

Antrag für das Portfoliothema

***„Detector Technology and Systems Platform“***

***Plattform für Detektortechnologie und -systeme***

**Beteiligte Helmholtz-Zentren und -Institute:**

Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

Forschungszentrum Jülich (FZJ)

GSI Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung (GSI)

Helmholtz-Institut Jena (HIJ)

Helmholtz-Institut Mainz (HIM)

Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR)

Helmholtz-Zentrum Geesthacht Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Koordinierender Sprecher: Prof. Dr. Marc Weber (KIT)

### **Beantragende Helmholtz-Zentren und -Institute:**

DESY – Prof. Helmut Dosch, Notkestraße 85, 22607 Hamburg  
FZJ – Prof. Sebastian M. Schmidt, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich  
GSI – Prof. Horst Stöcker, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt  
HIJ – Prof. Thomas Stöhlker, Helmholtzweg 4, 07743 Jena  
HIM – Prof. Frank Maas, Johann-Joachim-Becher-Weg 45, 55128 Mainz  
HZB – Prof. Anke Kaysser-Pyzalla, Hahn-Meitner-Platz 1, 14109 Berlin  
HZDR – Prof. Roland Sauerbrey, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden  
HZG – Prof. Wolfgang Kaysser, Max-Planck-Straße 1, 21502 Geesthacht  
KIT – Prof. Eberhard Umbach, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

### **Assoziierte Forschungszentren:**

Fermilab, Batavia, Illinois (USA)  
Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (Frankreich)  
Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien, Strasbourg  
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay  
Max-Planck-Institut für Physik, München  
Paul Scherrer Institut, Villigen (Schweiz)  
Science and Technology Facilities Council, STFC Technology, RAL, Harwell Oxford (UK)

### **Zum Zeitpunkt der Antragsstellung beteiligte Universitätsgruppen:**

AGH-UST Universität Krakau, Prof. Wladyslaw Dabrowski (Polen)  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Dr. Michael Fiederle  
RWTH Aachen, Prof. Thomas Hebbeker  
Technische Universität Dresden, Prof. Arno Straessner  
Universitätsklinikum Carl Gustav Carus, Dresden, Prof. Wolfgang Enghardt  
Universität Augsburg, Dr. Matthias Schreck  
Universität Bonn, Prof. Klaus Desch  
INFN Florenz, Prof. Giuliano Parrini (Italien)  
Universität Hamburg, Prof. Peter Schleper  
Universität Heidelberg, Prof. Peter Fischer, Dr. Johannes Schemmel  
Universität Wuppertal, Prof. Christian Zeitnitz

### **Zuordnung des Portfoliothemas:**

Der Schwerpunkt des Themas liegt im Forschungsbereich „Struktur der Materie“.  
Das Thema hat Bezug zu allen Forschungsbereichen der Helmholtz-Gemeinschaft, insbesondere zu „Gesundheit“, „Schlüsseltechnologien“, „Erde und Umwelt“ und „Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr“.

**Antragszeitraum: 2012-2016**

## Zusammenfassung

Die grundlegenden Objekte und Phänomene der Natur sind mit den menschlichen Sinnen nicht oder nur sehr begrenzt beobachtbar. Dies gilt insbesondere für die Beobachtung der extremen Längen-, Zeit- und Energieskalen im Forschungsbereich „Struktur der Materie“. Detektoren sind die „Augen“, mit denen es der Wissenschaft möglich ist, neue Effekte zu beobachten, in neue Bereiche vorzustoßen und dadurch neue Erkenntnisse zu gewinnen.

Der Nutzen hochempfindlicher Detektoren für geladene Teilchen, Neutronen und Photonen ist dabei nicht auf die Grundlagenforschung oder die Erforschung der Struktur der Materie beschränkt: Detektoren aller Art sind auch in der angewandten Forschung, in der Industrie, in der Medizin sowie in kommerziellen Anwendungen weit verbreitet und unersetzlich. Die Vielfalt der Anwendungsgebiete spiegelt sich in der Vielfalt der benötigten Instrumente und Detektorkonzepte wieder. Detektoren können so groß sein wie Mehrfamilienhäuser, um die Reaktionen von Elementarteilchen am Large Hadron Collider (LHC) am CERN zu untersuchen, oder mikroskopisch klein, um nicht-invasive medizinische Untersuchungen zu ermöglichen.

Die Detektoren der Zukunft gehen in ihren Anforderungen bezüglich der Auflösung, der Zahl der elektronischen Kanäle (10 bis 1000 Millionen), der Integrationsdichte, den produzierten Datenraten und der zulässigen Verlustleistung weit über das heute Mögliche hinaus. Diese für die Wissenschaft und für breite Bereiche der Gesellschaft entscheidenden Instrumente können nur unter Einsatz und gezielter Entwicklung modernster Technologien verwirklicht werden. Eine Schlüsselrolle spielen dabei voraussichtlich die 3D-Integration von integrierten Schaltkreisen und Detektormodulen sowie der Übergang von rein elektrischen zu integrierten elektro-optischen Baugruppen.

Die **Plattform für Detektortechnologie und -systeme** ist eine Initiative der Zentren und Institute des Forschungsbereichs „Struktur der Materie“. Sie nutzt die großen Gemeinsamkeiten in den technologischen Anforderungen der beteiligten Programme und das sehr große Interesse aller Partner an einer programmübergreifenden synergetischen Zusammenarbeit. Das Ziel des Verbundes ist es, nicht nur den Programmen des Fachbereiches selbst, sondern darüber hinaus auch der Helmholtz-Gemeinschaft als Ganzes den Zugang zu modernsten Detektortechnologien und den auf ihnen basierenden Detektoren zu gewährleisten und eine herausragende internationale Sichtbarkeit zu erzielen. Die Initiative wird verstärkt durch in der Detektortechnologie und -instrumentierung führende internationale Partnerinstitutionen und das Max-Planck-Institut für Physik.

Die Universitäten tragen wesentlich zur Innovationskraft des Gebietes Detektortechnologie und -instrumentierung bei und bilden den wissenschaftlichen Nachwuchs aus. Eine enge Zusammenarbeit mit allen interessierten deutschen und internationalen Universitäten ist angestrebt und wird wesentlich zum Erfolg dieser Initiative beitragen. Die Plattform soll es den Universitäten erleichtern, an Forschungsprojekten der Helmholtz-Gemeinschaft teilzunehmen und die Infrastruktur der Zentren zu nutzen.

Die Plattform für Detektortechnologie und -systeme ist in drei Säulen organisiert:

- Technologien zum Aufbau hochintegrierter Detektoren
- Ultraschnelle Datenübertragung und -auswertung
- Exemplarische Detektorprototypen

Die beiden ersten Säulen erarbeiten die Technologiebausteine der zukünftigen Detektoren. Ein Schwerpunkt der Initiative liegt dabei zunächst auf der neuen 3D-Technologie im Bereich der Halbleiterdetektoren und deren Anwendungen. Dafür notwendig sind Infrastrukturen und Expertise im Bereich der 3D-Integration, der Aufbau- und Verbindungstechnologie, der schnellen optischen Datenübertragung und der Integration von Sensoren und

Ausleseelektronik. Die neuen Technologien sollen an konkreten exemplarischen Detektorprototypen demonstriert und für den praktischen Einsatz weiter entwickelt werden.

Die enge Zusammenarbeit der Zentren über die Grenzen der einzelnen Programme hinaus verspricht einen erheblichen Mehrwert, sowohl für die Programme innerhalb des Forschungsbereiches, als auch für die Helmholtz-Gemeinschaft als Ganzes und darüber hinaus. Ein besonders offensichtlicher Vorteil ist die engere Vernetzung der Experten an den Zentren und Universitäten, die vielfältigen Kooperationsmöglichkeiten innerhalb der jetzigen und künftigen Arbeitspakete sowie die abgestimmte Entwicklung und Nutzung großer Infrastrukturen. Die Ausbildung und Förderung des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses auf dem Gebiet der Detektorinstrumentierung ist ein weiteres wesentliches Anliegen der Detektorinitiative.

Die Detektortechnologieplattform ist langfristig angelegt. Für das erste Jahr wird 1 Mio. EUR, für die beiden Folgejahre jeweils 3 Mio. EUR beantragt. Die Plattform soll für die dritte Förderungsperiode (PoF III) als ein Thema des Programms „Materie und Technologien“ mit einem Startwert von 6,5 Mio. EUR weitergeführt werden.

## **Inhalt**

1. Einführung in das Thema und seine strategische Bedeutung .....	1
2. Wissenschaftliche Expertise der beteiligten Partner inklusive wichtiger Infrastrukturen ....	4
3. Darstellung der wichtigsten Ziele inklusive Beiträge der Partner.....	16
4. Querschnittsäule .....	35
5. Arbeitsprogramm und Zusammenarbeit der Partner .....	37
6. Beantragte Mittel .....	39



## 1. Einführung in das Thema und seine strategische Bedeutung

Detektoren mit höchster Orts-, Zeit- und Energieauflösung sind eine entscheidende Voraussetzung, das wissenschaftliche Potential der Großforschungsanlagen im Bereich „Struktur der Materie“ ausschöpfen zu können. Der Nutzen leistungsfähiger Detektoren ist dabei nicht auf die Grundlagenforschung oder die Erforschung der Struktur der Materie beschränkt: Detektoren aller Art sind auch in der angewandten Forschung, in der Industrie, in der Medizin sowie in kommerziellen Anwendungen weit verbreitet und unersetzlich.

Die Vielfalt der Anwendungsgebiete spiegelt sich in der Vielfalt der benötigten Instrumente und Detektorkonzepte wieder. Detektoren können so groß sein wie Mehrfamilienhäuser, um die Reaktionen von Elementarteilchen am Large Hadron Collider (LHC) am CERN zu untersuchen, oder mikroskopisch klein, um nicht-invasive medizinische Untersuchungen zu ermöglichen. Die Anforderungen an die Detektoren werden in den kommenden Jahren weit über das heute mögliche hinausgehen.

Detektorentwicklung beinhaltet die Erschließung von technologischem Neuland und öffnet vielfach Technologien, die sich bislang einer Nutzung entziehen. Immer wieder hat die Erschließung von neuen Technologien zu einem Paradigmenwechsel und neuen Detektorkonzepten geführt. Umgekehrt bedeutet erfolgreiche Detektorentwicklung aber auch, neue Trends aus der Industrie aufzugreifen, an die Bedürfnisse der Forschung anzupassen und zugänglich zu machen. Detektortechnologie ist ein strategischer Bereich, in dem die Helmholtz-Gemeinschaft auch in Zukunft an vorderster Front arbeiten muss, um weiterhin Spitzenforschung betreiben zu können.

Die **Plattform für Detektortechnologie und -systeme** ist eine Initiative der Zentren und Institute des Forschungsbereichs „Struktur der Materie“. Sie nutzt die großen Gemeinsamkeiten in den technologischen Anforderungen der beteiligten Programme und das sehr große Interesse aller Zentren an einer programmübergreifenden synergetischen Zusammenarbeit. Das Ziel des Verbundes ist es, nicht nur den Programmen des Fachbereiches selbst, sondern darüber hinaus auch der Helmholtz-Gemeinschaft als Ganzes und den Universitätspartnern den Zugang zu modernsten Detektortechnologien und den auf ihnen basierenden Detektoren zu gewährleisten und eine herausragende internationale Sichtbarkeit zu erzielen.

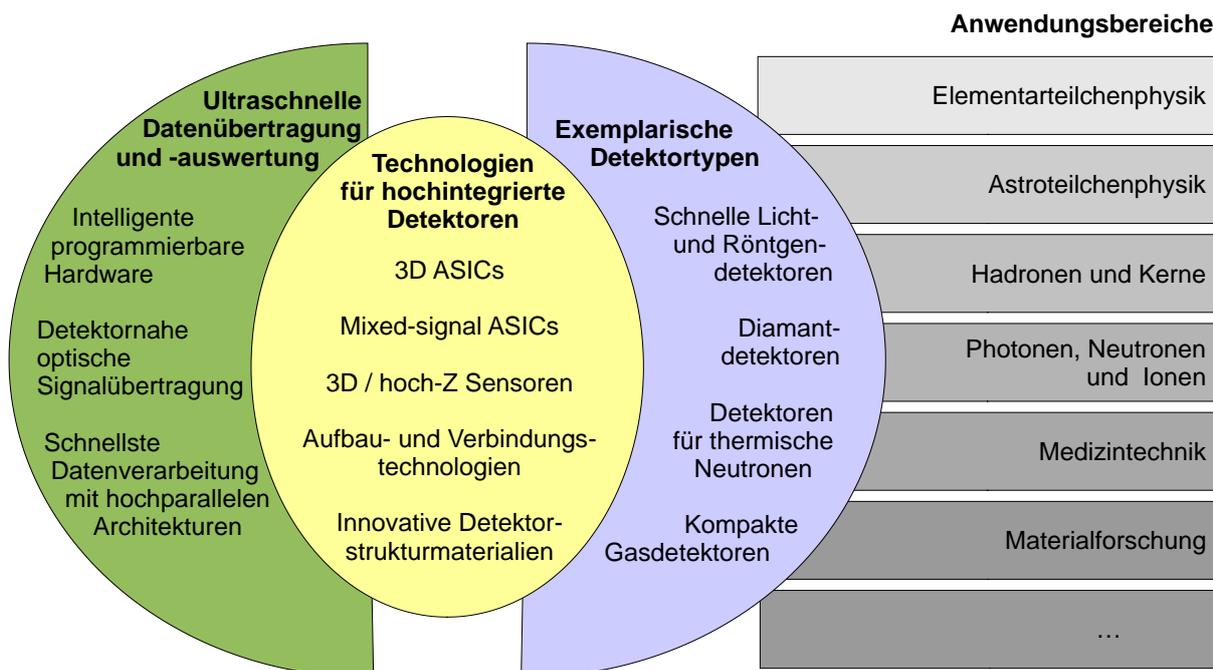


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau der Detektorinitiative und seine Anwendungsbereiche.

Die enge Zusammenarbeit der Zentren über die Grenzen der einzelnen Programme hinaus verspricht einen erheblichen Mehrwert, sowohl für die Programme innerhalb des Forschungsbereiches, als auch für die Helmholtz-Gemeinschaft als Ganzes und darüber hinaus. Ein besonders offensichtlicher Vorteil ist die engere Vernetzung der Experten an den Zentren und Universitäten, die vielfältigen Kooperationsmöglichkeiten innerhalb der vorgeschlagenen Arbeitspakete sowie die abgestimmte Entwicklung und Nutzung großer Infrastrukturen. Die Themen der Detektorplattform sind von den großen Herausforderungen und Zukunftsprojekten des Fachbereiches und der Helmholtz-Gemeinschaft wie XFEL, FAIR und den LHC-Upgrades bestimmt. Die Detektorplattform sucht die Kooperation mit anderen Helmholtz-Verbänden mit Detektorbezug wie zum Beispiel „HIC for FAIR“ oder der Helmholtz-Allianz "Physics at the Terascale" der Teilchenphysik. Auch hierüber ist die Einbindung der deutschen Universitätsgruppen in die Plattform sichergestellt. Die Plattform ist bestrebt, ihre einzigartige Technologiekompetenz einzubringen und dadurch die projektbezogenen Ziele dieser Verbände zu unterstützen oder sogar erst zu ermöglichen. Die Ausbildung und Förderung des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses auf dem Gebiet der Detektorinstrumentierung ist ein weiteres wesentliches Anliegen der Detektorinitiative.

Die Detektorplattform wird zunächst in den folgenden strategischen Bereichen (Säulen) aktiv sein (siehe Abb. 1.1):

- **Technologien zum Aufbau hochintegrierter Detektoren**
- **Ultraschnelle Datenübertragung und -auswertung**
- **Exemplarische Detektorprototypen**

Die beiden ersten Säulen erarbeiten die Technologiebausteine der zukünftigen Detektoren. Kritische Elemente sind insbesondere Sensoren mit hoher intrinsischer Orts- oder Energieauflösung, Sensoren mit hoher Quanteneffizienz bzw. hoher Röntgenstrahlungsabsorption, modernste Ausleseelektronik und Aufbau- und Verbindungstechnologien zur dreidimensionalen Integration von Sensoren und Elektronik, sowie optische Übertragungstechniken für höchste Datenraten. In der dritten Säule werden diese Technologiebausteine auf exemplarische Detektortypen angewandt. Die meisten der genannten Technologien sind nicht nur für einzelne sondern alle Programme des Fachbereiches „Struktur der Materie“ von herausragender strategischer Bedeutung. Gleichzeitig besteht offensichtlicher Bedarf an modernsten Detektoren in der gesamten Helmholtz-Gemeinschaft und zahlreichen anderen Gesellschaftsbereichen. Durch die Definition einer **Querschnittssäule** will die Plattform gezielt Anwendungsfelder außerhalb des Fachbereiches und außerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft erschließen, die technologischen Kompetenzen des Fachbereiches weithin sichtbar kommunizieren und interdisziplinäre Kooperationsmöglichkeiten eruieren. In Zusammenarbeit mit den zuständigen Zentrumsabteilungen sollen auch die optimale kommerzielle Nutzung der Forschungsergebnisse und der zügige Technologietransfer unterstützt werden.

Die behandelten Themen stellen eine Auswahl aktueller technologischer Herausforderungen dar. Die Themenwahl soll flexibel gehandhabt und nach Bedarf und abhängig von den erzielten Forschungsergebnissen angepasst und ergänzt werden. Auf allen genannten Gebieten gibt es bereits Aktivitäten innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft, auf keinem der Gebiete kann aber ein Zentrum alleine eine weltweit führende Stellung erreichen. Erst durch die Bündelung der Kräfte aller Zentren des Fachbereiches, verstärkt durch zahlreiche Universitätsgruppen und weltweit führende internationale Partnerorganisationen, wird es möglich sein, auch neue komplexe Technologien der Helmholtz-Gemeinschaft frühzeitig zugänglich zu machen und dabei das finanzielle Risiko für das einzelne Zentrum zu begrenzen.

Die internationalen und nationalen Partner der Plattform verfügen über eine herausragende technologische und wissenschaftliche Kompetenz und jahrzehntelange Erfahrung in der Detektorinstrumentierung. Sie werden entscheidend zu dem gemeinsamen Erfolg der

Detektorinitiative beitragen und von ihr profitieren. Die Plattform ist nicht auf die Gründungsmitglieder beschränkt, sondern steht bewusst allen interessierten Universitätsgruppen offen. Darüber hinaus wird die Plattform mit zahlreichen akademischen und industriellen Institutionen im Rahmen der jeweiligen Arbeitspakete zusammenarbeiten.

## 2. Wissenschaftliche Expertise der beteiligten Partner inklusive wichtiger Infrastrukturen

### Zentrum DESY

#### Verantwortlich: T. Behnke

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist ein nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft. Es arbeitet auf dem Gebiet der Teilchenphysik, der Physik mit Synchrotronstrahlung und der Beschleunigerentwicklung. DESY betreibt in Hamburg die nationalen Synchrotronstrahlungsquellen DORIS III und PETRA III sowie den Freien-Elektronen Laser FLASH, die weltweit erste Anlage ihrer Art. Bei dem im Bau befindlichen europäischen XFEL Projekt hat DESY als Koordinator des aus 16 internationalen Instituten bestehenden Beschleuniger-Konsortiums eine führende Rolle übernommen. DESY beteiligt sich darüber hinaus an führender Stelle an den Experimenten des Large Hadron Colliders (LHC) am CERN und ist treibende Kraft in der Entwicklung des nächsten großen Zukunftsprojektes der Teilchenphysik, des Elektron-Positron Colliders ILC.

DESY verfügt über umfassende Kompetenzen in der Entwicklung und dem Bau von Detektoren. Über viele Jahrzehnte hat DESY an DORIS, PETRA und dann an HERA an zentraler Stelle den Bau und den Betrieb von Großdetektoren der Teilchenphysik betrieben. Nach dem Ende des Betriebes von HERA übernahm DESY zentrale Aufgaben an den LHC-Detektoren, sowohl im Betrieb als auch in der Entwicklung von Ausbauprojekten. In den letzten Jahren hat DESY wesentliche Beiträge zur Entwicklung neuartiger Detektortechnologien geleistet, wie sie z.B. für den geplanten Linear Collider ILC erforderlich sind. Mit der Genehmigung des XFEL in Hamburg baute DESY seine Kompetenz massiv in den Bereich der Detektoren für Lichtquellen aus. DESY ist an mehreren Detektorprojekten für den XFEL, aber auch für PETRA III führend beteiligt. DESY verfügt über state-of-the-art Einrichtungen zur Detektorentwicklung, zum Bau und zur Integration komplexer Detektorsysteme. DESY betreibt mehrere Teststrahlen, die zur Entwicklung und zum Testen von Detektoren zur Verfügung stehen. DESY ist neben GSI eines der zwei Helmholtz-Zentren, die über ASIC-Entwicklungscompetenz und die dazugehörige Ausstattung verfügen. Mit der vorgeschlagenen Portfolioerweiterung des Programmes wird DESY in neue strategisch relevante Technologien investieren und damit beitragen, dass die Helmholtz Gemeinschaft in diesem zentralen technologischen Bereich eine führende Rolle spielen kann.

#### Auswahl relevanter Publikationen:

1. *Construction and Commissioning of the CALICE Analog Hadron Calorimeter Prototype*, Adloff C. et al., JINST 5:P05004 (2010).
2. *Requirements for and development of 2 dimensional X-ray detectors for the European X-ray Free electron Laser in Hamburg*, Graafsma H., Journal of Instrumentation JINST 4 P12011 (2009).
3. *Polycrystalline CVD diamonds for the beam calorimeter of the ILC*, Grah Ch. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 56 (2009) 462-467.
4. *Diamond X-ray beam-position monitoring using signal readout at the synchrotron radiofrequency*, Morse J., Solar B. and Graafsma H., J. Synchrotron Rad. 17 (2010) 456-464.
5. *Cosmic Ray Tests of the Prototype TPC for the ILC Experiment*, Ackermann K. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 141-143.
6. *Results from the EUDET telescope with high resolution planes*, Bulgheroni A. for the EUDET project, Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 399-401.

7. *Simulations of charge summing and threshold dispersion effects in Medipix3*, Pennicard D., Ballabriga R., Llopart X., Campbell M., Graafsma H., Nucl. Instr. and Meth. A 636 (2011) 74-81.
8. *Pixel-level 8-bit 5-MS/s Wilkinson-type digitizer for the DSSC X-ray imager: concept study*, Hansen K., Reckleben C., Diehl I., Bach M., Kalavakuru P., Nucl. Instr. and Meth. A 629 (2011) 269-276.
9. *Recent advances in the development of radiation tolerant Silicon Detectors for the Super-LHC*, Moll M. (on behalf of RD50 collaboration), "Astroparticle, Particle, Space Physics, Radiation Interaction, Detectors and Medical Physics Applications - Vol.5" (2010) World Scientific (ISBN: 978-981-4307-51-2/3).

## Zentrum FZJ

### Verantwortlich: J. Ritman

Am Forschungszentrum Jülich (FZJ) wird an umfassenden Lösungen für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen der Zukunft geforscht und die Grundlagen für zukünftige Schlüsseltechnologien geschaffen. Die Aktivitäten sind über mehrere Institute verteilt, die gemeinsam Systemlösungen für state-of-the-art Detektortechnologie schaffen.

Das FZJ mit seinen technologieorientierten Instituten wird seine gesamte Expertise insbesondere im Hinblick auf Detektorsysteme in das Portfolio einbringen und erhofft, über das Portfolio eine deutliche Ausweitung seiner technologischen Basis zu erreichen.

Das Institut für Kernphysik (IKP) betreibt Grundlagenforschung im Bereich der Hadronen-, Kern- und Teilchenphysik. Dazu werden am hauseigenen Speicherring COSY die Experimente ANKE, WASA-at-COSY und TOF durchgeführt. Des Weiteren ist das IKP an den Experimenten PANDA und PAX sowie dem HESR-Beschleuniger der Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR) in Darmstadt in führender Rolle beteiligt. Der Schwerpunkt in der Detektorentwicklung für die Experimente liegt in den Bereichen hochauflösender Silizium-Pixel- und Silizium-Streifen-Detektoren mit großer Strahlungslänge und höchsten Ausleseraten, bei großvolumigen, ultraleichten Gasdetektoren zur Spurmessung geladener Teilchen und der Datenauslese der Detektoren. Insbesondere für das PANDA-Experiment, welches ohne globalen Trigger arbeiten soll, stellt die Kombination aus hoher Datenrate, möglichst großer Strahlungslänge und hoher Strahlenbelastung die Datenauslese vor eine besondere Herausforderung.

Das Zentralinstitut für Elektronik (ZEL) und die Zentralabteilung Technologie (ZAT) sind wissenschaftlich-technische Institute, die Forschungs- und Entwicklungsprojekte in Kooperation mit den Instituten des Forschungszentrums sowie externen Partnern durchführen.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten im ZEL sind die Detektor- und Experimentsysteme, bei denen man sich mit der Entwicklung von Detektoren, detektorspezifischer Digitalisierungselektronik sowie mit modularen Boardsystemen für die Auslese der Detektordaten befasst. Das Ziel der Arbeiten ist es, mit eigenen Entwicklungen und kommerziell verfügbaren Teillösungen, Detektor- und Experimentsysteme zu integrieren, die den speziellen physikalischen Anforderungen der Anwender entsprechen.

Die Mission des ZAT ist es, wissenschaftlich-technische Geräte, Anlagen und Verfahren für die eigenen Institute und für Dritte zu konzipieren, zu entwickeln und zu fertigen, die auf dem Markt nicht erhältlich sind. Über 150 hochqualifizierte Mitarbeiter sind beauftragt, Technologie für die Spitzenforschung unserer Partner zu entwickeln und anzubieten. Die Kompetenz des ZAT liegt in der Entwicklung, dem Aufbau und der Integration von großen Experimentieranlagen unter Berücksichtigung aller technischen und physikalischen Rahmenbedingungen und Anforderungen an Großgeräten, dabei steht der Systemaspekt an vorderster Stelle.

Auswahl relevanter Publikationen:

1. *Fully Integrated CMOS GPS Receiver for Systems-on-Chip Solutions*, Grewing C. et al., Conference Digest, Invited Paper, IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, San Francisco CA, USA (2006) 195-198.
2. *Performance Issues of the New DAQ Syst. for WASA at COSY*, Kleines H. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 55 (2008) 261 – 264.
3. *Position-sensitive detectors of the detector group at Jülich*, Engels R. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 604, 1-2 (2009) 147-149.
4. *The micro-vertex-detector of the PANDA experiment at FAIR*, Stockmanns T. for the PANDA collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A 565 (2006) 106-112.
5. *The central tracker of the PANDA detector*, Sokolov A. for the PANDA collaboration, Nucl. Instr. and Meth. A 598 (2009) 75-78.

## Zentrum GSI

### Verantwortlich: C.J. Schmidt

Das GSI Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung (GSI) ist Deutschlands größtes Forschungszentrum im Bereich der Kern- und Schwerionenphysik mit einer starken internationalen Ausrichtung und Reputation. Den Schwerpunkt des GSI-Forschungsprogramms bilden erkenntnisorientierte Grundlagenuntersuchungen im Bereich der Kern- und Atomphysik, der relativistischen Schwerionenphysik sowie der Hadronenphysik. Parallel dazu haben sich anwendungsbezogene Forschungsaktivitäten in der Materialforschung, der Plasmaphysik, der Biophysik und der Strahlenmedizin entwickelt. In den nächsten Jahren wird bei GSI bis 2018 das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR entstehen, in dessen Rahmen der bestehende Beschleuniger um ein vielfaches erweitert und zukünftig neben Schwerionenstrahlen höchster Intensität ebenso intensive Antiprotonenstrahlen Experimenten zur Verfügung stehen werden. Die experimentellen Vorbereitungen und Entwicklungen sind in internationalen Kollaborationen organisiert mit starker Beteiligung weiterer, insbesondere europäischer Forschungslabore sowie Universitätsgruppen aus dem In- und Ausland.

Die GSI selbst hat sich im Hinblick auf FAIR die federführende Entwicklung ausgewählter zentraler Detektorsysteme und den damit verbundenen Schlüsseltechnologien zum Ziel gemacht. Sie kann dabei auf langjährige Erfahrung in der Entwicklung und dem Bau kernphysikalischer Großdetektorsysteme wie z.B. ALICE-TPC oder -TRD sowie auf eine hervorragende infrastrukturelle Ausstattung zurückgreifen. Mit dieser Detektorexpertise im Hintergrund nimmt die GSI darüber hinaus die zentrale, koordinierende und richtungweisende Stellung bei den Detektor- und Systementwicklungsaktivitäten der FAIR-Experimentkollaborationen ein.

Die GSI verfügt über eine breite und meist langjährige Expertise

- in der Elektronikentwicklung für kernphysikalische Großexperimente,
- in der detektorspezifischen Mikrochipentwicklung (ASIC-Entwicklung, Strahlenhärte),
- auf dem Gebiet großvolumiger, großflächiger sowie mikro-strukturierter, moderner Gas Detektoren (Detektorlabor mit 600 m<sup>2</sup> Reinraumfläche, Großprojekte wie ALICE TPC, ALICE TRD, Detektor Alterungsexpertise),
- in dem Bereich der Integration von Siliziumdetektoren (Ausstattung und Personal wie z.B. Waferprober, automatische Drahtbonder, halbautom. Bumpbonder, Dieplacer) sowie in der Diamantdetektortechnologie.

Die GSI will ihre an den Grenzen des technologisch möglichen orientierte Expertise in das Detektorplattform einbringen und ihre technologische Basis aus der Breite der Helmholtz-Gemeinschaft erweitern.

Auswahl relevanter Publikationen:

1. *The PANDA GEM-based TPC prototype*, Fabbietti L. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 628 (2011) 204-208.
2. *The ALICE TPC, a large 3-dimensional tracking device with fast readout for ultra-high multiplicity events*, Alme J. et al. (ALICE Collaboration), Nucl. Instr. and Meth. A 622 (2010) 316 [arXiv:1001.1950].
3. *Diamond detectors for hadron physics research*, Berdermann E. et al., Diam. Relat. Mater. 19 (2010) 358
4. *PADI-2, -3 and -4: The second iteration of the Fast Preamplifier-Discriminator ASIC for Time-of-Flight Measurements at CBM*, Ciobanu M. et al., IEEE NSS (2009) 401-406.
5. *Low Noise Preamplifier ASIC for the PANDA EMC*, Wieczorek P. and Flemming H., NSS\_N47-74; Knoxville, TN (2010).
6. *Large Area APDs for the PANDA EMC*, Lewandowski B. et al., IEEE Trans. on Nucl. Sci. 55, 3 (2008) 1304-1308.
7. *n-XYTER, a CMOS read-out ASIC for high resolution time and amplitude measurements on high rate multi-channel counting mode detectors*, Brogna A. et al., Nucl. Inst. and Meth. A 568 (2006) 301 – 308.

**Zentrum HIJ****Verantwortlich: G. Weber**

Die Vernetzung der Expertise in Laser- und Beschleunigertechnik und Forschung ist zentraler Gegenstand der Aktivitäten des Helmholtz-Institutes Jena. An der Schnittstelle dieser bisher weitgehend getrennten Forschungsfelder soll das Institut wesentliche Beiträge zur Erschließung des enormen Entwicklungspotenzials für die Grundlagenforschung wie auch für Anwendungen liefern. Folgerichtig sind Forschungsaktivitäten an den großen deutschen Beschleunigerprojekten XFEL und FAIR zentraler Gegenstand des Institutes. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich für das Helmholtz-Institut Jena folgende Tätigkeitsschwerpunkte:

- Das HIJ wirkt als Schnittstelle für die Weiterentwicklung konventioneller und laserbasierter Beschleunigerkonzepte für Elektronen und Ionen und wird Beiträge zu neuartigen Beschleunigertechnologien leisten.
- Das HIJ erarbeitet innovative messtechnische und diagnostische Konzepte zur Untersuchung der Photonen-Materie-Wechselwirkung und treibt deren Entwicklung voran. Dazu gehört z.B. der Einsatz von Diamantdetektortechnologie sowie die Entwicklung schneller Ausleseelektronik.
- Für die Grundlagenforschung in den Bereichen Starkfeldphysik und der Physik warmer, dichter Materie werden neue Impulse generiert und Experimentierschemata entwickelt.

Das HIJ ist ein neues Institut, das über das Portfolio direkt und erstmalig Zugang zu der Mixed-signal ASIC-Technologie gewinnen kann. Der erste anvisierte Chip kann hier sofort in Experimenten eingesetzt werden und erscheint ideal für die dort herrschenden experimentellen Bedingungen und dem Einsatz von Halbleiterdetektoren zu sein. HIJ will sein Kompetenzspektrum gerne in das Portfolio mit einbringen, insbesondere die Erfahrung im Umgang mit Diamantdetektoren und deren Anwendungen im Bereich der Hochleistungslaser.

Auswahl relevanter Publikationen:

1. *Performance of a Ge-microstrip imaging detector and polarimeter*, Spillmann U. et al., Review of Sci. Inst. 79, 083101 (2008).

## Zentrum HIM

### Verantwortlich: F. Maas

Das Helmholtz-Institut Mainz, gegründet im Jahr 2009, stellt die institutionelle Fortführung der bereits lang bestehende Kooperationen zwischen der Johannes Gutenberg-Universität (JGU) und der GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung mbH in Darmstadt dar. In diesem Kompetenzzentrum bündeln sich Aktivitäten der GSI und der JGU auf dem Gebiet der Kern-, Teilchen- und Atomphysik in Kombination mit Beschleunigerphysik. Die Forschungsaktivitäten an der GSI und der internationalen sich im Aufbau befindlichen Beschleunigeranlage FAIR, an denen die Helmholtz-Gemeinschaft maßgeblich beteiligt ist, sind zentraler Gegenstand des Institutes. Ein wissenschaftlicher Schwerpunkt des jungen Instituts ist die Erforschung der Reaktionen von Antimaterie an FAIR. Darüber hinaus beschäftigt sich das Helmholtz-Institut Mainz mit der Synthese superschwerer Elemente im Bereich  $Z > 112$ . Aus dieser Zielsetzung ergeben sich neben Aktivitäten in der Theorie für das Helmholtz-Institut Mainz folgende experimentelle bzw. technische Tätigkeitsschwerpunkte:

- Antiproton-Annihilationsreaktionen im Bereich der Spektroskopie und der Hadronstruktur mit dem PANDA-Experiment an FAIR
- Entwicklung und Bau von Detektorkomponenten für das PANDA-Experiment
- Synthese und Studium der Physik beziehungsweise Chemie superschwerer Elemente
- Entwicklung eines Demonstrators für einen supraleitenden Linac zur Synthese von superschweren Elementen
- Entwicklung eines 8MV Elektronenkühlers für den Antiprotonenspeicherring HESR an FAIR
- Entwicklung von Experimenten zum Studium von Antiwasserstoff

Mit diesen Zielen arbeitet das Helmholtz-Institut Mainz ebenfalls an der technologischen Entwicklung von Teilchendetektoren (Kalorimetern, Cerenkovdetektoren, Pixelkameras) und insbesondere Gasdetektoren, die zu der Instrumentierung der Experimente notwendig sind.

#### Auswahl relevanter Publikationen:

1. *Active target system with a multi pixel photon counter (MPPC) readout for hyperon-proton scattering experiment*, Miwa K. et al., Proceedings of Science, PD09, 027 (2010).
2. *Realtime calibration of the A4 electromagnetic lead fluoride calorimeter*, Baunack S. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 640 (2011) 58-68, [arXiv:1102.5640v1](https://arxiv.org/abs/1102.5640v1) [nucl-ex].
3. *The DIRC detectors of the PANDA experiment at FAIR*, Fohl K. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 595 (2008) 88-91.

## Zentrum HZB

### Verantwortlich: Th. Wilpert, K. Holldack

Für Forschungsarbeiten zur Struktur und Funktion der Materie betreibt das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB) zwei wissenschaftliche Großgeräte: den Forschungsreaktor BER II für Experimente mit Neutronen und den Elektronenspeicherring BESSY II, der hochbrillante Synchrotronstrahlung vom Terahertz- bis in den Röntgenbereich erzeugt. BESSY II stellt an mehr als 50 Beamlines Experimentierstationen und teilweise auch Detektoren zur Verfügung. Um den Forschungsreaktor BER II gruppieren sich 25 Experimente zur Neutronenstreuung.

Die Betreuung und Entwicklung von Detektoren ist am HZB am Detektorlabor konzentriert, das insbesondere Expertisen im Bereich der MWPC- und Gd-basierten MSGC-Neutronendetektoren verfügt, die für sub-Millimeter Auflösung und höchste Zählraten konzipiert sind, aber nur kleine Flächen abdecken können. Im FP6 hat das HZB (damals

HMI) das EU-Projekt DETNI koordiniert, im Rahmen dessen drei verschiedene Neutronendetektoren und zwei ASICs (MSGCROC und n-XYTER) zu deren Auslese entwickelt wurden. Weitere zentrale Kompetenzen existieren im Bereich Halbleiterdetektoren für Photonen, Elektronen und Ionen im Energiebereich von meV bis MeV sowie der zugehörigen Ausleseelektronik.

Ein besonderer Schwerpunkt für das HZB im Rahmen der Detektorplattform ist die Entwicklung von Alternativen für  $^3\text{He}$  zur großflächigen Neutronendetektion. Obwohl diese Aktivitäten auch international intensiv verfolgt werden, kann die Plattform hier durch ihren komplementären Ansatz und den Austausch mit anderen Zentren einen wesentlichen Beitrag leisten.

#### Auswahl relevanter Publikationen:

1. *Beam stability of undulator and dipole radiation on BESSY II obtained by synchrotron radiation monitors*, Holldack K. Ponwitz D. and Peatman W.B., Nucl. Instr. and Meth. A 467-468 (2000) 213-220.
2. *Transmissive x-ray beam position monitors with submicron position- and submillisecond time resolution*, Fuchs M.R., Holldack K. et al., Rev. Sci. Instr. V. 79, Nr. 6, p. 063103, AIP (2008).
3. *Software modules of DAQ PCI board (DeLiDAQ) for position-sensitive MWPC detectors with delay line readout*, Levchanovsky F.V., Litvinenko E.I., Nikiforov A.S., Gebauer B., Schulz Ch., Wilpert Th., Nucl. Instr. and Meth. A 569 (2006) 900-904.
4. *Development of very high rate and resolution neutron detectors with novel readout and DAQ hard- and software in DETNI*, Alimov S., Borga A., Brogna A. et al., IEEE NSS (2008) DOI 10.1109/NSSMIC.2008.4774759.
5. *Square single-wire detectors for neutron diffraction studies*, Bleif H.J., Clemens D., Eads A., Fox W., Gebauer B., Geevers M., Herbach C.M., Lozowski W., Mezei F., Peters J., Sokol P., Solberg K., Vanderwerp J., Visser G., Wilpert Th., Wulf. F., Nucl. Instr. and Meth. A 580 (2007) 1110-1114.

## **Zentrum HZDR**

### **Verantwortlich: A. Wagner**

Das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf arbeitet im Bereich der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung auf den Feldern Forschung mit Photonen, Neutronen und Ionen, Materialforschung, nukleare Sicherheit, Krebsforschung und neue Materialien. Es betreibt eine Reihe von Großanlagen: den supraleitenden Elektronenbeschleuniger ELBE als Quelle hoher Brillanz und kleiner Emittanz zur Erzeugung von Bremsstrahlung, Neutronen, einen Infrarot-FEL, das Hochfeld-Magnetlabor HLD zur Erzeugung höchster gepulster Magnetfelder und das Ionenstrahlzentrum zur Materialforschung und Ionenstrahlanalytik. Darüber hinaus ist das HZDR an internationalen Experimenten an der ESRF, an der GSI und an FAIR beteiligt. Medizinische Forschung wird in einem PET-Zentrum auf den Gebieten Radiopharmazie, -therapie und medizinische Bildgebung betrieben.

Das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf verfügt über eine breite Expertise in der Entwicklung und der Anwendung unterschiedlichster Detektorsysteme in der physikalischen Grundlagenforschung, der Medizin und der Materialforschung. Langjährige Erfahrung besteht in der Entwicklung und im Aufbau großflächiger Spurrekonstruktionsdetektoren für Experimente in der Schwerionenphysik. Für das CBM-Experiment und das R3B-Experiment an FAIR werden aktuell großflächige Resistive-Plate-Detektoren mit hoher Zeitauflösung und hoher Zählratenfestigkeit entwickelt, welche auch zum Nachweis hochenergetischer Neutronen genutzt werden [2]. Szintillationsdetektoren zum Nachweis von Neutronen im Energiebereich von wenigen 10 keV bis einigen MeV und bei hoher Zeitauflösung werden für Experimente zur nuklearen Transmutation entwickelt und eingesetzt. Zur Charakterisierung von Detektoren mit hoher Zeitauflösung verfügt das HZDR am Elektronenbeschleuniger ELBE über eine einzigartige experimentelle Einrichtung, die Strahlen von einzelnen oder wenigen Elektronen pro Strahlpuls mit einer zeitlichen Genauigkeit von ps und Energien bis 35 MeV einsetzt [3]. In enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern (KETEK GmbH) werden

schnelle SiPM-Halbleiterdetektoren entwickelt und gefertigt. Das HZDR nutzt hierbei seine umfangreiche Infrastruktur zur Halbleiterbearbeitung bis hin zur Implantation hochenergetischer Ionen. Die Kompetenz des HZDR in der klinischen Anwendung der Positronen-Emissions-Tomographie im HZDR-PET-Zentrum mit dem Uni-Klinikum und in der Schwerionentherapie [4] an der GSI wird durch den Aufbau einer Comptonkamera für die in-vivo Dosimetrie an Protonen- und Ionentherapieeinrichtungen [5] ausgebaut.

Auswahl relevanter Publikationen:

1. *The High-Acceptance Dielectron Spectrometer HADES*, Agakishiev G. et al., J. Eur. Phys. 41 (2009) 243-277.
2. *Ceramics high rate timing RPC*, Naumann L. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 628 (2011) 138-141.
3. *Anordnung und Verfahren zur Erzeugung einzelner relativistischer Elektronen*, Naumann L. et al., Patent DE102008054676A1 (2009).
4. *Implementation and workflow for PET monitoring of therapeutic ion irradiation: a comparison of in-beam, in-room, and off-line technique*, Shakirin G., Braess H., Fiedler F. et al., Phys. Med. Biol. 56 (2011) 1281-1298.
5. *Imager for in-vivo dosimetry of proton beams - A design study*, Kormoll T. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 626-627 (2011) 114.

## Zentrum HZG

### Verantwortlich: M. Müller

Einer der Schwerpunkte des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG) ist die Materialforschung. Der Institutsteil „Materialphysik“ des Instituts für Werkstoff-Forschung betreibt Messplätze an Großforschungseinrichtungen, um dort Strukturuntersuchungen an Werkstoffen und Biomaterialien durchzuführen, sowie um an der Entwicklung und Charakterisierung neuer Leichtbauwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen zu arbeiten. An den Außenstellen bei DESY in Hamburg und am FRM II in Garching stehen Experimentplätze für die Nutzung von Synchrotronstrahlung beziehungsweise Neutronenstreuexperimenten für Eigenforschung, aber insbesondere für externe Nutzer zur Verfügung. 2D-ortsempfindliche Detektoren für Neutronen waren am HZG erfolgreich für Kleinwinkelstreuung und für hochauflösende Diffraktometrie entwickelt worden. Dies führte in 2001 zur Ausgründung der Firma „DENEX Detektoren für Neutronen und Röntgenstrahlung GmbH“, die heute weltweit führend in der Vermarktung von Neutronendetektoren mit Delay-Line basierter Auslesetechnik ist. In den kommenden Jahren wird HZG mit Unterstützung der DENEX Neutronendetektoren mit dünnen, Bor-haltigen Konverterschichten im Rahmen der „Mitwirkung der Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft und der Technischen Universität München an der Design-Update-Phase der ESS“ entwickeln.

Im Bereich der Materialforschung werden an den Beamlines des HZG unterschiedliche Messverfahren aus den Bereichen Imaging und Streuung optimiert und einer internationalen Nutzerschaft als Untersuchungstechniken angeboten. Dadurch ist bei HZG langjährige Erfahrung im Bereich der Charakterisierung und Optimierung von Röntgen- und Neutronendetektoren vorhanden. Zusätzlich ist das HZG an Projekten für die Prozessoptimierung und die Effizienzsteigerung der Messmethoden federführend beteiligt. Hierzu zählen die Echtzeitkontrolle der Experimente, sowie der Aufbau schneller Auswertetechniken. Für die Anwendungen der Verfahren im Bereich der Ingenieurwissenschaften werden standardisierte Untersuchungstechniken für die Qualitätskontrolle mit aufgebaut.

Im Rahmen der Detektorplattform wird HZG sich auf Beiträge zur intelligenten programmierbaren Hardware (vgl. 3.6), schnellste Datenverarbeitung (vgl. 3.8) sowie auf Detektoren für thermische Neutronen (vgl. 3.11) konzentrieren. Diese Entwicklungsarbeiten werden zu wesentlichen Leistungssteigerungen von HZG Beamlines am DESY, an der TUM sowie zukünftig an der ESS führen.

Auswahl relevanter Publikationen:

1. *Latest develop. in microtomography and nanotomography at PETRA III*, Haibel A. et al., Powder Diffr. 25, 2 (2010) 161-164.
2. *The New GKSS Materials Science Beamlines at DESY: Recent Results and Future Options*, Staron P. et al., Materials Sci. Forum 638-642 (2010) 2470-2475.
3. *The high energy materials science beamline (HEMS) at PETRA III*, Schell, N. et al., AIP Conference Proceedings 1234 (2010) 391-394 [doi:10.1063/1.3463221](https://doi.org/10.1063/1.3463221).
4. *2D-MWPC for the new reflectometer REFSANS/FRM-II: performance of the prototype*, R. Kampmann, Marmotti M., Haese-Seiller M., Kudryashov V., Nuc. Instr. and Meth. in Physics Research A 529 (2004) 342 -347.

## Zentrum KIT

### Verantwortlich: M. Weber

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist im Jahre 2009 aus der Fusion der Universität Karlsruhe mit dem Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft entstanden. Mit rund 9000 Beschäftigten, 22000 Studierenden und mehr als 300 Professoren ist das KIT die größte Forschungs- und Lehrereinrichtung Deutschlands.

Im Fachbereich „Struktur der Materie“ betreibt das KIT die nationale Synchrotronquelle ANKA und das Grid Computing Centre Karlsruhe (GridKa). Das KIT ist verantwortlich für das im Aufbau befindliche Neutrinoexperiment KATRIN und ist federführend an dem Pierre Auger Observatorium in Argentinien beteiligt. Alle genannten Anlagen sind Großgeräte der Leistungskategorie II. Weiterhin wird ein Zyklotron am KIT (26 MeV Protonen) als Strahlungsquelle für die Ermittlung der Strahlenhärte von Detektoren und Elektronikkomponenten genutzt, womit das KIT international als Bestrahlungszentrum eine herausragende Rolle eingenommen hat.

Das KIT hat mit dem Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP), dem Institut für Kernphysik (IK), dem Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE), dem Institut für Synchrotronstrahlung (ISS) und dem Laboratorium für Anwendungen der Synchrotronstrahlung (LAS) eine jahrzehntelange Tradition in der Entwicklung und dem Bau von leistungsfähigen Detektoren für die Grundlagenforschung wie angewandte Forschung. Zurzeit ist das KIT an den folgenden laufenden und zukünftigen Experimenten der Astroteilchenphysik und Teilchenphysik beteiligt: AMS, Auger, Belle II, CDF, CMS, CMS Upgrade, EDELWEISS, EURECA und KATRIN.

Eine besondere Stärke des KIT liegt in der Breite seines Technologiespektrums und der Vielzahl leistungsfähiger, international vernetzter Institute. Relevant für den vorliegenden Antrag sind unter anderem die Kompetenzen in: Aufbau- und Verbindungstechnik, analoger und digitaler Elektronikentwicklung, schnellen Datennahme- und Triggersystemen, optischer Datenübertragung und -verarbeitung bei höchsten Raten<sup>1</sup>, Materialforschung, Nano- und Mikrotechnologie, supraleitenden Detektoren, Detektoren für Synchrotronstrahlung und Charakterisierung der Strahlenhärte von Halbleitersensoren.

Auswahl relevanter Publikationen:

1. *26 Tbit s<sup>-1</sup> line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing*, Hillerkuss D. et al., Nature Photonics, [DOI: 10.1038/NPHOTON.2011.74](https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2011.74).
2. *Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers*, Falcke H. et al., Nature 435 (2005) 313, [DOI: 10.1038/nature03614](https://doi.org/10.1038/nature03614).
3. *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*, Hartmann F., Springer Tracts in Modern Physics (Monograph) 231 (2009) 1-202, [ISBN: 978-3-540-25094-4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-25094-4).
4. *A GPU-Based Architecture for Real-Time Data Assessment at Synchrotron Experiments*, Chilingaryan S. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. (2011) [DOI: 10.1109/TNS.2011.2141686](https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2141686).

---

<sup>1</sup> Zurzeit hält KIT den Weltrekord mit 26 Tb/s über eine Strecke von 50km

5. *Preliminary characterisation of CdTe M-[pi]-n diode structures*, Greiffenberg D., Fauler A., Zwerger A., Baumbach T., Fiederle M., Nucl. Instr. Meth. A. 633 (2011) 137-139 [DOI:10.1016/j.nima.2010.06.148](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.148).
6. *Hardware Setup for the Next Generation of 3D-Ultrasound Computer Tomography*, Gemmeke H. et al., Proc. of IEEE NSS MIC (2010) 2449 - 2454. [DOI:10.1109/NSSMIC.2010.5874228](https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2010.5874228)
7. *LPE grown LSO:Tb scintillator films for high-resolution X-ray imaging applications at synchrotron light sources*. Cecilia A. et al., Nucl. Instr. and Meth. A. in press. [DOI:10.1016/j.nima.2010.10.150](https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.10.150)
8. *Superconducting single-photon detector for the visible and infrared spectral Range*, Engel A., Semenov A., Hübers H. W., Il'in K., Siegel M., J Mod Optic 51, 9 & 10 (2004) 1459 - 1466, [DOI: 10.1080/09500340408235285](https://doi.org/10.1080/09500340408235285).

## **Partner Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL)**

### **Representative: Y.-K. Kim**

Fermi National Accelerator Laboratory advances the understanding of the fundamental nature of matter and energy by providing leadership and resources for qualified researchers to conduct basic research at the frontiers of high energy physics and related disciplines. Fermi National Accelerator develops, builds and operates accelerators for basic research, and participates in the worlds most advanced programs worldwide. The current flagship accelerator, the Tevatron, has led to many groundbreaking discoveries and has defined the field for many years. With the end of the Tevatron program approaching, Fermi National Accelerator Laboratory has established a leading participation in the large hadron Collider at CERN, and is developing a world class program pushing the limits of discovery through the high intensity frontier, and investing into the development of the accelerators of the next generation. Instrumentation is a central part of any experiment, and Fermi National Laboratory is a long standing tradition of excellence in the area of detector development and construction.

FNAL is pleased to collaborate with and strongly support the Helmholtz Detector Technologies and Systems Platform. It recognizes the strategic importance of the topics addressed by this initiative, and their relevance for the long-term future of the field. A closer collaboration on these topics is for the mutual benefits of both sides.

## **Partner IN2P3**

### **Representative: C. De La Taille**

The French Institute for Nuclear Physics and Particle Physics (IN2P3) is a department of the French Scientific Research agency (CNRS). It is staffed with 2500 researchers, engineers and technicians and aims at studying elementary constituents of matter and the way they assemble to form stable or unstable nuclei. This research also extends to astroparticles and cosmology and necessitates many highly technological developments, which have spinoffs in health or energy domains.

Among the technological developments, detectors and microelectronics play an important role and the IN2P3 has selected its two largest teams in that field to contribute to this proposal: the OMEGA-LAL Orsay and IPHC Strasbourg microelectronics groups.

These two groups also have a long and successful collaboration record with German groups in detector developments at LEP, DESY, LHC, CALICE, EUDET and GSI and have developed close and trustworthy links. They also benefit from a worldwide reputation for microelectronics design.

## Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL)

The Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (LAL) is a joint research unit (UMR8507) in partnership with University of Paris Sud and the National Scientific Research Centre (CNRS).

LAL hosts the Microelectronics Design Platform (OMEGA), composed of 15 engineers highly specialized in analog and mixed-signal microelectronics design. This group already acquired a strong experience and is internationally recognized in the design and the manufacture of ASICs Highlights, include the front-end and calibration of the ATLAS calorimeter at the LHC, and the integrated readout of the Silicon-Tungsten calorimeter of the ILC. The first SiPM readout ASIC (ASIC FLC\_SiPM) for the HCal Calorimeter of ILC was developed at LAL. The microelectronics group also ensures the training of young engineers to weave new scientific collaborations and favors the dissemination of new circuits in adjacent fields such as medical imaging.

### Selected Publications:

1. *Design and Fabrication of Detector Module for UFFO Burst Alert & Trigger Telescope*, Jung A. et al., arXiv:1106.3802, ICRC1262 (2011) preprint.
2. *PMF: the front end electronic of the ALFA detector*, Barrillon P., Blin S., Cheikali C., Cuisy D., Gaspard M., Fournier D., Heller M., Iwanski W., Lavigne B., De La Taille C. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 463-465.
3. *Performance of Glass Resistive Plate Chambers for a high granularity semi-digital calorimeter*, Bedjidian M., Belkadi K., Boudry V., Combaret C., Decotigny D., Cortina Gil E., De la Taille C., Dellanegra R., Gapienko V. A., Grenier G. et al., arXiv:1011.5969 (2010) preprint.
4. *PARISROC, a Photomultiplier Array Integrated Read Out Chip*, Conforti Di Lorenzo S., Campagne J. E., Dulucq F., De La Taille C., Martin-Chassard G., El Berni M., Wei W., arXiv:0912.1269 (2010) NSS (2009) preprint.

## Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC)

IPHC-Strasbourg is the largest interdisciplinary laboratory of IN2P3-CNRS. Its subatomic physics department has a long record in instrumentation for large scale international high energy physics experiments at large particle accelerators (e.g. LEP and LHC at CERN, Tevatron at Fermi Lab) and in nuclear physics experiments, including the hadrontherapy experiment FIRST at GSI. It also has a strong activity in bio-medical imaging.

The CMOS-ILC team is developing CMOS pixel sensors for charged particle tracking since more than ten years and has become a major player in this domain at the international level. It is involved in several subatomic physics projects requiring highly granular, thin and swift pixel sensors in Europe (FIRST at GSI, CBM at FAIR, ALICE at LHC), USA (STAR at RHIC, eRHIC R&D) and China (BES-3). It has also key responsibilities in EU projects requiring high precision pixel detectors EUDET, Hadron Physics 2, AIDA). The team is composed of 19 staff members (10 ASIC designers, 5 lectronicians and 4 particle physicists) and of about 10 non-permanent members (post-docs and PhD students).

### Selected Publications:

1. *Radiation tolerance of a column parallel CMOS sensor with high resistivity epitaxial layer*, Deveaux M. et al., Journal of Instrumentation 6 (2011) C02004.
2. *Towards a 10 us, thin and high resolution pixelated CMOS sensor system for future vertex detectors*, De Masi R. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 628 (2011) 296-299.
3. *Achievements and perspectives of CMOS pixel sensors for charged particle tracking*, Winter M., Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 192-194.
4. *Photon detection with CMOS sensors for fast imaging*, Baudot J. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 604 (2009) 111.
5. *Small-Scale Readout System Prototype for the STAR PIXEL Detector*, Besson A. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. 55 (2008) 3665.

**Partner Max-Planck-Institut für Physik (MPP)****Verantwortlich: H.-G. Moser**

Das Max-Planck-Institut für Physik in München ist eines von rund 80 Forschungsinstituten der Max-Planck-Gesellschaft. Es arbeitet auf dem Gebiet der Teilchen- und Astroteilchenphysik und erforscht die kleinsten Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkung. Das Institut führt in internationaler Zusammenarbeit experimentelle Untersuchungen an den großen Teilchenphysiklaboren der Welt durch. Dazu zählen das CERN in Genf, das DESY in Hamburg, KEK in Japan und das Gran Sasso-Untergrundlabor in Italien. Hinzu kommen Experimente zur Untersuchung der kosmischen Strahlung auf der kanarischen Insel La Palma. Das MPP hat lange Erfahrung in der Entwicklung und dem Bau von Detektoren und übernahm zentrale Aufgaben bei großen Kollaborationen wie ALEPH, ATLAS, CRESST, H1, MAGIC und weiteren. Eine besondere Expertise besitzt das MPP auf dem Gebiet der Siliziumdetektoren. Das MPP betreibt gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) ein Labor zur Entwicklung und Fertigung von Silizium-Halbleiterdetektoren. Am Labor können Detektoren entwickelt und gefertigt werden, die in ihrer Leistungsfähigkeit einzigartig sind und wesentlich zur Qualität der Forschung der Institute beitragen. In der Regel können solche speziellen Detektoren von der Industrie nicht geliefert werden. Die vom MPP entwickelten und gefertigten Detektoren umfassen passive Pixel- und Streifendetektoren, voll depletierbare CCDs für Bildsensoren, für Röntgenstrahlung voll depletierbare aktive Pixelsensoren. Eine Neuentwicklung sind die SiMPI Siliziumphotomultiplier. Durch ihre spezielle Konstruktion (Integration des Quenchwiderstands in den Silizium-Bulk) eignen sie sich besonders für den Aufbau von komplexen Sensorsystemen (3D-Integration).

Ausgewählte Publikationen

1. *Silicon detector systems in high energy physics*, Moser H.-G., Prog. Part. Nucl. Phys. 63 (2009) 186-237.
2. *Large-format, high-speed, X-ray pnCCDs combined with electron and ion imaging spectrometers in a multipurpose chamber for experiments at 4th generation light sources*, Strüder L. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 614 (2010) 483.
3. *Design and technology of DEPFET pixel sensors for linear collider experiments*, Richter R.H. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 511 (2003) 250.
4. *SiMPI--An avalanche diode array with bulk integrated quench resistors for single photon detection*, Ninkovic J. et al., Nucl. Instr. and Meth. A 617 (2010) 407-410.

**Partner Science and Technology Facility Council (STFC)****Representative: M. French**

The UK Science and Technology Facility Council (STFC) supports world leading research in the UK that is both curiosity-driven and application-led in the delivery and operation of large experimental facilities. The Council also funds the UK programme of university research in fields that include Particle Physics, Nuclear Physics, Space Science and Synchrotron Science.

The Council owns and operates two central laboratories; the Rutherford Appleton Laboratory and Daresbury Laboratory at science and innovation campuses at Harwell in Oxfordshire and Daresbury in Cheshire. The laboratories are staffed with >2000 STFC researchers, engineers and technicians delivering the STFC programme. These sites provide both a focus for siting STFCs facilities and a centre for developing technology to support and deliver our facilities.

Among the key technology developments of STFC, detector systems play a central role in keeping our facilities competitive and provide a key way in which STFC contributes to facilities abroad. For example in semiconductor sensors and microelectronic systems where

the UK has made a major contribution to the LHC with tracking systems for the Atlas and CMS experiments and new light sources such as the European XFEL at Hamburg.

## Partner University of Science and Technology (AGH)

### Representative: W. Dabrowski

AGH University of Science and Technology (AGH-UST) is the second largest technical university in Poland with about 4100 employees and 36000 students. The research and teaching is carried out in 15 faculties covering a broad range of science and engineering. The R&D work in the area of radiation detectors and readout electronics is carried out by the group of Nuclear Electronics and Radiation Detection in the Faculty of Physics and Applied Computer Science at AGH. The research activity of the group includes instrumentation of physics experiments, with particular focus on the development of ASICs for the readout of radiation detectors. The infrastructure available to the group includes an ASIC and silicon detector laboratory as well as a gas detector laboratory. The group has a long-standing experience in the development of radiation resistant ASICs. They participated in the design and construction of both the Semiconductor Tracker and the Transition Radiation Tracker for the ATLAS experiment at LHC. They played a key role in development of radiation hard ASICs for the readout of silicon strip detectors. At present the group is involved actively in development of ASICs for readout of silicon strip detectors in the ATLAS detector upgrade, upgrade of the VELO detector in the LHCb experiment and in development of the forward calorimeters (FCAL) for a future linear collider.

The group carries out developments of detectors and ASICs for other applications outside the high energy physics experiments. This includes ASIC design for neutron MSGC detectors and ASICs for the GEM detector in a Proton Range Radiography instrument. In cooperation with Bruker AXS, the group has developed a silicon strip detector for X-ray diffraction, which is currently produced by Bruker AXS as LynxEye.

Based on their experience with advanced mixed-mode ASICs and various detector techniques, the group has developed successfully an advanced system for electrical stimulation and recording neural activity in live tissue, which is now routinely used in neuroscience experiments.

#### Selected Publications:

1. *A power scalable 10-bit pipeline ADC for Luminosity Detector at ILC.* Idzik M., Swientek K., Fiutowski T., Kulis S., Ambalathankandy P. *Journal of Instrumentation*, 6 P01004 2011.
2. *Application of Si-strip technology to X-ray diffraction instrumentation.* Gerndt E., Dąbrowski W., Brügemann L., Fink J., Świentek K., Wiącek P., *Nucl. Instr. and Meth. A* 624 (2010) 350-359.
3. *Switched capacitor DC-DC converter ASICs for the upgraded LHC trackers,* Bochenek M., Dabrowski W., Faccio F., Michelis S., *Journal of Instrumentation* 5 (2010) C12031.
4. *Design and performance of the ABCN-25 readout chip for ATLAS Inner Detector Upgrade,* Dąbrowski W. et al., *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, N13-39 (2009) 373-380.
5. *Energy and spatial response of silicon strip detectors to X-rays,* Wiącek P., Dąbrowski W., *Nucl. Instr. and Meth. A* 580 (2007) 1355-1362.
6. *Design and Performance of ABCD3TA ASIC for Readout of Silicon Strip Detectors in the ATLAS Semiconductor Tracker,* Dabrowski W. et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 552 (2005) 292-328.

### 3. Darstellung der wichtigsten Ziele inklusive Beiträge der Partner

Detektoren sind hochkomplexe Systeme zur Erfassung der Messdaten in den experimentellen Naturwissenschaften und der Medizin. Sie stellen die Kamera im Filmstudio des Experimentes dar und machen darüber hinaus sichtbar, was dem unbewehrten Auge entgeht. Es gibt eine Vielzahl von Detektionsprinzipien für eine ebenso große Vielzahl zu detektierender Eigenschaften, Strahlungsformen und Teilchen. Immer wieder erlauben einzelne bahnbrechende Entwicklungen den Aufbau von noch leistungsfähigeren Gesamtsystemen. Die Gründung der „Plattform für Detektortechnologie und -systeme“ ist motiviert durch die ständig steigenden Herausforderungen in der Entwicklung von Detektoren. Die Herausforderungen haben eine kritische Grenze erreicht, die einen Zusammenschluss aller Kräfte der Helmholtz-Gemeinschaft notwendig macht. Im Folgenden sind die derzeit forschungsintensivsten und vielversprechendsten, für den Detektorbau relevanten Technologiebausteine aufgeführt. Sie sind in drei Säulen gruppiert. Ein gemeinsames Ziel in der ersten Phase der Plattform ist es, die Möglichkeiten und das Potential dreidimensionaler kompakter funktionaler Strukturen für Detektoren zu demonstrieren. Der schematische Aufbau des geplanten sogenannten Helmholtz-Cubes ist in Abbildung 3.1 skizziert.

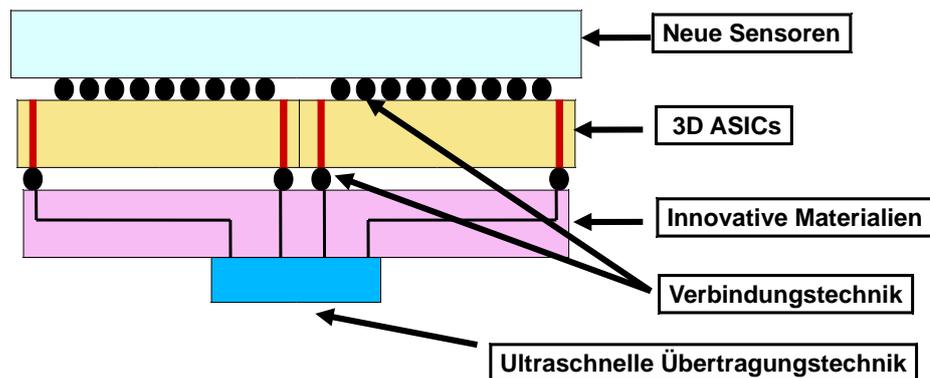


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des Helmholtz-Cubes.

#### Säule 1: Technologien zum Aufbau hochintegrierter Detektoren

Die erste Säule der Detektorplattform umfasst verschiedene aktuelle und in der Entwicklung befindliche Technologien und Verfahrensweisen zum Bau von hochintegrierten, kompakten Detektorsystemen für kommende Experimente. Dies beinhaltet neuartige Sensorbauweisen vertikalintegrierte Verbindungstechnologien mit höchster Packungsdichte sowie innovative Materialien. Die Partner innerhalb der ersten Säule werden komplette Detektorsysteme, die sogenannten Helmholtz-Cubes (Abb. 3.1), herstellen, welche die Grundlage für die weitere Entwicklung der individuellen Komponenten bilden.

#### Säule 2: Ultraschnelle Datenübertragung und –auswertung

Ziel der zweiten Säule ist die Entwicklung schneller, leistungsfähiger Datenübertragungstechnologien und Datenauslesesystemen für Experimente mit höchsten Datenraten. Der Einsatz und die vereinfachte Systementwicklung von strahlenharter, intelligenter programmierbarer Hardware ermöglicht die Datenreduktion nahe am Sensor. Darüber hinaus werden neuartige, optische Signalübertragungssysteme benötigt, um die rasant steigenden Datenmengen weiterzuleiten. Anschließend werden hochparallele digitalelektronische Architekturen verwendet, um schnelle Signalvorverarbeitungsmechanismen sowie ultraschnelle Algorithmen auf dedizierter Hardware realisieren zu können.

### Säule 3: Exemplarische Detektortypen

In der dritten Säule der Detektorplattform werden ausgewählte Detektortypen entwickelt, die aktuell enormen technologischen Herausforderungen unterliegen, gleichzeitig aber erhebliches Potential in ihrem Anwendungsgebiet versprechen. Diese inhaltlich und von ihrem Einsatzgebiet her sehr unterschiedlichen Projekte profitieren von den Technologieentwicklungen aus den ersten beiden Säulen und können ihr Potential damit exemplarisch demonstrieren.

Die Beiträge der beteiligten Zentren zu den einzelnen Themengebieten sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Neben der Aufgabenverteilung ist auch das Interesse an den einzelnen Technologiebausteinen gekennzeichnet. Eine thematische Darstellung der Aufgabenverteilung innerhalb der Arbeitspakete findet sich am Ende der jeweiligen Beschreibung.

Tabelle 3.1: Liste der Arbeitspakete und der beteiligten Zentren. Ein fettgedrucktes „X“ kennzeichnet die Leitung, ein normales „X“ die aktive Beteiligung am Arbeitspaket. Generelles Interesse ist durch ein „+“ gekennzeichnet.

		DESY	FZJ	GSI	HIJ	HIM	HZB	HZDR	HZG	KIT
<b>S1 Technologien zum Aufbau hochintegrierter Detektoren</b>										
1	3D-ASICs	<b>X</b>	+	X			+		+	X
2	Mixed-signal ASICs	X	X	<b>X</b>	X	+	+		+	X
3	3D / Hoch-Z Sensoren	X	+	+			+	+	+	<b>X</b>
4	Aufbau- und Verbindungstechnologien	X	X	X						<b>X</b>
5	Innovative Detektorstrukturmaterialien	<b>X</b>	X	X		X			+	
<b>S2 Ultraschnelle Datenübertragung und -auswertung</b>										
6	Intelligente programmierbare Hardware	X	<b>X</b>	X			X	X	X	X
7	Detektornaher optische Signalübertragung	+	X	X						<b>X</b>
8	Schnellste Datenverarbeitung mit hochparallelen Architekturen	X	+	X				X	<b>X</b>	X
<b>S3 Exemplarische Detektortypen</b>										
9	Schnelle Licht- und Röntgendetektoren	<b>X</b>	X	X		+	X	X		
10	Diamantdetektoren	X		<b>X</b>	X					X
11	Detektoren für thermische Neutronen		X				<b>X</b>		X	
12	Kompakte Gasdetektoren	<b>X</b>	+	X			+	X		

### 3.1 3D-ASICs

#### H. Graafsma (*DESY*)

Beteiligte Zentren: DESY, GSI, KIT

Relevanz des Themas und Vision:

Konventionelle anwendungsspezifische integrierte Schaltkreise (ASICs) basieren auf zweidimensionaler, planarer CMOS-Technologie, bei der sich die eigentliche Schaltung nur in den obersten 10 bis 20  $\mu\text{m}$  befindet. Der Rest des typischerweise 300 bis 700  $\mu\text{m}$  dicken Siliziumchips dient lediglich als Träger ohne elektrische Funktion.

Um Moore's Gesetz der steigenden Integrationsdichte zu folgen und mit der stetig wachsenden Geschwindigkeit Schritt halten zu können, erobert die industrielle Entwicklung die „dritte Dimension“. Die Grundidee ist, zwei oder mehr ASICs zu stapeln, direkt miteinander zu verbinden und sich gleichzeitig des weitgehend unnötigen Trägermaterials zu entledigen. Dieser Ansatz wird allgemein als 3D-ASIC-Design bezeichnet. Seine erfolgreiche Umsetzung in der Detektoreninstrumentierung wäre äußerst vorteilhaft, ja revolutionär. Es könnte nicht nur eine höhere Anzahl von Funktionen pro Chipfläche realisiert werden. Die einzelnen Schichten, „Tier“ genannt, können durch Auswahl geeigneter CMOS-Prozesse und -optionen auch individuell auf ihre Funktion (analog, digital, optisch etc.) hin optimiert werden.

Ziel des Arbeitsprogramms ist es, die technischen Möglichkeiten und die weltweiten Zugangsoptionen zu erkunden und allen Partnern zugänglich zu machen. Dahingehend werden Entwicklungswerkzeuge und Bibliotheken von den Partnern gemeinsam erstellt und genutzt. Hierdurch werden Parallelentwicklungen und Doppelarbeit vermieden. Für die ASIC-Entwickler wird die Hemmschwelle für den Eintritt in die dritte Dimension überwunden.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Das Vorhaben ist in konkrete Schritte aufgeteilt, die größtenteils parallel bearbeitet werden. Die „Through-Silicon-Via“ (TSV)-Technologie, die Durchkontaktierung des Trägermaterials, wird zuerst in Angriff genommen. Dazu können sowohl existierende, für TSV-Kontakte vorgesehene Chips wie Medipix2 und Medipix3, als auch Chips, die im Rahmen des Arbeitspakets „Mixed-signal ASICs“ entstehen, verwendet werden.

Dieser Schritt beinhaltet zunächst das Dünnschleifen (thinning), dem Entfernen eines Großteils des Trägermaterials der Wafer, und das eigentliche Prozessieren der TSVs. Beides kann durch industrielle Partner realisiert werden. Darüber hinaus muss die elektrische und mechanische Verbindung des Chips mit einer gedruckten Schaltung zur Auslese in Form eines „Ball-Grid-Arrays“ realisiert werden. Dieser letzte Schritt wird in enger Zusammenarbeit mit dem Vorhaben „Aufbau- und Verbindungstechnologien“ erfolgen. Letztendlich wird das entstandene System in den „Helmholtz-Cube“ integriert.

Parallel dazu wird ein 2-Tier 3D-ASIC entwickelt und auf einem Multi-Project Wafer (MPW) Run gefertigt. Dieser erste 3D-Chip wird als „Logic-on-Logic“ in einem Digital-CMOS Prozess Standardzellen (vom Hersteller zur Verfügung gestellte logische Gatter) nutzen und so durch die Verwendung von geprüften Bauelementen das Fehlerrisiko minimieren. Die MPW-Fertigung wird gemeinsam mit anderen nationalen und internationalen Einrichtungen, die an der 3D-Integration von ASICs arbeiten, erfolgen.

Ein wichtiges Ziel dieses Schritts ist der Test der Zuverlässigkeit und Herstellbarkeit solcher Baugruppen. Entsprechend sind Test und Charakterisierung der produzierten Komponenten ein wichtiger Bestandteil des Projekts und werden von Partnern an mehreren Instituten mit verschiedenen Techniken wie Röntgentomographie, elektrischer und optischer Untersuchung durchgeführt.

Da das Feld der 3D-Integration noch neu ist und sich rasant entwickelt, ist es unabdingbar, die weltweiten Entwicklungen kontinuierlich zu verfolgen und regelmäßig zwischen den Zentren zu kommunizieren. Ebenso ist der Austausch von Werkzeugen und Bibliotheken entscheidend für die innovative Schlagkraft der ASIC-Entwickler.

Externe Partner:

Fraunhoferinstitute IZM, Universität Bonn, CERN, NIKHEF (Niederlande), VTT (Finnland), FNAL (USA)

Aufgabenverteilung:

DESY: TSV Herstellung auf 2D-Auslesechips

DESY, GSI: Entwicklung eines 3D-ASIC, Erstellung der ASIC-Baustein- und Technologiebibliothek

DESY, GSI, KIT: Integration in den "Helmholtz-Cube", Charakterisierung und Test im Experiment

Mehrwert:

Sowohl TSVs als auch die 3D-ASIC-Entwicklung befinden sich noch im Anfangsstadium und sollten daher am besten von einem Konsortium von Helmholtz-Zentren in Angriff genommen werden. Die Ergebnisse werden allen Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft zur Verfügung stehen. Der Austausch von Entwicklungswerkzeugen und Bauteilbibliotheken führt zu einer deutlichen Kostenreduktion. Für den Test und die Analyse der produzierten Komponenten sind verschiedene Techniken und Geräte notwendig, die in den einzelnen Helmholtz-Zentren zum Teil zur Verfügung stehen. Dadurch positioniert sich die Helmholtz-Gemeinschaft an der Spitze der technologischen Entwicklung und sollte in der Lage sein, die weitere Entwicklung zu beeinflussen. Damit will die Helmholtz-Gemeinschaft auch dazu beitragen, dass Universitäten von dieser noch immer sehr teuren Technologie profitieren.

### **3.2 Mixed-signal ASICs**

#### **C. J. Schmidt (GSI)**

Beteiligte Zentren: DESY, FZJ, GSI, HIJ, KIT

Relevanz des Themas und Vision:

In der Hochenergie-, Kern- und allgemeiner Großgerätephysik wurden in den vergangenen zwei Jahrzehnten aus der Notwendigkeit heraus dedizierte Vorverstärker-Mikrochip-Entwicklungen für die Detektorauslese realisiert. Diese speziellen Chip-Entwicklungen werden heute in ihrem Charakter wesentlich generischer, weil die korrespondierenden Datenauslesestrategien der Großexperimente in einem Paradigmenwechsel generisch werden. Vordem typischerweise global getriggerte Systeme sollen nun als selbst getriggerte Systeme realisiert werden. Die anwendungsspezifischen Auslesechips (ASICs) werden somit in Zukunft rein detektorspezifisch und können erstmalig auf breiter Front Zugang zu vielen kleineren Experimentvorhaben quer durch die Helmholtz-Gemeinschaft finden.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Die stringente Integration von digitaler Auslese und Vorverstärkerelektronik in sogenannte Mixed-signal ASICs ergibt sich bei FAIR, European-XFEL und LHC aus der immer weiter steigenden Detektorkanalichte. Die resultierenden Auslesechips mit rein digitalem Ausgang können darum um so einfacher in diversen anderen Anwendungen aus den Bereichen der Synchrotronsteuerung, der Neutronensteuerung sowie der Medizin integriert und genutzt

werden. Bestehende technologische Einstiegshürden werden fallen, so dass hier zukunftsweisende Entwicklungsschübe ermöglicht und erwartet werden.

Die Vernetzung zwischen den verschiedenen Forschungsbereichen der Helmholtz-Gemeinschaft soll darum dreigleisig realisiert werden:

- Bestehende ASIC-Labore der GSI und des DESY tauschen ihre Schaltungsbausteine, Technologiemodelle sowie Simulationswerkzeuge und deren Konfigurationen untereinander über eine Bibliothek aus, von der auch neue, in Gründung befindliche ASIC-Labors am KIT und FZJ profitieren, indem sie einen direkten Einstieg in die Technologie und zu den existierenden Projekten finden.
- Neue ASIC-Entwicklungsprojekte an DESY und GSI (für FAIR) werden von vornherein auch im Hinblick auf den Einsatz in größerer Breite ausgelegt.
- ASIC-Entwicklungen, die in den neuen Labors für Anwendungen außerhalb der Kern-Teilchen- und Photonenphysik entstehen, können auch bei DESY und GSI bzw. FAIR ihren Einsatz in Bereichen finden, die alleine nicht hinreichend stark sind, um eine eigene Entwicklung zu rechtfertigen.

Als Pilotprojekt für diese neue Form der Entwicklung von detektorspezifischer Ausleseelektronik wird ein spektroskopischer Vielkanalvorverstärker entwickelt. Dieser ASIC genügt dem Bedarf von Ausleseelektronik für mehrere Anwendungen, die einzeln bislang keinen Zugang zu solcher Technologie hatten. Diese Anwendungen sind am HIJ Compton-Polarimetrie, an GSI FAIR verschiedene Kalorimeter (z.B. das CBM-Kalorimeter) und Gammasensoren, bei XFEL die Auslese verschiedener Sensoren oder am FZJ die Auslese von Szintillatoren. Im Rahmen der Detektorplattform kann dieser Chip sogleich zusammen mit den in der dritten Säule entwickelten Pixel-SiPMs verwendet werden. Dieser ASIC wird darüber hinaus in der Säule 1 zur Auslese von Vorstufen des Helmholtz-Cubes seinen Einsatz finden. Im weiteren Verlauf wird dieser Vielkanalchip zu einem Pixel-Auslesechip umkonfiguriert, der dann in der abschließenden Auslese des Helmholtz-Cubes zum Tragen kommt.

Ähnliche Projekte finden sich für Anwendungen am HZDR und am HZG sowie für die Auslese von Neutronendetektoren am HZB und FZJ und Diamantdetektoren an DESY, KIT und GSI. Sie sollen in der Folge in dieses Portfolio übernommen werden. Zentren, die nicht direkt in der Chipentwicklung beteiligt sind, arbeiten an der Integration der neuen Elektronik in ihre Detektoranwendung.

#### Externe Partner:

Universität Heidelberg mit dem ASIC-Labor des KIP und ZITI, IPHC Strasbourg, AGH Krakow, Europractice

#### Aufgabenverteilung:

DESY, GSI: Chipentwicklung

DESY, FZJ, GSI, KIT, DESY, GSI: Erstellung der ASIC Baustein- und Technologie-Bibliothek

GSI, HIJ, HIM, HZDR, HZG, HIJ: Integration des ASIC in Pilot-Anwendungen

#### Mehrwert:

ASIC-Detektorauslesetechnologie wird zahlreichen Forschungsbereichen der Helmholtz-Gemeinschaft verfügbar gemacht. Die immens hohen Einstiegsbarrieren speziell im Zugang zu dieser Technologie werden durch die Plattform gesenkt und der strategische Bereich ASIC-Design gestärkt.

### 3.3 3D/ Hoch-Z Sensoren

**M. Fiederle (KIT)**

Beteiligte Zentren: DESY, KIT

Relevanz des Themas und Vision:

Die Sensoren sind die Schlüsselkomponenten im Detektorsystem. Die Anforderungen an einen „idealen“ Sensor sind vielfältig und werden durch die spezifische Anwendung bestimmt, wobei die Effizienz immer eine signifikante Rolle spielt. Für den Nachweis von Röntgen- und Gammastrahlung ist die Nachweiseffizienz wesentlich durch die Höhe der Kernladungszahl  $Z$  des Sensormaterials bestimmt. Die Entwicklung von effizienten, dreidimensionalen und hoch-Z Sensoren ist eine fundamentale Voraussetzung für den Einsatz in vielen Bereichen wie z.B. zur Erforschung von kondensierter Materie an Synchrotronquellen, für Experimente an Teilchenbeschleunigern, der medizinischen Computertomographie, der zerstörungsfreien Materialprüfung (NDT) oder zur Überwachung von radioaktiven Stoffen.

Die erforderlichen Technologien unterscheiden sich deutlich von den Standardherstellungsverfahren für planare Siliziumsensoren. Alle Bereiche in der Herstellungskette müssen an die Anforderungen des Verbindungshalbleiters wie z.B. Prozesstemperatur, Passivierung oder Kontaktaufbau angepasst und optimiert werden. Neben der Planartechnologie ist die Prozesstechnologie für dreidimensionale Sensorstrukturen ein aktuelles Forschungsthema. Solche Strukturen werden zur Steigerung der Strahlungshärte wie auch bei 3D-aktiven Siliziumdetektoren und zur Fertigung von „randlosen“ Sensoren zur Realisierung von großen Detektorflächen eingesetzt.

Die genannten Sensortechnologien sollen für die beteiligten Partner in der Helmholtz-Gemeinschaft erarbeitet und für vielfältige Anwendungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Das Arbeitspaket hat zwei Schwerpunkte: 1. Die Herstellung von Sensoren auf der Basis des Verbindungshalbleiters CdZnTe. 2. Die Erarbeitung von Technologien für die Realisierung von 3D-Sensoren. Ziel ist die Anpassung von effizienten Sensoren an den Helmholtz-Cube für ein hochauflösendes Detektorsystem.

#### 1. Multichipmodul auf der Basis von CdZnTe

Zum Nachweis von Röntgen- bzw. Gammastrahlung mit Energien über 20 keV werden Verbindungshalbleiter wie CdZnTe oder GaAs benötigt, die eine hohe Nachweiseffizienz besitzen. Diese Sensoren bieten neben der hohen Effizienz den Vorteil, auch bei Raumtemperatur ohne kryogene Kühlung betrieben werden zu können. Zusätzlich zu den hochaufgelösten Ortsinformationen können energieaufgelöste Messungen durchgeführt werden. Der Einsatz solcher Sensoren erfordert zunächst die Entwicklung der Materialien, der entsprechenden Prozesstechnologie und der Verbindungstechnik sowie darauf die Integration der Sensoren in das Detektorsystem. Diese Technologie unterscheidet sich sehr von der Siliziumtechnologie. Neben Einzelsensoren für Testmessungen und einer Optimierung der Technologie werden für den anwendungsnahen Einsatz großflächige Pixeldetektoren, so genannte Multichipmodule, benötigt.

Als konkretes Arbeitsziel ist daher die Entwicklung des Helmholtz-Cube auf der Basis des Medipix3 mit einem CdZnTe-Sensor vorgesehen. Der gesamte Sensor hat eine aktive Detektorfläche von  $28 \times 86 \text{ mm}^2$  und 792.000 Pixeln mit einer Ortsauflösung von  $55 \mu\text{m}$ . Als Detektorsystem wird die LAMDA-Entwicklung des DESY genutzt und an das Sensormaterial angepasst. Mehrere Systeme werden den beteiligten Gruppen zur Verfügung gestellt, um das Anwendungspotential des Helmholtz-Cubes zu erschließen.

## 2. 3D-Sensor-Technologie

Im zweiten Teil des Arbeitspaketes werden die Technologien für die Erstellung von 3D-aktiven Sensoren entwickelt. Die 3D-Technologie soll hier sowohl für Silizium- wie für CdZnTe-Sensoren mit verbesserter Effizienz und randloser Geometrie eingesetzt werden. Damit wird die Grundlage für zukünftige großflächige Detektorsysteme gelegt. In erster Linie werden Ätzverfahren und Schneidetechniken untersucht und eine Optimierung der Prozesse angestrebt. Intensive Messreihen der Sensoren werden an unterschiedlichen Strahlenquellen realisiert.

### Externe Partner:

Freiburger Materialforschungszentrum der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

### Aufgabenverteilung:

DESY: Entwicklung der 3D-Prozesse für Silizium und Testmessungen

KIT: Entwicklung der 3D-Prozesse für CdZnTe-Sensoren, Prozessierung und Herstellung von CdZnTe-Sensoren

### Mehrwert:

Die neu entwickelten Sensoren und die Prozesstechnologie werden für die Herstellung von innovativen Detektorsystemen in verschiedenen Forschungsbereichen zur Verfügung stehen. Insbesondere wird der im Rahmen der Detektorplattform entwickelte Helmholtz-Cube eine ideale Plattform bilden, um diese zukunftsweisenden Detektoren umfassend integrieren und testen zu können.

## 3.4 Aufbau- und Verbindungstechnologien

### **T. Blank (KIT)**

Beteiligte Zentren: DESY, FZJ, GSI, KIT

### Relevanz des Themas und Vision:

Die Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) trägt in erheblichem Maß zur erfolgreichen Detektorintegration bei. Die Leistungsfähigkeit der AVT hat selbst unmittelbar messbaren Einfluss auf die Ergebnisse der physikalischen Experimente, geht meist aber mit einem gehörigen Aufwand an Investitionen und hervorragendem Personal einher. Doch erst der Überblick über technologisch mögliche AVT-Konzepte sowie die Verfügbarkeit der damit verbundenen Geräte ermöglicht es, zielführende und optimierte Systemkonzepte für leistungsfähige Detektoren in der frühen Projektphase zu erstellen und in Konstruktionen umzusetzen. Im Rahmen der Erweiterung des Helmholtz-Portfolios für Detektortechnologien soll durch eine exzellente Vernetzung der Zentren KIT, DESY, GSI und FZJ im Bereich der AVT dazu beigetragen werden, zuverlässige, preiswerte und darüber hinaus technologisch zukunftsweisende Detektorsysteme mit höchsten technischen Anforderungen in der Helmholtz-Gemeinschaft realisieren zu können.

### Konkrete Ziele und Vorhaben:

Innerhalb der ersten sechs Monate wird eine gemeinsame Bestandsaufnahme der technologischen Stärken und Schwächen der einzelnen Zentren erfolgen, um Synergiepotenziale zu identifizieren und Know-how auszutauschen. Weiterhin dient die Zustandsanalyse der AVT-Kompetenzen der Zentren dazu, Aufbaukonzepte für den im Vorhaben umzusetzenden Helmholtz-Cube zu entwickeln.

Bei den bereits identifizierten Schlüsseltechnologien für den Aufbau des Helmholtz-Cubes handelt es sich um: Flip-Chip-Technologien mit kleinen Bumps (<40 µm),

Chipstapelverfahren, Chip-to-Wafer-Bonding, das bumpless Wafer-Bonding und Substrattechnologien.

Rund 18 Monate nach Projektbeginn werden das KIT und DESY Flip-Chip-Technologien an ihren Zentren evaluiert und etabliert haben, mit deren Hilfe Chips mit kleinen Bumps zuverlässig und preiswert verarbeitet werden können. Das DESY nimmt dabei Solder Ball Jet Technologien in sein Portfolio auf und etabliert die komplette Prozesskette. Das KIT verfolgt zunächst die Herstellung von Bumps mit einem Hochgeschwindigkeits-Gold Bump Bonder. Diese Technologie wird auch für CVD-Diamantsensoren evaluiert. Die GSI befasst sich mit der bumpless Sensorintegration für CVD-Diamant- und CdZnTe-Sensoren.

Das KIT wird nach rund 36 Monaten Prozesstechnologien für den Umgang mit ultradünnen Chips evaluiert und den Aufbau vertikaler Chipstapel erprobt haben. Die Verbindungen unter den Chips erfolgen sowohl mit Flip-Chip- als auch mit klassischen Drahtbond-Technologien.

Alle beteiligten Partner bauen gemeinsam die ersten Demonstratoren des Helmholtz-Cubes auf. Das FZJ begleitet die verschiedenen Projektvorhaben, indem es für die geplanten Projektaktivitäten thermodynamische und strukturmechanische Auslegungsrechnungen durchführt. Außerdem stellt das FZJ seine weltweit führende Kompetenz auf dem Gebiet der Verbindungstechnologie (Lötprozesse etc.) und zur Prüfung der Verbindungen (Echtzeit-CT etc.) zur Verfügung, um die Fertigungsabläufe zu optimieren.

Daneben wird sich die AVT Gruppe regelmäßig treffen, um durch Austausch die Qualität der Detektorfertigungstechnologie innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft voranzutreiben.

#### Aufgabenverteilung:

DESY: Solder Ball Jet-Verfahren und Flip-Chip mit Lötverfahren

FZJ: Auslegungsrechnungen und Experimente zu den erforderlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften, Entwicklung von Fertigungstechnologien, Optimierung der Fertigungsabläufe.

GSI: Aufbau- und Verbindungstechnologie für innovative Detektormaterialien (Diamant, CdZnTe)

KIT: Hochgeschwindigkeits-Gold-Bumping (>20 Bumps/sec.) und Drahtbonden, Flip-Chip-Prozesse und Lötverfahren, Evaluierung obiger Prozesse für innovative Detektormaterialien (Diamant, CdZnTe).

#### Mehrwert:

- Austausch von Know-how
- Erschließung und Bereitstellung von Fertigungsprozessen
- Erhöhung der Prozessstabilität und Zuverlässigkeit
- Beschleunigte Prozesseinführung und Kostenreduktion
- Größere Prozessvielfalt für innovative Systeme mit Spezialmaterialien

### **3.5 Innovative Detektorstrukturmaterialien**

#### **A. Mussgiller (DESY)**

Beteiligte Zentren: DESY, FZJ, GSI, HIM

#### Relevanz des Themas und Vision:

In Zukunft wird bei den Anforderungen an Detektorsysteme in der Kern- und Teilchenphysik ein starkes Gewicht auf der Reduktion von passivem Material und damit der Vergrößerung

der Strahlungslänge liegen. Ein vielversprechender Lösungsweg ist die Verwendung von multifunktionalen Materialien – also Materialien, die mehrere Funktionen zugleich erfüllen. Zu erwähnen sind hier beispielsweise Leiterplattensubstrate mit verbesserten mechanischen Eigenschaften oder hoher Wärmeleitfähigkeit.

#### Konkrete Ziele und Vorhaben:

Im Rahmen des Arbeitspakets „Innovative Detektorstrukturmaterialien“ sollen neuartige Materialien auf ihre Verwendbarkeit in zukünftigen Detektorsystemen untersucht und in Bezug auf ihre mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften hin charakterisiert werden.

Im Bereich der Gasdetektoren sucht und entwickelt man Strukturmaterialien, die eine optimierte Volumenleitfähigkeit besitzen und zur Erzeugung großvolumiger homogener elektrischer Felder genutzt werden können. Die Feld erzeugenden Strukturen sollen dabei sowohl über die nötige mechanische Stabilität verfügen als auch als Träger für elektronische Bauelemente und Baugruppen dienen. Ziel des Vorhabens ist es, einen Prototypdetektor zu entwickeln, der neben der mechanischen Stabilität auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt, um eine effiziente Kühlung zu gewährleisten. Im Rahmen der dritten Säule werden die gewonnen Erkenntnisse in Prototypen für Gasdetektoren einfließen.

Die zunehmende Granularität halbleiterbasierter Spurdetektoren führt zwangsweise zu vermehrtem Einsatz von Klebungen und Sandwich-Konstruktionen. Darüber hinaus bieten Sandwich-Strukturen auch das Potential, die Strahlungslänge der Detektoren deutlich zu vergrößern. Aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der konventionellen Materialien und den für zukünftige Detektormodule angestrebten Betriebstemperaturen von ca.  $-20^{\circ}\text{C}$  kann es aber zu unerwünschten Spannungen und Verformungen kommen. Diese Spannungen haben zudem eine verringerte Lebensdauer der Sensoren zur Folge.

Untersucht werden soll der Einsatz von Materialien mit einstellbaren Wärmeausdehnungskoeffizienten, die innerhalb einer Sandwich-Konstruktion so aufeinander abgestimmt sind, dass thermische Spannungen reduziert werden und damit ein Langzeitbetrieb über viele Thermozyklen gewährleistet ist. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in das Layout eines Prototypmoduls und des Helmholtz-Cubes eingehen, mit denen man die Herstellung solcher Detektoren und deren Betriebsverhalten über einen längeren Zeitraum eingehend studieren kann.

#### Aufgabenverteilung:

- DESY: Bestimmung der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Teststrukturen. Bau und Charakterisierung eines Detektormodulprototyps
- FZJ: Auslegung der notwendigen thermischen und mechanischen Eigenschaften von Teststrukturen und deren experimentelle Prüfung. Entwicklung, Fertigung und Zusammenbau geeigneter Layouts für Detektormodulprototypen
- GSI: Auslegung und Bestimmung der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Teststrukturen, Bau und Charakterisierung eines Detektormodulprototyps und dessen experimenteller Einsatz
- HIM: Finite-Elemente-Analysen zur Auslegung der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Teststrukturen. Test von Detektormodulprototypen mit Elektronen bzw. Photonen bis zu 1,5 GeV

#### Mehrwert:

Die Infrastruktur und die Kompetenzen von GSI, FZJ, HIM und DESY sollen intensiver vernetzt und weiterentwickelt werden. Es ist außerdem beabsichtigt, die gewonnenen Erkenntnisse auch in die immer relevanter werdenden Boundary-Element-, Finite-Elemente- und Computational-Fluid-Dynamics-Analysen einfließen zu lassen und sowohl zentren- als

auch themenübergreifend zur Verfügung zu stellen. Die engen Verflechtungen zum Arbeitspaket Aufbau- und Verbindungstechnologien sind gewollt und führen zu weiteren Synergieeffekten.

### **3.6 Intelligente programmierbare Hardware**

#### **T. Stockmanns (FZJ)**

Beteiligte Zentren: DESY, FZJ, GSI, HZB, HZDR, HZG, KIT

Relevanz des Themas und Vision:

Intelligente programmierbare Hardware kombiniert die Geschwindigkeit von festverdrahteten Hardwareschaltungen mit der Flexibilität von Softwareprogrammen. Sie ist eine unverzichtbare Komponente für nahezu alle Datenerfassungssysteme. In Zukunft ist es wünschenswert, programmierbare Elemente auch direkt am Detektor einzusetzen („Der programmierbare Detektor“). Dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten, Detektordaten vorzuverarbeiten, zu selektieren (Trigger-on-Detector) und zu komprimieren, um damit Datenübertragungsraten zu realisieren, wie sie für zukünftige Experimente notwendig sind. In Kombination mit der detektornahen optischen Datenübertragung und der Verwendung schneller Datenverarbeitungsalgorithmen ist zu erwarten, dass sie das Rückgrat moderner Hochratenexperimente bilden.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, intelligente, programmierbare Hardware ebenfalls in Detektorbereichen mit hoher Strahlenbelastung einsetzen zu können. Hierzu sind folgende Entwicklungsschritte geplant: Vernetzung der beteiligten Gruppen unter Einbeziehung externer Ergebnisse, Test der existierenden Hardware auf Strahlentoleranz, Entwicklung und Test von Korrekturalgorithmen, sowie die Pflege eines engen Kontaktes mit den Herstellern.

Da die Programmierung von Systemen basierend auf intelligenter programmierbarer Hardware komplex, langwierig und teurer ist, wird angestrebt die Entwicklung zu vereinfachen. Dies gilt für den Einsatz am Detektor als auch die konventionelle DAQ und wird von allen Zentren als äußerst wichtig erachtet. Die Nutzung von Synergien zwischen den Zentren bietet enormes Potential die Entwicklungszeiten und -kosten drastisch zu reduzieren. Es ist geplant, existierende Systeme zu evaluieren und den Bedarf an zukünftigen Anwendungen festzustellen, gemeinsame Standards festzulegen und gegebenenfalls an Anwendungsgebiete anzupassen sowie ein gemeinsames Basissystem zu entwickeln.

Um die Programmierung der Systeme zu vereinfachen, sollen folgende Punkte bearbeitet werden: Zusammenstellung von in den Zentren bereits entwickelten Funktionsmodulen (so genannter IP-Cores) und Bereitstellung in der Helmholtz-Gemeinschaft, Standardisierung von Schnittstellen und Modularisierung von Programmteilen, gemeinsame Entwicklung von weiteren benötigten IP-Cores, Festlegung gemeinsamer Entwicklungswerkzeugen, gemeinsame Beschaffung von Lizenzen für Entwicklungssoftware und IP-Cores sowie die Evaluierung neuer Hochsprachen.

Zur Optimierung der Kommunikation zwischen den Entwicklern werden Ansprechpartner in den Zentren festgelegt, Arbeitsgebiete gesammelt, Datenbanken der unterschiedlichen Projekte eingerichtet, Kommunikationsplattformen aufgebaut, gemeinsame Workshops und Schulungen organisiert und gemeinsame Projekte festgelegt und realisiert.

Externe Partner:

AGH Krakow

### Aufgabenverteilung:

Alle Zentren beteiligen sich aktiv an der Vernetzung der einzelnen Entwicklergruppen und arbeiten gemeinsam an der Festlegung von Standards und Entwicklungswerkzeugen. Zusätzlich übernehmen die einzelnen Zentren noch folgende Aufgaben:

- DESY: Evaluation neuer FPGA-Architekturen. Gemeinsam mit KIT: Evaluierung neuer Hochsprachen, Bestimmung der speziellen Anforderungen und Entwicklung standardisierter Systeme für Anwendungen im Bereich Synchrotronstrahlung.
- FZJ: Bestimmung der speziellen Anforderungen und Entwicklung standardisierter Systeme für Anwendungen im Bereich Hadronenstreuung und Neutronenphysik, Entwicklung und Test von Algorithmen zur Verbesserung der Strahlentoleranz, Koordinierung der Vernetzung der Zentren
- GSI: Bereitstellung von Bestrahlungsplätzen mit der Möglichkeit einer 2D-Mikrorasterung von ASICs oder FPGAs zur systematischen Bestimmung strahleninduzierten Fehlverhaltens
- HZB: Bereitstellen eines Messplatzes zum Testen von Hardwarekomponenten am Zyklotron und der Co-Quelle des HZB. Entwicklung eines gemeinsamen Basissystems mit Demonstrator in Richtung Delay-Line-Auslese für zweidimensionale Neutronen- und Röntgendetektoren.
- HZDR: In Zusammenarbeit mit erfahrenen FPGA-, DSP- und CPLD-Entwicklern werden Schulungen für Einsteiger mit dem Schwerpunkt Entwicklung im Physik und Medizin Umfeld erarbeitet.
- HZG: Unterstützung für die anwendungsnahe Realisierung und Test von Hardwarekomponenten an Synchrotronstrahlungs- und Neutronenmessplätzen des HZG am DESY und FRM II.
- KIT: Methoden zur Erhöhung der Strahlentoleranz. Gemeinsam mit DESY: Evaluierung neuer Hochsprachen und Bestimmung der speziell notwendigen Anforderungen sowie Entwicklung standardisierter Systeme für Anwendungen im Bereich der Synchrotronstrahlung.

### Mehrwert:

Das Potential von intelligenter programmierbarer Hardware ist gewaltig. Durch diesen Themenschwerpunkt wird es den Helmholtz-Zentren ermöglicht, Anschluss an die schnell voranschreitende Entwicklung in diesem Bereich zu halten, neue Einsatzgebiete zu erschließen sowie vorhandene Ressourcen effektiver zu nutzen.

## **3.7 Detektornahe optische Signalübertragung**

### **M. Schneider (KIT)**

Beteiligte Zentren: FZJ, GSI, KIT

### Relevanz des Themas und Vision:

Zukünftige Detektoren der Teilchenphysik werden mehrere Millionen oder nahezu eine Milliarde elektronische Kanäle besitzen. Mit elektrischen Leitungen ist es unmöglich, die produzierte Datenmenge in die Außenwelt zu transportieren. Hier bieten optische Leitungen eine 1000-fach höhere Übertragungsbandbreite (Terabit/s), geringere Dämpfung, geringeren Energiebedarf (pJ/bit), eine galvanische Trennung und nicht zuletzt eine wesentlich geringere Masse. Zur Übertragung sollen extrem energiesparende elektrooptische Modulatoren eingesetzt werden. Das zu modulierende Licht wird außerhalb des Detektors erzeugt und

verursacht innerhalb des Detektors keine Verlustleistung. Ferner könnten solche Modulatoren mit Anpassungselektronik und Verstärkern monolithisch integriert werden.

#### Konkrete Ziele und Vorhaben:

Üblicherweise erfolgt eine optische Datenübertragung digital mit direkt modulierten Halbleiterlasern. Dazu werden die Ausgangssignale der Detektoren in einem detektornahen ASIC digitalisiert und mit einem Laser in ein optisches Signal umgewandelt. Dagegen können durch die Nutzung von elektrooptischen Modulatoren, die die elektrischen Signale auf eine von außen zugeführte, kontinuierliche Lichtwelle aufmodulieren, Energieeinsparungen von mehr als drei Größenordnungen erzielt werden. Die vorgesehenen Modulatoren werden aus Silizium in einem CMOS-kompatiblen Prozess hergestellt und können jeweils über 40 Gigabit/s übertragen. Mit komplexeren Modulationsverfahren und in einem Wellenlängenmultiplex können eine Vielzahl solcher Kanäle über eine einzelne Glasfaser übertragen werden. Stand der Technik sind 325 Wellenlängenkanäle mit jeweils 80 Gigabit/s, in Summe 26 Terabit/s, über eine Strecke von 50 km. Bei dieser Übertragungsbandbreite können in jedem einzelnen optischen Wellenlängenkanal eine Vielzahl von Detektorkanälen digital gemultiplext werden. Insgesamt bedeutet das eine wesentliche Einsparung von Datenleitungen und eventuell auch von Stromzuführungen und Kühlrohren, wodurch sich weniger Masse im Detektor befindet und die Auflösung durch verminderte Vielfachstreuung steigt.

Aber auch eine analoge Übertragung der Detektorsignale ist denkbar. Dabei besteht der Auslesechip nur noch aus einer einfachen Schaltung zur Anpassung der Detektorsignale an den Modulator. Die Analog-Digital-Wandlung der Detektorsignale geschieht außerhalb des Detektors. Bei einer geeigneten Auslegung des Modulators könnte sogar auf die Anpassungsschaltung zwischen Detektor und Modulator vollständig verzichtet und der Modulator direkt mit den Detektorsignalen angesteuert werden, bis hin zum vollständig optischen Teilchendetektor.

Ziel des Arbeitspakets ist es, die bestehenden Modulatoren auf ihre Strahlenhärte zu untersuchen und sie gegebenenfalls strahlenhart zu machen. Für eine analoge Übertragung müssen die Auflösung, Genauigkeit, Störsicherheit und Stabilität untersucht werden. Anschließend sollen sie mit ASICs kombiniert, später monolithisch integriert werden. Zur Steigerung der Integrationsdichte werden Konzepte mit mehreren Modulatoren und den dazu notwendigen Wellenleiterbauelementen wie z.B. Wellenlängenmultiplexer entwickelt und realisiert. Zum Abschluss soll ein vielkanaliger, monolithisch integrierter Auslesechip sowie ein direkt an einen Detektor angebundener Modulator ohne Anpassungsschaltung realisiert werden.

#### Aufgabenverteilung:

- FZJ: Unterstützung Übertragungsprotokoll/-format für optische Übertragung, Unterstützung Anpassungselektronik für analoge optische Übertragung.
- GSI: Strahlenhärte tests von optischen und optoelektronischen Komponenten, ASIC-Entwicklung für Modulatoransteuerung, Designunterstützung für strahlenharte Komponenten.
- KIT: Entwicklung und Herstellung von elektrooptischen Modulatoren und Wellenleiterbauelementen, Faser-Chip-Kopplung, Aufbau von Multi-Chip-Modulen, monolithische Integration.

#### Mehrwert:

Aktuellste Entwicklungen der optischen Kommunikationstechnik werden für den Bau von Detektoren verfügbar gemacht, mit direkter Teilnahme am Entwicklungsprozess. Die Komponenten können dabei auf die speziellen Anforderungen im Umfeld eines Detektor-Front-Ends abgestimmt und optimiert werden. Die üblichen Nachteile fertiger Komponenten, die für völlig andere Anwendungen entwickelt wurden, fallen so weg.

### **3.8 Schnellste Datenverarbeitung mit hochparallelen Architekturen**

**F. Beckmann (HZG)**

Beteiligte Zentren: DESY, GSI, HZDR, HZG, KIT

Relevanz des Themas und Vision:

Moderne Detektoren erzeugen sehr große Datenmengen, die entweder bereits am Detektor vorverarbeitet oder mit großer Geschwindigkeit ausgelesen und effizient und schnell verarbeitet werden müssen. Dieses Arbeitspaket beschäftigt sich mit der Optimierung der Analyse von Daten komplexer Netzwerke mehrdimensionaler Detektoren, wie sie z.B. im Bereich der Medizin und Materialwissenschaft, aber ganz besonders auch im Bereich der Grundlagenforschung zunehmend wichtig werden. Eine bedeutende Entwicklungsaufgabe zum Betrieb solcher Systeme ist die konkrete Implementierung von Signalvorverarbeitungsmechanismen, die zu einer effizienten Datenreduktion führen. Kern dieses Arbeitspaketes ist aber die ultraschnelle Datenanalyse und -rekonstruktion mit Hilfe dedizierter Hardware und standardisierter Softwarepakete, auf der die Daten asynchron mittels hochgradig parallelisierter Algorithmen verarbeitet werden. Es werden Algorithmen und Werkzeuge bereitgestellt, mit denen solche Methoden effizient bei einer großen Gruppe von Experimenten eingesetzt werden können. Darüber hinaus sollen auch konkrete Anwendungen, z.B. für die Medizintechnik, entwickelt und umgesetzt werden.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Das Projekt unterteilt sich in drei Abschnitte:

- Bestandsaufnahme der in den Rechenzentren der Institute zur Verfügung stehenden Rechnerarchitekturen und Bewertung von kommerziell erhältlicher Hardware für hochparallele Datennahme und Datenauswertung. Einigung auf eine gemeinsame Technologieplattform.
- Adaptierung vorhandener und Entwicklung neuer, optimierter Algorithmen für die gemeinsame Technologieplattform. Aufbau einer Bibliothek für ausgewählte mathematische Problemstellungen.
- Prototypische Implementierung der Algorithmen für ausgesuchte Detektorsysteme und Bestimmung der maximal realisierbaren Datenraten sowie der Analysegeschwindigkeit für reale Experimente.

Aufgabenverteilung:

DESY, GSI, HZDR, HZG, KIT: Definition und Bewertung dedizierter Hardware

DESY, GSI, HZDR, HZG, KIT: Aufbau einer Algorithmenbibliothek

GSI, HZDR, HZG: Anwendung auf ausgewählte Detektorsysteme

Mehrwert:

Die vorgeschlagene Technologieplattform für schnellste Datenverarbeitung sowie die geplanten gemeinsamen Bibliotheken werden ihre Schlagkraft über die Anwendung im Rahmen der Detektorinitiative unter Beweis stellen können. Durch die angestrebte Vernetzung und Arbeitsteilung zwischen den aktiven Zentren wird ein erheblicher Synergiegewinn erwartet. Wissenschaftliches Rechnen auf massiv paralleler Hardware, wie zum Beispiel den neuen Generationen von sehr leistungsfähigen Graphikprozessoren, steht erst am Anfang einer Entwicklung in eine parallele Rechnerwelt hin zu Multicore-Systemen. Die Detektorinitiative wird auch durch ihre Software-Aktivitäten auf diesem Gebiet zur Sichtbarkeit der Helmholtz-Gemeinschaft als Technologietreiber beitragen.

### 3.9 Schnelle Licht- und Röntgendetektoren

#### F. Sefkow (DESY)

Beteiligte Zentren: DESY, FZJ, GSI, HZB, HZDR

Relevanz des Themas und Vision:

SiPMs sind schnelle siliziumbasierte Pixel-Photodioden mit intrinsischer Verstärkung für sichtbares Licht und weiche Röntgenstrahlung. Die relativ junge Technologie – die ersten kommerziell erhältlichen Sensoren kamen erst vor fünf Jahren auf den Markt – hat sich ein breites Spektrum von Anwendungen erobert. Dies reicht von der Astro-, Teilchen-, Kern- und Atomphysik über die medizinische Diagnostik bis hin zu Anwendungen in der inneren Sicherheit. Bei geplanten oder im Bau befindlichen Szintillationsdetektoren der Hochenergie- und Schwerionenphysik ersetzen SiPMs zusehends die traditionellen Photonenvervielfacher. Die Anwendungen verlangen nach kleineren Pixeln mit hohem sensitiven Flächenanteil, größeren Sensorflächen und niedrigerem Rauschen. Dies treibt einerseits die Entwicklung der Sensortechnologien bei Partnern in der Industrie und in der MPG voran, andererseits verspricht die Anwendung moderner 3D-Verbindungstechniken zur Integration von Sensor und Ausleseelektronik, das Potential der Detektoren noch wesentlich zu steigern und weitere Anwendungen, z.B. als Spurdetektor oder Strahlmonitor, zu erschließen.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Im Rahmen der Portfolio-Erweiterung sollen die sich ergänzenden Entwicklungskompetenzen und Infrastrukturen bei DESY, FZJ, GSI, HZB und HZDR stärker vernetzt, weiter ausgebaut und durch apparative Einrichtungen ergänzt werden. Die Intention ist, dadurch von den aktuellen Entwicklungen bei hochfeinen 3D-Verbindungs- und Integrationstechnologien zu profitieren. Konkret sollen digitale SiPMs entwickelt werden, also Sensoren oder Sensor-Arrays, deren Pixelsignale einzeln direkt in digitale Auslesechips eingekoppelt werden. Die Vorteile sind Ortsinformation, Einzelpixelrauschunterdrückung, schnelle Signalverarbeitung und geringe Leistungsaufnahme. Die technologischen Voraussetzungen sind im Prinzip gegeben, aber die mit industriellem Standard zur Zeit erreichbaren Pixelabstände sind eine Größenordnung zu hoch und machen eigene Entwicklungen erforderlich. Dabei kann zunächst an die bump-ball bonding Verfahren zur Fertigung der Pixeldetektoren für die LHC-Experimente angeknüpft werden, später sollen auch lithographische Methoden eingesetzt werden

Diese Entwicklungen sollen letztendlich zu einem im Geiger-Modus betriebenen Photosensor mit hoher intrinsischer Verstärkung (ca.  $10^6$ ), einer aktiven Fläche von einigen  $\text{mm}^2$ , unterteilt in unabhängig digital ausgelesene Pixel mit einer Größe von  $20\ \mu\text{m}$  führen. Dieser ist für die Auslese von Szintillationsdetektoren, wie z.B. in segmentierten Kalorimetern, bereits direkt geeignet. Die Zeitauflösung sollte zudem besser als  $100\ \text{ps}$  sein, wie für Flugzeitsysteme und Cerenkov-Ring-Detektoren mit halbleiterbasierter Auslese gefordert. Der Sensor soll mittels 3D-Technologie mit dem Auslesechip integriert werden und eine möglichst randlose Geometrie haben. Damit könnte er für Anwendungen, bei denen größere aktive Flächen benötigt werden, wie z.B. für Experimente mit Synchrotronstrahlung, nahtlos zu Arrays zusammengesetzt werden.

Der Sensor selbst, die Verbindungstechnik und die Ausleseelektronik können parallel entwickelt und unabhängig getestet werden. Die ersten Sensor- und Chipprototypen sollen noch größere Pixel haben, die nach den derzeitigen Standardverfahren der Halbleiterindustrie verbunden werden können.

Externe Partner:

Max-Planck-Institut für Physik, München, Universitäten Aachen, Universität Heidelberg, Universität Wuppertal, Universität Hamburg

Aufgabenverteilung:

- DESY: Entwicklung des aktiven Sensors in enger Zusammenarbeit mit dem MPI für Physik, München, Test der Komponenten, Weiterentwicklung der Verbindungstechnologie (gemeinsam mit Geräteherstellern) zu kleineren Pixelabständen. Die apparativen Voraussetzungen dafür sollen im Rahmen der ersten Säule dieser Portfolioerweiterung gestärkt werden.
- FZJ: Untersuchung des Einsatzes in hohen Magnetfeldern, wie sie für die medizinische Diagnostik verwendet werden (Nutzung bestehender Anlagen)
- GSI: Entwicklung von Methoden zur frontend-nahen schnellen Signalverarbeitung für kernphysikalische Detektorsysteme. Nutzung bestehender Testumgebungen, um insbesondere das Temperaturverhalten der Detektoren und ihre Strahlhärte zu studieren.
- HZB: Entwicklung eines fertigen UHV-kompatiblen Detektionssystems aus den neuen Sensoren. Gemeinsam mit dem HZDR Entwicklung eines mobilen Testsystems für die Charakterisierung der Detektoren mit den in der Helmholtz-Gemeinschaft zur Verfügung stehenden Quellen von ultrakurzen Röntgenpulsen (HZB, FLASH, HZDR).
- HZDR: Charakterisierung des ultraschnellen Zeitverhaltens der Sensoren in einem breiten Spektralbereich. Einsatz des Elektronenbeschleunigers mit seinen sehr kurzen Pulsen. In Dresden kann außerdem auf die Ausstattung des Halbleiterlabors und auf die Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit industriellen Partnern zurückgegriffen werden.

Mehrwert:

Die Aufgabenverteilung reflektiert insgesamt die an den Standorten bereits bestehende Infrastruktur und Expertise. Mit den beantragten zusätzlichen Mitteln werden an allen beteiligten Zentren die Voraussetzungen geschaffen, diese direkt und nachhaltig zu erweitern, um die innovative 3D-Technologie anwenden und für die eigenen Forschungen weiter optimieren zu können.

### **3.10 Diamantdetektoren**

#### **E. Berdermann (GSI)**

Beteiligte Zentren: DESY, GSI, HIJ, KIT

Relevanz des Themas und Vision:

Die stetig wachsende Strahlintensität und Brillanz der modernen Beschleunigeranlagen und Synchrotronstrahlungsquellen erfordern strahlenharte, ultraschnelle, raumtemperaturtaugliche Detektoren kleiner Masse und Kernladungszahl als Ersatz oder Ergänzung für klassische Sensoren, die an ihre Leistungsgrenzen stoßen. Deshalb sollen Detektoren der nächsten Generation aus einkristallinem CVD-Diamantmaterial erforscht und entwickelt werden. Solche Sensoren wären als Spurdetektoren nahe am Wechselwirkungspunkt, als Startdetektoren und für das Strahlmonitoring im Moment konkurrenzlos.

### Konkrete Ziele und Vorhaben:

Die Entwicklung großflächiger Diamantdetektoren hoher Strahlungshärte und Positionsempfindlichkeit erfolgt parallel in zwei Teilbereichen.

- Sensoren aus freistehenden Platten aus Diamond-on-Iridium (DOI) mit strukturierten Elektroden in Parallelplattengeometrie, ausgelesen mit rauscharmen ASICs großer Bandbreite.
- Monolithische Diamant-Pixel-Detektoren via Silicon-Chip-on-Diamond bonding.

Bislang wurden zwei Arten von Diamantsensoren untersucht und eingesetzt: a) große, inhomogene, polykristalline Platten (gewachsen auf Silizium) reduzierter Ladungssammelfeffizienz, aber ausgezeichneter Zeitauflösung und Zählratenkapazität sowie b) kleine einkristalline Scheibchen mit exzellenter Zeit- und Energieauflösung, die homoepitaktisch auf kleine Hochdruck-Hochtemperatur Diamantsubstrate gewachsen werden.

Größere 'quasi-Einkristalle' können durch Heteroepitaxie auf Iridium gewonnen werden. Die Universität Augsburg ist eines der weltweit führenden Institute in der Herstellung von DOI-Schichten. Das DOI-Material der Universität Augsburg wird im Rahmen der Detektorplattform an den beteiligten Zentren mit verschiedenen Methoden charakterisiert und das Potential aktueller Detektordesigns und der Ausleseelektronik ausgelotet. Auf dem Weg zu ultradünnen 2D-Detektoren werden neben neuen Auslesetechniken auch 3D-Geometrien untersucht. Erste Studien an Diamantproben wurden in Saclay und am CERN initiiert. Parallel dazu entwickelt das INFN/Florenz eine vielversprechende Technik für die Verbindung der Diamantsensoren mit den Auslesechips, die wir mitverfolgen wollen (laser-enhanced Silicon-Chip-on-Diamond).

### Externe Partner:

Universität Augsburg, INFN und Universität Florenz (Italien), CEA-LIST Saclay (Frankreich)

### Aufgabenverteilung:

DESY: Charakterisierung des DOI-Materials

GSI: Entwicklung der Ausleseelektronik und von Auslesetechnologien, Charakterisierung des Diamantmaterials

HIJ: Strahltests der Diamantdetektoren

KIT: Bestrahlungen und Charakterisierung der Strahlenhärte

### Mehrwert:

Die beteiligten Zentren gehören zu den wenigen europäischen Institutionen mit langjähriger Erfahrung in Entwicklung und Betrieb von Diamantdetektoren. Das ist ein Vorsprung der innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft erhalten und ausgebaut werden soll. Durch die gesetzten Ziele entstehen natürliche Synergien mit anderen Arbeitspaketen, insbesondere mit Säule 1. Die Ergebnisse sind gleichzeitig wichtige Beiträge für viele Bereiche der Gesellschaft, wie z.B. die Elektronikindustrie, Medizin, Biologie, Raumfahrt und Energiegewinnung.

### 3.11 Detektoren für thermische Neutronen

**Th. Wilpert (HZB)**

Beteiligte Zentren: FZJ, HZB, HZG

Relevanz des Themas und Vision:

Durch die Verknappung des Standardneutronenkonverters  $^3\text{He}$ , einem Abfallprodukt der Anfang der 1990er Jahre eingestellten militärischen Tritium-Produktion, sind massive Probleme entstanden. Die weltweit jährlich zur Verfügung stehende Menge an  $^3\text{He}$  reicht weder zur Bedarfsdeckung der Neutronenstreuexperimente noch für den Zivilschutz. Alternative Nachweistechnologien sind für Neutronenstreuexperimente mit großen aktiven Flächen (2 bis 50 m<sup>2</sup>) zwingend erforderlich. Dabei ist die Substitution des klassischen Neutronenkonverters  $^3\text{He}$  die dominierende Herausforderung bei der technologischen Konzeption neuer Neutronendetektoren.

Konkrete Ziele und Vorhaben:

Erfolgversprechende Alternativen, die im Rahmen des Portfolioprogramms bearbeitet werden sollen sind a) verbesserte Szintillationsmaterialien und b)  $\text{BF}_3$ -Detektoren mit optimierter Gasverstärkung, Entwicklung benötigter Sicherheitstechnik sowie c)  $^{10}\text{B}$ -Dünnschicht-Konverterdetektoren.

Derzeit gibt es zwei Szintillationsmaterialien die standardmäßig eingesetzt werden:  $^6\text{Li}$ -Glas in Angerkameras und  $^6\text{LiF/ZnS}$ , ausgelesen mit einer orthogonalen Anordnung von Wellenlängenschieber-Fasern (WLSF). Beide Szintillationsmaterialien genügen momentan nicht den Anforderungen. Gründe sind sehr hohe Materialkosten und Gamma-Empfindlichkeit bei  $^6\text{Li}$ -Glas bzw. die starke Opazität und daher eine geringe Nachweiseffizienz von  $^6\text{LiF/ZnS}$ . Die bisherigen Szintillator-Mischungen von  $^6\text{LiF/ZnS}$  verwenden Konvertermaterial mit Korngrößen von einigen  $\mu\text{m}$  Durchmesser. Zur Steigerung der Effizienz und Lichtausbeute sollen neue Mischungen entwickelt werden, die mit den Methoden heutiger Nanotechnologien nanokristalline Substanzen mit Korngrößen von 1 bis 30 nm ermöglichen. Die dadurch bedingte geringere Lichtstreuung innerhalb des Szintillators erhöht die Transparenz des Materials, wodurch höhere Schichtdicken und damit höhere Nachweiseffizienzen möglich werden.

Bei der Nutzung von  $^{10}\text{BF}_3$  muss der kleinere Wirkungsquerschnitt von  $^{10}\text{B}$  gegenüber  $^3\text{He}$  kompensiert werden, was durch die druckbegrenzende starke Elektronegativität des Gases  $\text{BF}_3$  erschwert wird. Im Vordergrund steht daher eine Vervielfachung der Auslesekanäle, um die Effizienz durch eine größere Detektionstiefe zu erhöhen. Durch Unterteilung in separat auslesbare Zellen wird die benötigte Flugzeitauflösung sichergestellt und gleichzeitig die Driftstrecke der freigesetzten Elektronen verkürzt und somit Verluste aufgrund von Anlagerung am  $\text{BF}_3$  reduziert. Zusätzlich sollen die Gasverstärkungseigenschaften durch Beimischung weiterer Gase optimiert werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Entwicklung geeigneter Sicherheitssysteme, die der starken Toxizität von  $^{10}\text{BF}_3$  Rechnung tragen und den gefahrarmen, großvolumigen Einsatz ermöglichen.

Das HZG entwickelt bereits im Rahmen der „Mitwirkung der Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft und der Technischen Universität München an der Design-Update-Phase der ESS“ spezielle Neutronendetektoren mit dünnen Konverterschichten, in denen Neutronen in extrem schräg gestellten,  $^{10}\text{B}$ -haltigen Konverterschichten (sog. inclined geometry) absorbiert werden. Die Konverterschichten haben eine Schichtdicke von ca. 1  $\mu\text{m}$ , damit die beim Neutroneneinfang gebildeten Sekundärionen aus der Konverterschicht austreten und im Nachweisgas Ionisationsspuren erzeugen können. Im Rahmen dieses Portfoliothemas wird in den Prototyp des  $^{10}\text{B}$ -Konverterdetektors eine Auslesetechnologie für bisher nicht erreichbare Datenraten integriert, die auf der ASIC-Entwicklung im Portfoliothema beruht. Mit dieser extrem schnellen Datenauslese gewinnt diese Detektortechnologie auch ein hohes

Potential für harte Synchrotronstrahlung, wenn der  $^{10}\text{B}$ -Konverter durch einen hoch-Z-Konverter ersetzt wird.

#### Aufgabenverteilung:

- FZJ: Szintillatorproben von LiF/ZnS-Szintillatoren mit nanokristallinem ZnS (Größe ca. 1  $\text{cm}^2$ ) in verschiedenen Mischungsverhältnissen, Charakterisierung der Lichtausbeute und Nachweisschwindigkeit sowie Optimierung der Mischungsverhältnisse
- HZB: Aufbau eines Prototypen-Detektors für  $^{10}\text{BF}_3$  zur Optimierung der Gasverstärkungseigenschaften. Entwicklung von Sicherheitssystemen für  $^{10}\text{BF}_3$ -Detektoren.
- HZG: Integration einer Auslesetechnologie in  $^{10}\text{B}$ -Dünnschicht-Konverterdetektoren für bisher nicht erreichbare Datenraten, die auf der ASIC-Entwicklung im Portfoliothema beruht

#### Mehrwert:

Eine verbesserte Vernetzung der beteiligten Labore, die Intensivierung des Austauschs von Know-how, die Entwicklung von standardisierten Testprozeduren und die gemeinsame Nutzung von Testeinrichtungen verbreitern die Basis der Helmholtz-Gemeinschaft auf dem Gebiet der Forschung mit Neutronen. Die Helmholtz-Gemeinschaft ist mit dem FZJ, HZB und HZG sowohl Betreiber als auch Nutzer von Neutronenquellen mit den dazugehörigen Instrumentenparks. Von den erarbeiteten Lösungen zur  $^3\text{He}$ -Krise, die zu neuen Konvertertechnologien mit erwartbaren Effizienzsteigerungen führen, profitieren unmittelbar alle Nutzer dieser Quellen. Dieses Arbeitspaket wird auch für die Entwicklung von Detektoren für das Aufspüren von spaltbarem Material an den nationalen Grenzen einen wichtigen Beitrag liefern.

### **3.12 Kompakte Gasdetektoren**

#### **T. Behnke (DESY)**

Beteiligte Zentren: DESY, GSI, HZDR

#### Relevanz des Themas und Vision:

Neben Halbleiterdetektoren spielen gasgefüllte Detektoren eine zentrale Rolle in vielen Experimenten, weil sie die einzige Detektortechnologie darstellen, mit der große Detektorvolumina mit moderaten Kanalzahlen realisiert werden können und damit die Kosten für Ausleseelektronik auf das Notwendigste begrenzt wird. In den letzten Jahren haben mikrostrukturierte Systeme zur Gasverstärkung rapide an Bedeutung gewonnen und die traditionellen drahtbasierten Systeme in vielen Anwendungen verdrängt. Die Mikrostrukturierung der Gasverstärkungsstrukturen ist der einzige Weg, den rapide zunehmenden Anforderungen an die Ratentauglichkeit und Auflösung genügen können.

Gas-Electron Multipliers (GEM) realisieren eine solche mikrostrukturierte Verstärkungsstruktur, die bereits vielfältig eingesetzt wird. In ihrem Aufbau und der Materialwahl sind aber Verbesserungen wünschenswert. Ziel des Programmes ist es, diese neuartigen Strukturen weiterzuentwickeln und für leichte, aber gleichzeitig robuste und kompakte Detektoren einsatzfähig zu machen. Ein weiterer Fokus des Programmes ist die Entwicklung neuer Materialien, die in gasgefüllten Detektoren zum Einsatz kommen. Diese zeichnen sich durch sehr spezielle elektrische Eigenschaften aus.

#### Konkrete Ziele und Vorhaben:

Ein GEM besteht aus einer dünnen Folie, die beidseitig mit einem leitfähigen Material und mit einem regelmäßigen Muster von Löchern versehen ist. Bei Anlegen einer Spannung zwischen den beiden Seiten bildet sich ein sehr hohes elektrisches Feld in den Löchern,

welches eine exponentielle Signalverstärkung bewirkt. Ein zentraler Teil jedes GEM Detektors ist damit die Folie, eine kritische Herausforderung die Herstellung dieser Folie. Dabei ist man bestrebt, bei der Produktion der GEM-Folien auf bewährte industrielle Fertigungsmethoden zurückgreifen zu können. Zukünftige Experimente erfordern den massiven Einsatz großflächiger Folien mit Abmessungen im Bereich von 1 bis 2 m Kantenlänge aus Materialien mit sehr hoher Abschwächungslänge. Die etablierte Technik, basierend auf einer Polyimidfolie mit Kupferbeschichtung, stößt hier an ihre Grenzen. Deshalb sollen alternative Methoden entwickelt werden, z.B. basierend auf höher kristallinem Polyimid und Aluminium anstelle von Kupfer. Mittelfristig sollen Wege untersucht werden, die GEM-Systeme nicht als separate Foliensysteme zu verwirklichen, sondern mittels lithographischer Methoden eine GEM-artige Struktur direkt auf der Auslesestruktur aufzubauen. Hierbei werden Techniken zum Einsatz kommen, die üblicherweise beim post-processing von Siliziumwafern verwendet werden. Zwar sind die grundlegenden Techniken etabliert, die Anwendung auf ein System wie ein GEM jedoch nicht erforscht.

Neben der Entwicklung von konkreten Gasverstärkungssystemen spielen Materialien in gasgefüllten Detektoren eine zentrale Rolle. Häufig ist die Anwendung von Materialien, die eine definierte und geringe Leitfähigkeit besitzen, essentiell. Insbesondere bei der Herstellung von Ausleseanoden, wie sie z. Bsp. in einem GEM-System, aber auch in anderen Systemen, wie z.B. Resistive-Plate Counter, verwendet werden, finden solche Materialien Verwendung. Neuere Entwicklungen deuten an, dass es möglich sein sollte, Keramiken zu entwickeln, die diese Anforderungen ebenso erfüllen. Ziel dieses Teils des Vorhabens ist es, solche Materialien systematisch herzustellen und zu untersuchen und damit letztendlich ihr Einsatz in einem gasgefüllten Detektor.

#### Aufgabenverteilung:

DESY: Entwicklung und Test von GEM-Verstärkungssystemen, Einsatz insbesondere in Zeitprojektionskammern. DESY verfügt über eine umfangreiche Testinfrastruktur, die für die im Rahmen des Programmes entwickelten Verstärkungssysteme verwendet wird. Ein besonderes Interesse des DESY ist es, ein integriertes GEM Modul zu entwickeln, entweder basierend auf leichten GEMs oder auf integrierten GEMs.

GSI: Entwicklung und Test von GEM-Verstärkungsstrukturen, Einsatz insbesondere im Bereich der Zeitprojektionskammern. GSI verfügt über umfangreiche Erfahrung in der Entwicklung von GEMs zusammen mit dem CERN. Ein besonderes Interesse der GSI ist es, ein integriertes GEM Modul zu entwickeln und zu testen.

HZDR: Rossendorf entwickelt seit Jahren RPC Detektoren und hat erhebliches Wissen im Bereich neuartiger Materialien mit definierter Leitfähigkeit aufgebaut. Rossendorf wird dieses Wissen in die Entwicklung neuartiger Gasverstärkungssysteme einbringen. Das HZDR verfügt über einen einzigartigen Detektorteststand für Untersuchungen von Detektoren mit hoher Zeitauflösung und variabler Zählrate am supraleitenden Elektronenbeschleuniger ELBE.

#### Mehrwert:

DESY und die GSI forschen seit Jahren im Bereich der GEM-Detektoren. Durch eine intensiviertere Zusammenarbeit im Rahmen der Detektorplattform werden deutliche Fortschritte in der Entwicklung neuer GEM-Technologien erwartet und generell die Rolle der Helmholtz-Gemeinschaft in diesem Bereich massiv gestärkt. HZDR bringt seine erhebliche Kompetenz im Bereich der Materialwissenschaften ein und erlaubt damit der Aktivität, deutlich innovativer zu werden.

#### Externe Partner:

Universität Bonn, NIKHEF, CERN, Fraunhofer Institut IKTS Dresden

## 4. Querschnittssäule

Die gezielte Weitergabe der Kompetenzen des Fachbereiches „Struktur der Materie“ an andere Gesellschaftsbereiche im Sinne der Mission der Helmholtz-Gemeinschaft ist ein großes Anliegen der Plattform. Deshalb wird neben den drei technischen Säulen eine übergreifende Querschnittssäule eingerichtet, an der sich alle Zentren beteiligen.

Die Aufgabe der Querschnittssäule ist zum einen die Eruiierung von vielversprechenden Anwendungsfeldern und der Technologietransfer außerhalb des Fachbereichs. Gleichzeitig sollen die Zusammenarbeit, die Kommunikation und die Vernetzung zwischen den Fachbereichen der Helmholtz-Gemeinschaft intensiviert werden. Mit Hilfe von Experten-Workshops sollen die zukünftigen Anforderungen an detektornahen Technologien außerhalb des Fachbereichs identifiziert und quantifiziert werden. Dies impliziert die systematische Suche nach interdisziplinären programmübergreifenden Kooperationsmöglichkeiten zwischen den Fachbereichen der Helmholtz-Gemeinschaft. Ebenso soll mit akademischen und industriellen Partnern kooperiert werden. Die technischen Kompetenzen der Plattform sollen in geeigneten Broschüren, Informationsveranstaltungen, Workshops und Messen sichtbar und verständlich kommuniziert werden. Ein weiteres Ziel ist die Zweitverwertung der Ergebnisse der Plattform in konkrete Produkte und Patente. Bei allen genannten Aktivitäten sollen die Technologietransferabteilungen der Zentren aktiv eingebunden werden.

Besonders vielversprechende Einsatzbereiche für Detektortechnologie sind die zerstörungsfreie Materialprüfung, die innere Sicherheit und die Medizin. Zur Illustration sind im Folgenden einige Anwendungsbeispiele aufgeführt.

### **Dosismonitoring für die Ionenstrahltherapie**

Um die therapeutischen Vorteile der aufkommenden Ionenbestrahlungsanlagen für maligne Tumore optimal nutzen zu können, ist das Monitoring dieser Bestrahlungen erforderlich. Eine neue und aussichtsreiche technische Lösung dafür ist die Comptonkamera. Mehrere Arbeitsbereiche der Detektorinitiative erarbeiten die notwendigen Technologien: So werden Sensoren mit hoher Ordnungszahl, zum Beispiel dem Halbleiter CdZnTe, in großer Stückzahl und hoher Qualität benötigt. Weitere zentrale Elemente für eine effiziente Kamera sind die auf den Detektor abgestimmte Aufbau- und Verbindungstechnik, hochauflösende, hochsensitive, rausch- und verbrauchsarme Front-End-ASICs sowie die digitale Datenverarbeitung.

### **Reduzierte Strahlenbelastung für die Computertomographie**

Für die nächste Generation der Computertomographie werden Detektorsysteme untersucht, die sowohl Informationen über den Ort der Wechselwirkung als auch zusätzlich über die Energie der Röntgenphotonen liefern. Die spektroskopische Bildgebung mit mehreren Energiefenstern ermöglicht in Kombination mit effektiven Halbleitersensoren und schneller Elektronik Bilder mit hohem Kontrast bei reduzierter Strahlenbelastung für den Patienten. Zur Realisierung werden Technologien für Detektoren mit einer sehr hohen Ortsauflösung im Bereich von Mikrometern und hoher Effizienz sowie eine schnelle Ausleseelektronik benötigt. Diese Geräte werden dazu beitragen, unter anderem die Diagnostik von Multipler Sklerose, Hirnveränderungen und Tumoren im Frühstadium zu verbessern.

### **Ultraschall-Computertomographie**

Die neuartige 3D-Ultraschall-Computertomographie für die Brustkrebsfrüherkennung reduziert die sonst bei der Mammographie übliche Strahlenbelastung erheblich und besticht durch hochauflösende Bilder im Submillimeterbereich. Der Erfolg des Verfahrens hängt zentral von der Qualität der Ultraschalltransducer und damit der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der nachgeordneten Signalverarbeitung ab. Ein einsatzfähiges Verfahren benötigt eine immense Rechenleistung für die komplexen Bildrekonstruktionsverfahren.

### **Zerstörungsfreie Materialanalyse mit Positronenlebensdauerspektroskopie**

Die gammainduzierte Positronenlebensdauerspektroskopie ermöglicht hochauflösende, zerstörungsfreie Analysen. Es wird beabsichtigt, mit dieser Methode für die Materialforschung orts aufgelöste Lebensdauer messungen zu entwickeln. Hierzu werden Photonendetektoren mit hoher Zeitaufösung benötigt. Führende Flugzeitentwicklungen basieren derzeit auf der Kopplung monolithischer Szintillatoren mit SiPMs, die ein Schwerpunkt in der dritten Säule „Detektortypen“ der Detektorinitiative darstellen.

### **Innere Sicherheit**

Zum Aufspüren von spaltbarem Material an den nationalen Grenzen besteht der Bedarf an günstigen und einfach zu handhabenden Neutronendetektoren. Basierend auf den Ergebnissen des Arbeitspaketes „Detektoren für thermische Neutronen“ sowie den von den anderen Arbeitsbereichen bereitgestellten Technologien zur Datenverarbeitung ist zu erwarten auch für diese Anforderungen verbesserte Messinstrumente und -methoden bereitstellen zu können.

### Konkrete Ziele und Vorhaben:

- Systematische Ermittlung des bestehenden und zukünftigen Bedarfs an Detektoren und detektornaher Elektronik außerhalb des Fachbereichs „Struktur der Materie“
- Zusammenstellung der fachlichen Expertise, aktive Analyse und Identifikation von Kooperationsmöglichkeiten
- Organisation von Workshops und Treffen zum Erfahrungs- und Ideenaustausch sowie der Vorstellung von aktuellen Forschungsergebnissen

## 5. Arbeitsprogramm und Zusammenarbeit der Partner

Die Detektorinitiative beabsichtigt, die Infrastruktur in den beteiligten Zentren zu bündeln und Austausch und Kommunikation zu intensivieren. Gleichzeitig werden neue Technologien in den Zentren erforscht und etabliert. In Tabelle 5.1 sind die wichtigsten organisatorischen und technischen Meilensteine zusammengefasst. Das Arbeitsprogramm ist bewusst so angelegt, dass richtungweisende Ergebnisse nach Möglichkeit schon in der ersten Hälfte des Projektzeitraums bis Mitte 2013 vorliegen.

Tabelle 5.1: Vereinfachte Übersicht des Arbeitsprogramms und der wichtigsten Meilensteine

		2012	2013	2014	
<b>S1 Technologien zum Aufbau hochintegrierter Detektoren</b>					
1	TSV mit existierende ASICs	X			
2	Vorlage 1. Multi (2) -Tier ASIC		X		
3	Vorlage des finalen multi-tier ASICs				X
4	Helmholtz-Cube: CdZnTe-Sensor, Hardware		X		
5	Helmholtz-Cube: 3D-Sensor Technologie: Report				X
6	Auswahl der AVT für 2. Prototypen des Helmholtz-Cube	X			
7	1. Prototyp des Helmholtz-Cube		X		
8	2. Prototyp des Helmholtz-Cube				X
9	Vorlage des finalen Designs für den Prototypen eines Silizium-detektormoduls	X			
10	Vollständige Charakterisierung und Betrieb des Siliziumdetektor-moduls		X		
<b>S2 Ultraschnelle Datenübertragung und -auswertung</b>					
11	Organisation eines gemeinsamen Entwickler-Workshops	X			
12	Aufbau einer gemeinsamen IP-Datenbank		X		
13	Test der Strahlentoleranz existierender FPGAs			X	
14	Entwurf eines gemeinsamen Basis-Systems				X
15	Prototyp einer analogen optischen Übertragungsstrecke	X			
16	Monolithisch integrierter Auslesechip mit optischer Signalübertragung				X
17	Bericht der vorhandenen Rechnerarchitekturen der Zentren	X			
18	Prototyp einer gemeinsamen Technologieplattform		X		
<b>S3 Exemplarische Detektortypen</b>					
19	Erster Sensorprototyp eines SiPM mit Einzelpixelauslese	X			
20	Sensorprototyp mit feingranularer Pixelstruktur und Test der Einzelpixelauslese				X
21	Bau und Test eines doppelseitigen Diamantstreifendetektors samt Breitbandverstärker	X			
22	Großflächiger 3 cm x 3 cm DOI-Diamant		X		
23	Bau und Test eines Nanometer- <sup>6</sup> LiF gefüllten Szintillators		X		
24	Charakterisierung eines Neutronendetektorprototyps		X		
25	Test einer ASIC-basierten Auslese im <sup>10</sup> B-Konverterdetektor				X
26	Vorstudie: GEM-Strukturen aus alternativen Materialien, technologische Optionen	X			
27	Integriertes GEM Gasverstärkungs- und Detektorauslesemodul			X	
<b>Querschnittssäule</b>					
28	Aufbau einer „Knowledge-base“, die an den einzelnen Zentren verfügbare Techniken erfasst	X			
29	Workshops mit den Zielen, Entwicklungen vorzustellen und Anwendungen zu identifizieren	X	X		X

Die Detektorplattform besteht aus den in Abbildung 5.1 gezeigten Organen: Die Plattform wird getragen von der Mitgliederversammlung (collaboration board), dem höchsten Entscheidungsgremium und stellt sich regelmäßig dem fachkundigen Urteil des wissenschaftlichen Beirats (advisory board). Im Beirat sind unter anderem die externen Partner vertreten. Der Koordinationsausschuss (executive board) wird durch den Sprecher und die Verantwortlichen der technologischen Säulen und der Querschnittssäule gebildet. Dem Ausschuss obliegt die Koordination, Repräsentation und auch die thematische Weiterentwicklung des Gesamtvorhabens. Die technischen Arbeitspakete sind, wie in den Kapiteln 1 und 3 dargestellt, in drei Säulen sowie den Querschnitt untergliedert. Die Bereiche werden durch je einen Sprecher koordiniert, der gleichzeitig dem Koordinationsausschuss angehört.

Zentrale Elemente der Zusammenarbeit sind regelmäßige Kollaborationstreffen, auf denen der aktuelle Stand der Detektortechnologie vorgestellt und das weitere Vorgehen geplant wird. Die Treffen werden durch thematische Telefonkonferenzen und Workshops zu speziellen Themen ergänzt. Diese stehen den genannten Partnern, aber auch anderen Interessierten offen. Sie sollen zu einer weithin sichtbaren Kompetenz der Helmholtz-Gemeinschaft im Bereich moderner Detektortechnologie beitragen. Der Austausch von Programmen, IP-Cores aber auch von Informations- und Schulungsmaterial wird über gemeinsame Kollaborationsplattformen realisiert.

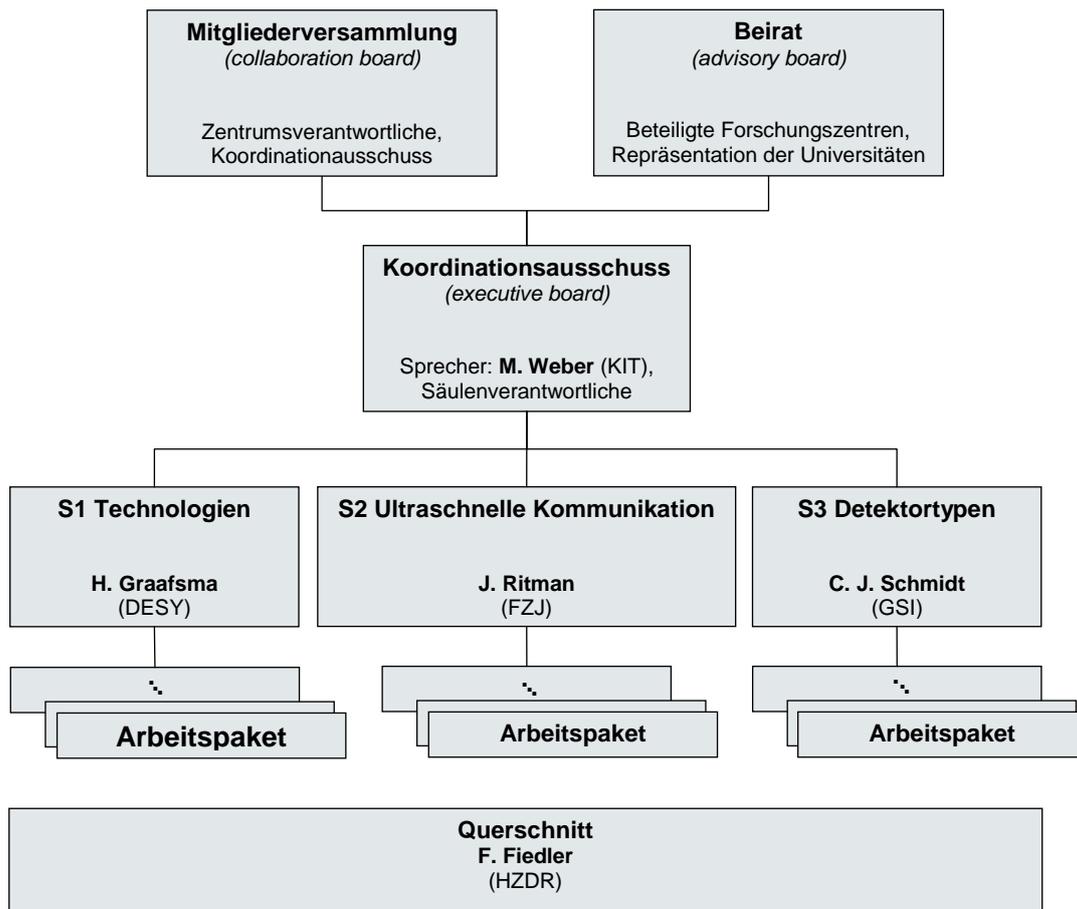


Bild 5.1: Organisation der Detektorplattform

## 6. Beantragte Mittel

Die Gesamthöhe der beantragten Mittel in den Jahren 2012 bis 2014 ist durch den Portfolioprozess vorgegeben.

Die Verteilung der Kosten auf die beteiligten Zentren wurde unter Berücksichtigung der Zentrumsbeteiligung an den Arbeitspaketen und dem aufgebrachtten Eigenanteil der Zentren vorgenommen. Insgesamt liegt der Eigenanteil der Zentren in der Höhe der beantragten Gesamtmittel. Die Mittel verteilen sich ungefähr in dem Verhältnis 2/1/1 auf die technischen Säulen 1, 2 und 3.

Zur Abwicklung größerer gemeinsamer Ausgaben, die der gesamten Plattform zugute kommen, wird ein „Common Fund“ von mindestens 350 k€ eingerichtet. Anschaffungen aus dem Common Fund werden bei dem Koordinationsausschuss beantragt und von der Mitgliederversammlung beschlossen.

### 6.1 Beantragte Gesamtmittel für das Portfoliothema „Detector Technology and Systems Platform“ (auf Kostenbasis inkl. Overhead)

<b>Beantragte Gesamtkosten für das Thema „Detector Technology and Systems Platform“</b> (Angaben in T €)					
	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Beantragte Kosten</b>	1000	3000	3000	6500	6500
davon Personalkosten	700	2100	2100	4550	4550
davon Sachkosten	300	900	900	1950	1950
davon Abschreibungen für Investitionen	0	0	0	0	0

### 6.2 Vorgesehene Verteilung der Mittel auf die beteiligten Zentren

<b>Vorgesehene Verteilung der beantragten Kosten auf die beteiligten Zentren</b> (Angaben in T €)					
	2012	2013	2014	2015	2016
DESY	210	625	625		
FZJ	145	430	430		
GSI	155	465	465		
HIJ	20	65	65		
HIM	5	20	20		
HZB	70	215	215		
HZDR	110	320	320		
HZG	70	215	215		
KIT	215	645	645		
<b>Summe beantragte Kosten</b>	<b>1000</b>	<b>3000</b>	<b>3000</b>		

Die Mittelverteilung der Jahre 2015 und 2016 auf die Zentren wird auf Grundlage der Verteilung des Vorjahres 2014 auf den jährlichen Gesamtbetrag von 6,5 Mio EUR skaliert. Dieser Verteilungsschlüssel ist als Richtlinie zu verstehen, die den Forschungsergebnissen der Vorjahre und den aktuellen Zentrumsprioritäten angepasst werden wird. Die flexible Aktualisierung der Technologieschwerpunkte ist erklärtes Ziel und eine Stärke der Plattform.

Wesentliche Änderungen in den Jahren 2015 und 2016 sind ein deutlich vergrößerter Common Fund von 0,5 Mio. EUR/a und weitere Mittel, die explizit für Kooperationsprojekte mit den Universitätspartnern vorgesehen sind und den Universitätsgruppen zugutekommen sollen. Diese Mittel werden im Wettbewerb zwischen den Projekten durch die Mitgliederversammlung zugeteilt.

## 6.3 Beantragte Mittel auf Ausgabenbasis

<b>Überleitung der beantragten Kosten in Ausgaben</b>					
<b>(Angaben in T €)</b>					
	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>
<b>Beantragte Kosten DESY</b>	111	724	625		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben DESY</b>	111	724	625		
<b>Beantragte Kosten FZJ</b>	111	464	430		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben FZJ</b>	111	464	430		
<b>Beantragte Kosten GSI</b>	333	397	550		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben GSI</b>	333	397	550		
<b>Beantragte Kosten HZB</b>	111	174	215		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben HZB</b>	111	174	215		
<b>Beantragte Kosten HZDR</b>	111	319	320		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben HZDR</b>	111	319	320		
<b>Beantragte Kosten HZG</b>	111	174	215		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben HZG</b>	111	174	215		
<b>Beantragte Kosten KIT</b>	111	749	645		
- Nichtausgabewirksame Kosten (Abschreibungen)	0	0	0		
+ Investitionen	0	0	0		
<b>= Ausgaben KIT</b>	111	749	645		
<b>Gesamtsumme Ausgaben des Portfoliothemas</b>	999	3001	3000		

\* Inkl. der an die externen Partner weiterzuleitenden Beiträge

Erläuterung: Mit der 3. Programmperiode sollen die über die Portfoliothemen eingeworbenen Mittel in die Grundfinanzierung der beteiligten Helmholtz-Zentren überführt werden. Bis zu einem Drittel der Mittel für die Portfoliothemen können im Antragszeitraum 2012-2016 an die beteiligten Partnerhochschulen weitergegeben werden. Von diesen Partnerhochschulen werden zusätzliche Eigenbeiträge in mindestens derselben Höhe erwartet. Formal erhalten die Hochschulen die Mittel von den beteiligten Helmholtz-Zentren. Nach Ablauf der Förderperiode verbleiben diese Mittel dann in voller Höhe in der Grundfinanzierung der beteiligten Zentren.