidende Voraussetzung für exzellente Forschung sind hochqualifizierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, deren Ausbildung und berufliche Perspektive gewährleistet sein muss.

Das vorliegende Dokument fasst die KHuK-Empfehlungen für die anstehende Strategiediskussion in Vorbereitung der ErUM-Pro-Ausschreibung "Teilchen" 2024-2027, und in Abstimmung mit den Realisierungsplänen der Großgeräte an GSI/FAIR und CERN, zusammen.

Allgemeine Empfehlungen

- ↪ Zügige Umsetzung der ausstehenden Investitionen bei FAIR zur Ermöglichung eines zeitnahen Starts des APPA, CBM, NUSTAR und PANDA Physikprogramms.
- ↪ Volle Ausschöpfung des wissenschaftlichen Potenzials und Weiterentwicklung der Experimente am CERN (ALICE am LHC, AMBER am SPS, COLLAPS, IDS, ISOLTRAP, MINIBALL, RILIS und PUMA am ISOLDE).

Die folgende Liste und der Layout definieren die verschiedenen Phasen in der Fertigstellung der FAIR Anlage:



FAIR Phase-0

Early Science

First Science

First Science+

Intermediate Objective (IO)

Modularized Start Version (MSV)

Zwischenzeitliches Spitzenforschungsprogramm bei GSI (aber auch andere Anlagen) mit verbesserten Strahlen und FAIR-Detektoren. Ca. 3 Monaten Strahlzeit pro Jahr bis zum Beginn von FAIR

SIS18 zu Super-Fragmentseparator (S-FRS) im High-Energy-Branch (HEB)

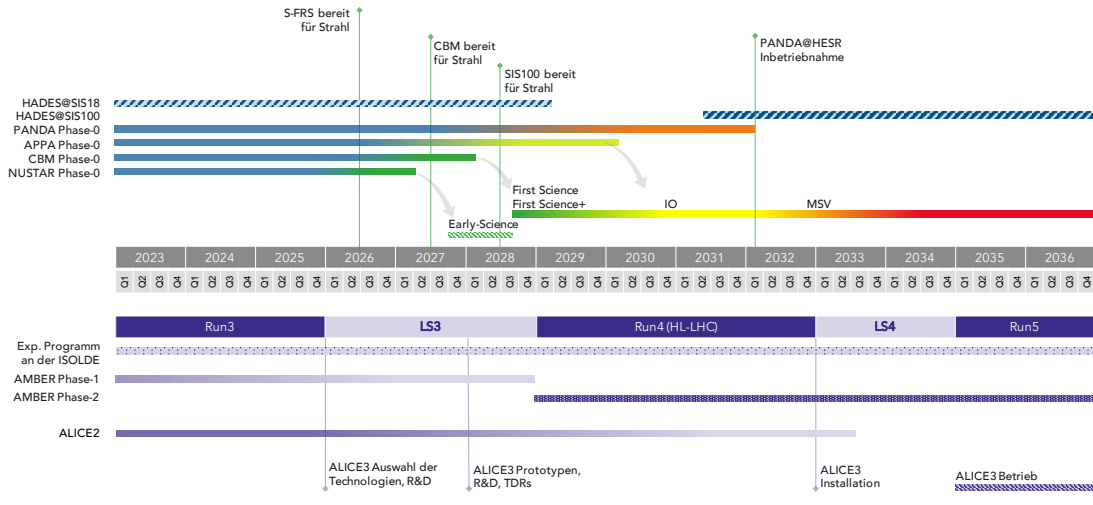
SIS100 zu S-FRS im HEB

SIS100 zu S-FRS im HEB und zu CBM

Der erste Abschnitt auf dem Weg zur MSV

IO + Collector Ring (CR), High Energy Storage Ring (HESR) und proton-LINAC (p-LINAC)

Vorläufiger Zeitplan für die Realisierung der FAIR-Anlage und deren Experimente sowie des KHuK-relevanten wissenschaftlichen Programms am CERN. Der Zeitplan für die Realisierung von FAIR wird durch die Verfügbarkeit von Mitteln bestimmt. Der Zeitplan könnte nach der Sitzung des Joint Scientific Council von GSI und FAIR im März 2023 aktualisiert werden.



1 Kernstruktur, nukleare Astrophysik

Das Ziel der Kernstrukturphysik ist das Verständnis des Aufbaus der Atomkerne und der Grenzen ihrer Existenz. Diese Fragen sind eng verwoben mit der nuklearen Astrophysik, die sich unter anderem mit den Prozessen befasst, bei denen die Elemente jenseits von Wasserstoff und Helium erzeugt wurden. Auch der Aufbau von Neutronensternen ist eng mit kernphysikalischen Fragestellungen verflochten, die beispielsweise in exotischen neutronenreichen Isotopen adressiert werden. Die experimentellen Untersuchungen in diesem Gebiet konzentrieren sich auf Experimente mit radioaktiven Strahlen bei GSI/FAIR und ISOLDE/CERN. Dazu werden eine Vielzahl komplementärer Detektionstechniken und experimenteller Aufbauten entwickelt und genutzt, an denen die in der Verbundforschung zusammenarbeitenden deutschen Gruppen wesentlich und international sichtbar beteiligt sind. Ziel der Experimente ist ein fundierteres Verständnis der starken Kernkraft und der Entstehung der Elemente. Die experimentbegleitende Theorie ist zum Erreichen dieses Ziels und zur Weiterentwicklung des experimentellen Programms unerlässlich.

Bei der GSI werden im Rahmen des **FAIR Phase-0** Strahlbetriebs exotische Ionenstrahlen hoher Energie über den Fragmentseparator **FRS** zur Verfügung gestellt. In diesen Experimenten setzt die NUSTAR Kollaboration die für FAIR entwickelten und bereits fertiggestellten Detektoren für einzigartige Experimente ein. Ziel in den nächsten Jahren ist die Weiterentwicklung und Fertigstellung der Detektorsysteme für die **FAIR NUSTAR Experimente**, die Durchführung und Datenauswertung von Experimenten inklusive der Aktivitäten zu superschweren Elementen am **UNILAC**, sowie die Vorbereitung des Umzugs und des Aufbaus an FAIR. Die beteiligten deutschen Gruppen sind im ErUM-Forschungsschwerpunkt T07 — "Aufbau von NUSTAR bei FAIR" zusammengeschlossen. Als erste Experimente sollen **R3B, HISPEC/DESPEC im High Energy Branch (HEB)**, sowie Aufbauten am **Super-FRS** an der FAIR Anlage in Betrieb gehen. Die HISPEC/DESPEC Kollaboration treibt die zügige Vervollständigung des europäischen **AGATA** Spektrometers aus europäischen Mitteln mit deutscher Beteiligung im Rahmen eines Memorandum of Understanding voran, damit dieses bereits während FAIR Phase-0 bei GSI eingesetzt werden kann.

Ionenstrahlen radioaktiver Isotope mit niedrigeren Energien werden mit entsprechend methodisch angepassten Detektoren an **ISOLDE** genutzt und liefern zu den GSI/FAIR Experimenten komplementäre Informationen zum Verständnis von Kernreaktionen und der Kernstruktur. Mit der Realisierung des **PUMA** Projektes werden hier auch gespeicherte kalte Anti-Protonen für derartige Untersuchungen zur Verfügung

stehen. In einem komplett neuartigen Ansatz sollen deren Reaktionen mit den von ISOLDE gelieferten radioaktiven Isotopen Aufschluss über die Nukleonverteilung an der Kernoberfläche geben. Messungen mit dem bei ISOLDE ab 2024 stationierten Teils dieses im Rahmen einer ERC-Förderung initiierten Experimentes sollen zukünftig ebenfalls über die Verbundforschung gefördert werden. Mit dem Ausbau zu **HIE-SOLDE** stehen seit 2015 nachbeschleunigte radioaktive Strahlen mit deutlich höheren Energien von bis zu 10 MeV/u zur Verfügung. Dies eröffnet neue experimentelle Möglichkeiten, die nun aufgrund der teilweise bereits abgeschlossenen Ertüchtigungen der Instrumentierung, insbesondere des mit starker deutscher Beteiligung betriebenen **MINIBALL-Spektrometers** und der Zusatzdetektoren wie **C-REX/T-REX**, wissenschaftlich voll genutzt werden können.

Für die am **FAIR Low-Energy Branch (LEB)** engagierten Arbeitsgruppen, die in der FAIR Phase-0 und durch die jetzt reduzierte Priorität des LEB bei FAIR keine adäquaten Forschungsmöglichkeiten an FAIR/GSI haben, sind die ISOLDE Aktivitäten eine unverzichtbare Option zur Weiterentwicklung der an FAIR geplanten Techniken, dem Gewinnen von Daten für die laufenden Doktorarbeiten und zum Erwerb der für die Durchführung und Analyse von Experimenten benötigten Expertise. Die hohe Sichtbarkeit der deutschen Arbeitsgruppen macht sie für die Gewinnung von Nachwuchswissenschaftlern attraktiv, die über diese auch gleichzeitig eine Anbindung an FAIR erhalten und damit dort langfristig mit ihrer Expertise zur Verfügung stehen werden.

Das experimentelle Programm zur Kernstruktur und nuklearen Astrophysik an FAIR und ISOLDE wird dabei durch die **Theorie** direkt unterstützt, um so eine umfassende Interpretation der erhaltenen Ergebnisse zu ermöglichen. Umgekehrt bilden die experimentellen Erkenntnisse die Grundlage für die Weiterentwicklung der Theorie und führen somit zu genaueren Extrapolationen und Vorhersagen in Gebieten der Nuklidkarte, die direkten Experimenten nicht zugänglich sind.

Die Förderung soll sich daher auf folgende Punkte konzentrieren:

- Unterstützung der Experimentvorbereitung, -durchführung und Datenanalyse von NUSTAR Experimenten im Rahmen von FAIR Phase-0.
- R&D für die Weiterentwicklung der für FAIR vorgesehenen Detektoren.
- Weiterführung des erfolgreichen wissenschaftlichen Programms an ISOLDE (COLLAPS, IDS, ISOLTRAP, MINIBALL, RILIS), sowie der Betrieb des hier stationierten Teils des Antiprotonenexperimentes PUMA.
- Förderung experimentbegleitender Theorie.

2 Schwerionenphysik

Ziel dieses Bereiches ist die Erforschung von Kernmaterie unter extremen Bedingungen von Temperatur und Dichte, wie sie im Universum Mikrosekunden nach dem Urknall oder im Innern von Neutronensternen vorherrschen. Das ALICE Experiment sowie das geplante Experiment ALICE 3 am CERN-LHC konzentrieren sich auf die Erforschung von QCD-Materie bei extrem hohen Energiedichten - das Quark-Gluon-Plasma. Die Untersuchung baryonenreicher Kernmaterie unter hohem Druck steht bei den HADES und CBM Experimenten am SIS18/SIS100 bei GSI/FAIR im Mittelpunkt. Insbesondere werden hier Hinweise auf einen Phasenübergang erster Ordnung, von der Hadronenphase hin zu einer neuartigen Form der QCD-Materie, sowie nach dem damit verbundenen kritischen Punkt der QCD gesucht. Das Experimentprogramm profitiert stark durch Theorie in Form von Modellrechnungen auf Basis von QCD-Phänomenologie. Diese stellen den Bezug zur fundamentalen Theorie wie Gitter-QCD, effektiver Feldtheorie und funktionalen Methoden her.

In der Förderperiode 2024-2027 wird der Schwerpunkt der Aktivitäten in der Schwerionenphysik auf (i) dem Betrieb und der Datenanalyse der laufenden Experimente ALICE und HADES, (ii) dem Aufbau und Inbetriebnahme des CBM Detektors an FAIR, sowie auf (iii) intensive F&E zur Verifizierung des ALICE 3 - Detektordesigns, wie im Letter-of-Intent dargelegt, liegen.

In **ALICE** sind die deutschen Gruppen für die Spurendriftkammer TPC, den Übergangsstrahlungsdetektor TRD sowie das Online-Computingsystem EPN zuständig. Die in den vergangenen Förderperioden unter substantieller deutscher Beteiligung auf- bzw. umgebauten Detektoren haben 2022 ihr Physikprogramm mit

p-p und Pb-Pb Kollisionen erfolgreich aufgenommen. Für die Förderperiode 2024-2027 werden dringend benötigt:

- Die Unterstützung des Detektorbetriebs, der Datenerfassung und der Analyse der experimentellen Daten von Run 3. Dies erfordert die Fortschreibung des gegenwärtigen Personalbestands, um das durch den Upgrade geschaffene wissenschaftliche Potenzial voll ausschöpfen zu können.
- Weiterentwicklung und ggf. Ausbau der innovativen GPU-basierten EPN computing farm zur synchronen und asynchronen Ereignisrekonstruktion.
- Die Gewährleistung der Verfügbarkeit von Betriebsmitteln für das ALICE-Experiment, wie in den MoUs vereinbart.

Das **HADES**-Experiment umfasst ebenso Aktivitäten der CBM-, PANDA- und NUSTAR-Kollaborationen im Rahmen von FAIR Phase-0. Während HADES mit SIS18 an seinem jetzigen Standort zunächst weiter betrieben wird, soll es nach der Inbetriebnahme des CBM Detektors in die CBM-Halle transferiert werden. Um auch in der Übergangsphase das Physikpotential für relativistische Schwerionenphysik und Hadronenphysik voll zu nutzen und den Nachwuchswissenschaftlern die Möglichkeit zur Promotion mit Daten zu ermöglichen, sprechen wir folgende Empfehlungen aus:

- Unterstützung der Experimentvorbereitung und -durchführung und der Datenanalyse von Experimenten mit schweren Ionen sowie mit proton- und pion-induzierten Reaktionen. Zwei Experimentvorschläge wurden im Jahr 2022 genehmigt; dafür sollen Strahlzeiten in 2024 und 2025 eingeplant werden.
- Das Experimentierprogramm wird von (moderaten) Ertüchtigungen profitieren, wie z.B. der Aufrüstung der MDC-Ebene II und der Realisierung eines LGAD-basierten Startzeitdetektors die durch Mittel aus der Verbundforschung unterstützt werden sollen.

Nach dem "First Science+"-Szenario soll das **CBM**-Experiment im Jahr 2027 in Betrieb genommen werden, d. h. ca. ein Jahr vor der geplanten Inbetriebnahme des SIS100. Deutsche Universitätsgruppen haben eine führende Rolle in der Konstruktion und dem Betrieb von wesentlichen Detektorsystemen von CBM (STS, MVD, RICH, TRD, TOF). Die Förderperiode 2024-2027 ist daher essentiell für die erfolgreiche Realisierung des CBM-Projekts. Um die Attraktivität für Nachwuchswissenschaftler und Wettbewerbsfähigkeit für FAIR zu erhalten, soll die Realisierung des CBM Experimentes durch gleichzeitige Beteiligung an Experimenten im Rahmen von FAIR Phase-0 erfolgen. Die Förderung soll sich daher auf folgende Punkte konzentrieren:

- Bau und Inbetriebnahme des CBM-Detektors bei FAIR im Umfang der Startversion und Herstellung der Betriebsbereitschaft in 2027. Dies erfordert neben der Bereitstellung der im Rahmen des Construction-MoU vereinbarten Investmitteln die Gewährung der verbliebenen *Core Invest* Mittel unter Berücksichtigung unvorhergesehener Preissteigerungen sowie entsprechende Mittel für Personal.
- Fortführung der FAIR-Phase-0-Aktivitäten von CBM (mCBM und HADES, eTOF im STAR-Experiment). Die hier gesammelte Erfahrung im Betrieb von Detektoren und Datenaufnahme ist unverzichtbar für eine zügige Inbetriebnahme von CBM. Die Phase-0-Aktivitäten gehen in der Förderperiode fließend in den Aufbau von CBM über und enden vor dessen Inbetriebnahme.

Das wissenschaftliche Potenzial des LHC-Schwerionenprogramms wird nach dem Ende von Run 4 nicht erschöpft sein. Daher sollen mit einem Schwerionenexperiment der nächsten Generation - dem ALICE 3 Experiment - offene fundamentale Fragen im QCD-Sektor mit erheblich gesteigerter Sensitivität bearbeitet werden. Entsprechende Präzisionsmessungen, insbesondere hinsichtlich Multi-Charm- und Dielektronenproduktion sowie zur Klärung des Hadronisierungsmechanismus wurden im März 2022 in einem Letter of Intent (CERN-LHCC-2022-009), gemeinsam mit einem geeigneten Detektorkonzept, detailliert dargestellt und vom LHCC positiv bewertet. Dringend erforderlich ist deshalb die

- Unterstützung eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms für ALICE 3, um eine führende Beteiligung der deutschen Gruppen an ALICE 3 zu gewährleisten. Dieses FuE Programm ist fokussiert auf die Entwicklung großflächiger CMOS Pixeldetektoren. Es soll in Synergie mit möglichen Upgrade-Initiativen für Experimente bei LHC und FAIR erfolgen.

3 Fundamentale Wechselwirkungen

Zahlreiche Aktivitäten deutscher Gruppen im Bereich "Fundamentale Wechselwirkungen" werden in ErUM unter dem Thema "Universum" im Bereich der Astroteilchenphysik gefördert. Im KHuK-relevanten Bereich umfasst dieser Punkt im wesentlichen Experimente im Bereich der Atom- und Plasmaphysik an FAIR (APPA) sowie Niederenergieexperimente am CERN (ISOLTRAP, COLLAPS), die hochpräzise atomphysikalische Techniken verwenden, um zentrale Parameter des Standardmodells zu messen und dessen Grundlagen zu testen.

APPA studiert die Bausteine und Phänomene atomarer Materie unter extremen Bedingungen. Hierzu zählen insbesondere hohe Dichten und Temperaturen sowie starke elektrische und magnetische Felder wie sie beispielsweise in Sternen und schweren Planeten vorliegen. Dabei werden vorwiegend schwere hochgeladene Ionen und hochintensive Laserstrahlen eingesetzt.

Die beteiligten deutschen Universitätsgruppen der Atomphysik und der Plasmaphysik bilden den ErUM-Forschungsschwerpunkt T05 — "Aufbau von APPA bei FAIR"¹.

In der Förderperiode 2024–2027 wird APPA vordringlich die FAIR-Experimentiereinrichtungen nutzen, die bereits in der FAIR Phase-0 zur Verfügung stehen und damit zusammenhängende FAIR-relevante R&D-Aktivitäten betreiben. Für **SPARC** (Atom-, Quanten- und Fundamentale Physik) sind dies die Fallen- und Speicherringanlagen **HITRAP**, **CRYRING**, **ESR** und **SIS100**, die auch Bestandteil der MSV von FAIR sind. **HED@FAIR** (Plasmaphysik) wird sich hingegen im Wesentlichen auf die Nutzung der Strahlplätze **Z6 (UNILAC)** und **HHT (SIS18)** sowie des Hochleistungslasers **PHELIX** für Experimente konzentrieren. Die APPA-Aktivitäten umfassen auch experimentbegleitende **Theorie**, beispielsweise zur Quantenelektrodynamik in starken Feldern, die für die Einordnung, Interpretation und Publikation der experimentellen Resultate unverzichtbar sind. Das geplante Experimentierprogramm an den oben genannten Anlagen soll unter Einsatz der bereits vorhandenen FAIR-Instrumentierung ein international hoch sichtbares und zum großen Teil einmaliges Forschungsprogramm erschließen und zudem dabei helfen, die Zeit bis zur Inbetriebnahme des APPA-Caves wie auch des HESRs zu überbrücken.

Dringend erforderlich ist dazu:

- Unterstützung der Experimentvorbereitung, -durchführung und Datenanalyse von SPARC und HED@FAIR Experimenten in der FAIR Phase-0. Die bereits vom G-PAC akzeptierten Experimente sollen nach gegenwärtiger Planung in 2024/2025 und damit zum Teil in der kommenden Förderperiode durchgeführt werden. Für die darauffolgenden Jahre wird ein neuer G-PAC Aufruf erfolgen.
- Die Förderung experimentbegleitender Theorie.
- Förderung neuer Konzepte und Technologien zur Manipulation gespeicherter Ionen (Speicherringe und Fallen), um das Potential der aktuellen FAIR-Anlagen bezüglich Präzisionsexperimente zu erweitern und auch perspektivisch optimal auszunutzen (z.B. Überprüfung des Standardmodells).
- Der Endausbau der APPA-Experimente mit den noch zur Verfügung stehenden Core-Invest-Mitteln bei Priorisierung der "First Science" Aktivitäten.

4 Hadronische und elektromagnetische Sonden

Das Ziel der Hadronenphysik mit hadronischen und elektromagnetischen Sonden ist die Erforschung der inneren Struktur sowie des Anregungsspektrums von gebundenen Zuständen aus Quarks und Gluonen. Bei **AMBER (NA66)** steht im Zeitraum 2024 – 2027 die präzise Messung des Proton-Formfaktors mit hochenergetischen Myonen, Messungen zu Pion-Partonverteilungsfunktionen (PDFs) und zur Antiproton-Produktion in p-He Kollisionen sowie Vorbereitungen zur Spektroskopie von Hadronen mit seltsamen Quarks im Vordergrund. Bei PANDA soll durch den Einsatz von existierenden Dektorkomponenten in laufenden Experimenten ein **PANDA FAIR Phase-0** durchgeführt werden, das trotz der Verzögerungen bei FAIR den Erhalt von langjährig aufgebauter Kompetenz sichern und gleichzeitig Beiträge zu wichtigen Physikthemen

¹Neben der Atomphysik und der Plasmaphysik operieren auch die Materialwissenschaften (MAT) und die Biophysik (BIO) unter dem Dach von APPA. Die zu MAT gehörigen deutschen Universitätsgruppen werden im Rahmen des ErUM-Programms im Feld "Materie" gefördert. BIO-Aktivitäten wurden bisher nicht im Rahmen von ErUM gefördert.

liefern soll. So soll die Spektroskopie von Hadronen mit seltsamen Quarks in mehreren komplementären Experimenten als wichtiges Bindeglied zwischen leichten und schweren Quarks untersucht werden.

AMBER (NA66) ist ein kürzlich genehmigtes Fixed-Target-Experiment am M2-Strahl des CERN SPS, das weltweit einzigartige Messungen im Bereich der Hadronenstruktur und -spektroskopie durchführen wird. Als Nachfolger des erfolgreichen COMPASS-Experiments benutzt es dafür einen Großteil des existierenden Magnetspektrometers, verbessert durch Upgrades und ergänzt durch neue Detektorkomponenten, um den Anforderungen des neuen Physikprogramms gerecht zu werden. Das Physikprogramm von AMBER geht dabei wesentlich über das bisherige COMPASS-Programm hinaus und ist in zwei Phasen aufgeteilt. Phase 1 wurde im Dezember 2020 von den CERN-Gremien genehmigt und umfasst drei physikalische Fragestellungen: (i) die Messung des Produktionswirkungsquerschnitts von Antiprotonen an Helium über einen weiten Energiebereich; (ii) die präzise Messung des Proton-Formfaktors bei kleinen Impulsüberträgen mit einem hochenergetischen Myonenstrahl; (iii) die Bestimmung der Pion- und Kaon-PDFs durch Drell-Yan- und Charmonium-Produktionsmessungen mit negativen und positiven Mesonenstrahlen. Die Messungen zu Phase 1 beginnen im Jahr 2023 und erstrecken sich über einen Zeitraum von ca. 5 Jahren. Phase 2 wird sich auf Messungen mit einem intensiven Kaonstrahl fokussieren. Dazu gehören Messungen zur Spektroskopie von seltsamen Mesonen, Messungen zur Quark- und Gluonstruktur von Kaonen über Kaon-induzierte Produktion von prompten Photonen, die Bestimmung von Niederenergie-Parametern des Kaons in ultra-weichen Kollisionen mit Kernen, sowie die Messung von Meson-Ladungsradien in inverser Kinetik.

Die Beiträge der deutschen Gruppen zu AMBER erstrecken sich schwerpunktmäßig über die bereits im Rahmen von COMPASS nachgewiesenen Kompetenzen. Das KHuK empfiehlt, AMBER als Nachfolgeexperiment von COMPASS in die BMBF-Förderung aufzunehmen. Die Förderung sollte sich auf folgende Punkte konzentrieren:

- Spurrekonstruktion mit szintillierenden Fasern und mikrostrukturierten Gasedektoren,
- Umstellung auf eine triggerlose, ereignisgetriebene Datenerfassung,
- die Entwicklung von High-Level-Triggering Algorithmen.

Dafür wurden in den vergangenen Jahren wesentliche Vorarbeiten im Wesentlichen aus Eigenmitteln der beteiligten Gruppen und anderen Drittmittelprojekten (z.B. EU STRONG-2020) geleistet. Zu mehreren der verfolgten physikalischen Fragestellungen werden die Grundlagen von deutschen Theorie-Gruppen beigetragen, und die Auswertung und Interpretation der Daten ist in Zusammenarbeit mit diesen Gruppen vorgesehen.

Der Umfang der beantragten Mittel wird in etwa der bisherigen COMPASS-Finanzierung entsprechen. Für COMPASS werden keine separaten Anträge gestellt werden.

Die deutschen PANDA-Gruppen in der VF planen, neben der Weiterentwicklung, dem Aufbau, der Inbetriebnahme, dem Test und der Kalibration der PANDA-Detektoren, ein FAIR Phase-0-Programm in der Hadronenphysik. Dieses Programm lehnt sich unter Einbeziehung bereits existierender Detektoren an Thematiken des PANDA-Portfolios an. Es erlaubt die Nutzung und Weiterentwicklung der Detektorexpertise sowie die Aus- und Weiterbildung junger Nachwuchswissenschaftler auf den Gebieten der Hadronenspektroskopie und -struktur. Dies stellt eine frühzeitige Vorbereitung auf PANDA-Messungen schon in den nächsten Jahren sicher. Angedacht sind hierbei Baryonenspektroskopie-Experimente gemeinsam mit der HADES-Kollaboration am Pionenstrahl der GSI. Hier kommen PANDA-Trackingdetektoren (an HADES) zum Einsatz. Strukturmessungen an Hadronen, als weitere wichtige Säule des PANDA-Programms, wurden im Rahmen der PANDA FAIR Phase-0 in der letzten Förderperiode gemeinsam mit MAMI-Gruppen vorbereitet und können in der kommenden Periode durchgeführt werden. Bei MAMI besteht weiterhin die exzellente Möglichkeit, die Technologien, die für den PANDA-Luminositätsdetektor sowie das PANDA-Gasjettarget entwickelt wurden, in einem hochintensiven Elektronenstrahl zu testen und weiter zu entwickeln. Angedacht ist zudem die Inbetriebnahme, der Test und die Kalibration der Vorwärtssendkappe unter realistischen Strahlbedingungen an ELSA.

Diese Messungen dienen der Weiterentwicklung bestehender PANDA-Systeme wie der DAQ oder der Detektorauslese, sowie der Schärfung der Physikanalyse unter Einbeziehung von neuen theoretischen Erkenntnissen. Letztere sollen durch die Unterstützung experimentnaher theoretischer Projekte mit QCD-

Methoden (Gitter-QCD, effektive Theorien, funktionale Methoden) gewährleistet werden. Zudem versteht die PANDA-Kollaboration die durch die Verzögerung an FAIR gewonnene Zeit als positive Herausforderung, um ihre wissenschaftlichen Ziele mit neueren Technologien und Methoden für Detektoren effizienter und kostengünstiger zu erreichen. Die Kollaboration plant daher sowohl ein intensives Test-, Forschungs- und Entwicklungsprogramm für Detektoren und Software (AI, ML) als auch die Errichtung eines experimentellen Aufbaus an der GSI, sobald es an der GSI einen entsprechenden Experimentierplatz mit geeigneten Hadronenstrahlen gibt. Dort werden sukzessive alle PANDA-Komponenten zentral zusammengeführt. Von Deutschland geförderte Detektoren: Tracking Detektoren (Straws und Halbleiter), elektromagnetische Kalorimeter (PWO-Kalorimeter), DIRC, Targets.

Die Förderung sollte sich auf folgende Punkte konzentrieren:

- Nutzung von Spurkammer-Detektoren mit HADES an der GSI/FAIR.
- Einsatz der rückwärtigen Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters am MAMI.
- Inbetriebnahme, Test und Kalibration der Vorwärtsendkappe an ELSA.
- Fortentwicklung der PANDA Software auch in enger Zusammenarbeit mit Theoretikern.
- Beginn des Aufbaus von PANDA an GSI/FAIR.

5 Querschnittsthemen

5.1 F&E-Detektoren

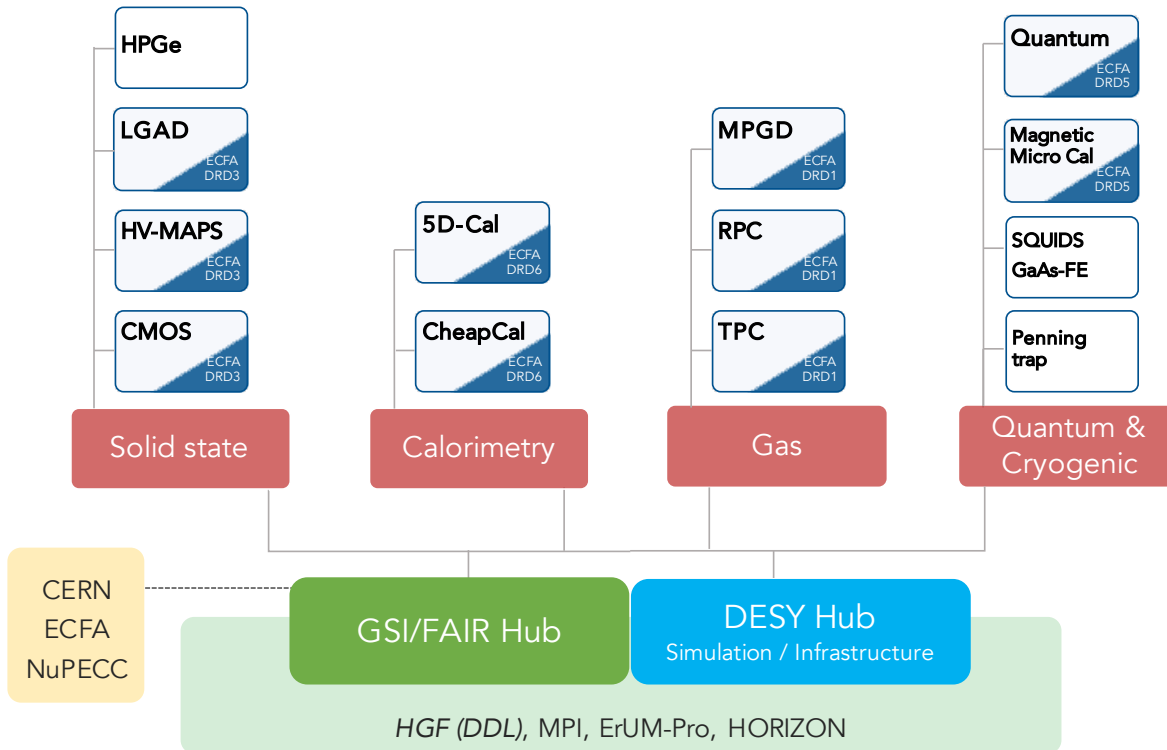
Die Entwicklung von Detektortechnologien für zukünftige Experimente an Großforschungsanlagen ist eine zentrale Voraussetzung für die optimale Nutzung existierender und neuer Infrastrukturen und damit für den langfristigen Fortschritt auf dem Gebiet der kleinsten Teilchen. Hierfür werden Ressourcen jenseits derer für den Bau und Betrieb der Detektoren der laufenden Experimente benötigt. Gemeinsam mit KET und KAT werden über einzelne Experimentkollaborationen hinausgehende strategische Entwicklungen identifiziert und entsprechende Verbünde etabliert. Die europäische Teilchenphysik organisiert ihre strategischen Detektorentwicklungen im Rahmen der ECFA Detector R&D Roadmap² in sog. Detector Research & Development (DRD) Kollaborationen, die am CERN angesiedelt sind. Für die Kern- und Hadronenphysik werden prioritäre Projekte im Rahmen des anstehenden NuPECC Long Range Plan³ identifiziert. Dabei wird es bei einigen Technologien großen Überlapp zwischen den Communities geben, einige werden stärker in dem einen oder anderen Feld verankert sein. Für die neuen Verbünde im Rahmen des Querschnittsthemas Detektoren von ErUM-Pro sollte es keine Rolle spielen, ob die Mitglieder der Verbünde in DRDs organisiert sind oder nicht. Das GSI Detektorlabor (wie auch das Detektorlabor des DESY für die Teilchenphysik) sollte als zentraler Hub für Entwicklungen der KHuK Community etabliert werden. Dies garantiert eine starke deutsche Vernetzung der Aktivitäten auch über das HGF Distributed Detector Laboratory (DDL).

Gegenwärtig sind Verbünde zu folgenden wichtigen F&E-Entwicklungen aus dem Bereich KHuK geplant:

- Schwerionenexperimente stellen hohe Ansprüche an die Ortsauflösung und erfordern gleichzeitig ein geringes Materialbudget ihrer Siliziumdetektoren. Hierdurch sind sie Technologietreiber für **monolithische CMOS Pixel Sensoren (CPS)**. Deren Tauglichkeit für Großexperimente wurde zunächst mit dem STAR-HFT und dem ALICE-ITS2 demonstriert. Aus diesen Gründen werden sie auch für die Teilchenphysik favorisiert. Gemeinsame Entwicklungsziele sind die Verbesserung der Zeitauflösung und die Reduktion der Leistungsaufnahme der CPS. Durch Stitching sollen flexible, wafergroße Sensoren für besonders leichte Vertexdetektoren entstehen. Kosteneffiziente, konventionellere Integrationslösungen sollen den Bau von mehrere 10 m² großen, ultraleichten Spurdetektoren ermöglichen und kleinen Kollaborationen Zugang zu einer standardisierten Version der anspruchsvollen Technik geben. Ein entsprechendes White Paper wurde bei NuPECC eingereicht (ALICE, CBM, NUSTAR, PANDA).

²<https://indico.cern.ch/event/957057/>

³<https://indico.ph.tum.de/event/7050/>



- Silizium-Sensoren mit höchster Zeitpräzision auf Basis der **LGAD-Technologien** haben ein hohes Anwendungspotenzial in zukünftigen Kernphysikexperimenten. Bereits jetzt werden sie als strahlensensitive Startzeitdetektoren im Primärstrahl (Protonen) platziert. Auch hierfür wurde ein White Paper bei NuPECC eingereicht (ALICE, CBM, NUSTAR, PANDA).
- Die Technologie **hochauflösender Gammaskpektrometer** auf der Basis segmentierter Germanium-Kristalle und ihrer Signalverarbeitung wird vorangetrieben. Sie ermöglicht das Gamma-Ray-Tracking im europäischen Gammaskpektrometer AGATA, das seinerseits der Hauptdetektor für das HISPEC Experiment an FAIR sein wird. Verbesserungen für die Orts- und Energieauflösung der Wechselwirkungspunkte der Gammastrahlung im Detektor durch verbesserte Elektronik und Analysealgorithmen erhöhen die Sensitivität und Effizienz der Experimente.
- Weiterentwicklungen im Bereich **kryogener, metallischer Mikrokalorimeter** sind für die Sicherstellung der Zukunftsfähigkeit der APPA-Experimente unerlässlich und bieten darüber hinaus ein breites Anwendungsspektrum für viele Forschungsgebiete. Neben der auch weiterhin erforderlichen Systementwicklung in Richtung hochgranularer Pixelsensoren (ca. 1000 Pixel) und der Pixelauslese auf Basis supraleitender Elektronik (z.B. Multiplexer) ist die Kryostat-Optimierung wie auch die Integration in heterogene Detektorumgebungen von besonderer Relevanz.
- **Mikrostrukturierte gasbasierte Detektoren:** für die Rekonstruktion geladener Teilchenspuren in Experimenten mit festem Target (AMBER, CBM, HADES, PANDA, etc.), aber auch für zukünftige Collider-Experimente sind sog. Micropattern Gaseous Detectors (MPGD) von großer Bedeutung. Die am weitesten verbreiteten Technologien sind GEMs und Micromegas, jedoch werden auch weiterhin neue, vielversprechende Strukturen entwickelt, wie z.B. μ RWELL. Im Vordergrund der Entwicklungen stehen die weitere Reduktion der Materialbelegung, die Verwendung nachhaltiger Gasmischungen, die Verbesserung der Zeitauflösung, sowie multi-dimensionale Messungen von Ort, Energie, Zeit, etc.
- Die hochempfindlichen **supraleitenden Detektoren**, die fuer gewöhnlich als nicht-destruktive Einzelteilchen-Nachweise in **Penningfallen** Experimenten verwendet werden, erweisen sich als empfindliche

resonante Antennen um stringente Limits an Axion/Photon Konversion via inversem Primakoff-Effekt zu setzen. Im Rahmen eines Kollaborationsprojektes ist die Weiterentwicklung vielversprechender Prototypen mit hoher Frequenzbandbreite, verbesserter Detektionsempfindlichkeit, geringerem Detektorrauschen, und maximiertem Empfindlichkeitsvolumen geplant. Die Entwicklung dieser Detektoren und nachherige Implementierung in Penningfallen-Experimenten hat Potential, die Frequenzauflösung in Experimenten mit einzelnen gespeicherten Ionen signifikant zu steigern.

5.2 F&E-Computing

Neben der experimentspezifischen Förderung im Bereich Computing können die laufenden und im Bau befindlichen Experimente zusätzlich stark von experimentübergreifenden Entwicklungen profitieren. Um den Betrieb der Experimente im Rahmen der geplanten Forschungsvorhaben zu gewährleisten ist eine gezielte Förderung der folgenden Forschungsmaßnahmen in diesem Gebiet erforderlich:

- Online Event-Selektion: Schnelle Datenprozessierung und -selektion, um die großen Datenmengen der neuen Detektoren zielgerichtet verarbeiten und reduzieren zu können. Dazu werden neben optimierten Algorithmen auch dedizierte Hardwarekomponenten benötigt: z.B. FPGAs und GPUs. Hier ist weitere Entwicklungsarbeit notwendig, um Algorithmen einfach auf die entsprechende Hardware zu portieren und diese dafür zu optimieren.
- Einsatz von KI: KI-gestützte Algorithmen können in vielen Bereichen zur Verarbeitung der Experimentdaten eingesetzt werden und dabei die Leistung von klassischen Algorithmen übertreffen. Einige Beispiele sind der Einsatz nahe am Detektor zur schnellen online Prozessierung der Rohdaten auf den oben genannten dedizierten Hardwarekomponenten, zur Experimentüberwachung um fehlerhafte Detektorkomponenten schnell identifizieren zu können, zur Detektorkalibrierung, zur Rekonstruktion der physikalischen Ereignisse, zur Datenanalyse um Muster der zu untersuchenden Physik in den Daten zu erkennen sowie zur schnellen Simulation der Detektoren.
- Schneller Zugriff auf gespeicherte Daten: Moderne Detektorsysteme produzieren mit mehr als einem Petabyte pro Jahr riesige Datenmengen, auf die schnell und einfach zugegriffen werden muss. Dazu wird neben den entsprechenden Methoden auch die Infrastruktur benötigt.

5.3 F&E-Beschleuniger

Generische Entwicklungen im Bereich Beschleunigertechnologien stehen zudem im Fokus des Interesses von KHuK.

- Supraleitende Dauerstrich-Teilchenbeschleuniger für Elektronen (MAMI, MESA/Univ. Mainz) bzw. Protonen (PSI/Schweiz) und Schwerionen (FRIB/U.S.A., SPIRAL/Frankreich, HELIAC/GSI) sind mittlerweile weltweit Gegenstand generischer Beschleunigerentwicklung. Diese Entwicklung von Schlüsseltechnologien sollte weiter vorangetrieben werden, beispielsweise mit der Entwicklung von geeigneten Hochleistungs-Radio Frequenz Quadrupol-Beschleunigern und supraleitenden Hochfrequenzkavitäten, wie auch der notwendigen Verfahren zur Präparation und Optimierung der Kavitäten. Dazu stehen an den Universitäten in Mainz und Frankfurt bzw. an der GSI in Darmstadt Infrastruktureinrichtungen, wie Reinräume, Hochleistungs-Testplätze und ein eigenständiges Strahlexperiment-Cave für Kryomodul-Tests zur Verfügung.
- Für die Entwicklungen zukünftiger Leptonen- und Hadronenanlagen sind weiterführende F&E Arbeiten im Bereich der Laser-Plasmabeschleunigung von wesentlicher Bedeutung.
- F&E im Bereich der Strahldiagnostik ist von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit großer Beschleunigeranlagen. Als Beispiele nennen wir Rekonstruktionsmethoden auf der Basis fortschrittlicher Algorithmen bzw. KI, die Entwicklung breitbandiger Systeme im Multi-GHz Bereich, oder extrem empfindliche Systeme wie kryogene Strom-Komparatoren, deren Verfügbarkeit und Weiterentwicklung im Hinblick auf ihre weiträumige Anwendung an FAIR sichergestellt werden sollte.

6 Weitere Empfehlungen

- Bereitstellung der zugesagten Mittel für die anteilige Beschaffung der gemeinsamen Experiment-Infrastrukturen (Common Fund) wie sie in den Construction-MoUs vereinbart sind.
- Weitere Unterstützung der durch KHuK koordinierten Outreach-Aktivitäten sowie der Outreach-Aktivitäten am LHC. In Rahmen der ErUM-FSPs werde die Koordinierung der verschiedenen Aspekte der Gesellschaftlichen Relevanz wird durch das LHC-ErUM-FSP-Büro organisiert. Um die Öffentlichkeitsarbeit zu professionalisieren und zu konsolidieren, soll in enger Zusammenarbeit zwischen den vier FSP (APPA, CBM, NUSTAR und PANDA) und GSI/FAIR ein Joint Outreach Office (JOO) etabliert werden. Hierzu soll eine Stelle durch die Verbundforschung finanziert werden, die von GSI durch eine zweite Stelle ergänzt wird.
- Uneingeschränkte Unterstützung des ECT*. In Anbetracht der langjährigen Erfolge und der hohen internationalen Sichtbarkeit von ECT* muss der nachhaltige Betrieb dieses international weit sichtbaren Zentrums sichergestellt werden. Wir empfehlen die kontinuierliche Förderung von ECT* mindestens in Höhe der im bisherigen Memorandum for Understanding vereinbarten Summe. Die Unterstützung für dieses einzigartige europäische Zentrum an der Spitze der Forschung in der theoretischen Kernphysik, welches Theorie und Experiment zusammenbringt, interdisziplinäre Verbindungen herstellt und eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung der nächsten Generation von Wissenschaftlern in einem breiten Spektrum von Forschungsgebieten spielt, sollte höchste Priorität haben.