PETRA IV.

3D-Röntgenmikroskop der Superlative

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Inhaltsverzeichnis

03 **Vorwort**
Zukunftsprojekt PETRA IV

04 **Globale Herausforderungen**
Entwicklungen möglich machen

06 **Lösungen für Zukunftsfragen**
Wissenschaftliche Fortschritte wagen

08 **Energieforschung**
Nachhaltige Materialien entwickeln

10 **Gesundheit**
Krankheiten bekämpfen

12 **Transport und Technologie**
Mobilität neu gestalten

14 **Erde und Umwelt**
Ressourcen erhalten und nutzen

16 **Neue Technologien**
Digitalisierung voranbringen

18 **Ultimatives 3D-Röntgenmikroskop**
Werkzeug für Forschung und Innovation

20 **Forschungsgerät der Superlative**
Grenzen der Forschung mit Röntgenlicht verschieben

22 **Forschung am starken Standort**
Internationale Strahlkraft

24 **Industrienutzung**
PETRA IV als Technologietreiber

26 **Ausblick**
Strategie für die Zukunft

Prof. Helmut Dosch
Vorsitzender des
DESY-Direktoriums

Zukunftsprojekt PETRA IV

Wie wir drängende Zukunftsfragen lösen, ist eine der großen Herausforderungen unserer Zeit. Neue Materialien und Wirkstoffe spielen dabei eine wichtige Rolle. Sie müssen intelligenter und leistungsfähiger sein als heutige rohstoffbasierte Materialien. Zukünftige Entwicklungen nutzen Sonnenlicht wirkungsvoll, stellen Kraftstoff aus Wasserspaltung oder Kohlendioxid-Recycling her und sind die Basis für eine CO_2-freundliche Energieversorgung sowie umweltschonende Transport- und Informationssysteme. In Maschinen und Zellen steuern sie chemische Prozesse auf molekularer Ebene. Auch in der Wirkstoffforschung werden molekulare Konzepte neue Chancen für die Medizin im Kampf gegen Infektionskrankheiten oder Krebs eröffnen.

Die Eigenschaften geeigneter Substanzen und Materialien lassen sich jedoch vielfach nur auf Nanoebene untersuchen und steuern. Das erfordert eine neue Generation von Photonenquellen mit analytischen Fähigkeiten, die bisher nicht vorstellbar waren. Mit dem 3D-Röntgenmikroskop PETRA IV stellt sich Deutschland dieser Herausforderung. Die neue Synchrotronstrahlungsquelle bei DESY wird die Röntgenbildgebung revolutionieren: Mit PETRA IV können Forschende erstmals einzelne Objekte im Nanometerbereich beleuchten und die Struktur, Energetik und Funktion molekularer Einheiten in Materialien und Zellen unter realistischen Betriebs- und Umgebungsbedingungen erfassen. Die Anlage soll auf dem DESY-Forschungscampus in Hamburg-Bahrenfeld innerhalb des vorhandenen PETRA III-Ringtunnels gebaut werden und 2027 in Betrieb gehen.

Die Experimentierbedingungen an PETRA IV sind besonders attraktiv für Materialforschung und Strukturbiologie. Sie werden aber auch völlig neue Möglichkeiten für Nano- und Geowissenschaften, Planetenforschung und die Erforschung der Eigenschaften und Prozesse in Wasser schaffen. Das auf dem DESY-Campus geplante interdisziplinäre Zentrum für Molekulare Wasserforschung (CMWS) wird – neben dem Zentrum für Infektionsforschung (CSSB), dem Zentrum für Forschung mit Röntgenlicht und Nanowissenschaften (CXNS) sowie dem Hamburger Standort des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) – das analytische Potenzial von PETRA IV voll ausschöpfen.

In das Design von PETRA IV ist neben den Anforderungen von Forschungsgruppen auch der künftige Bedarf aus der Hightech-Industrie eingeflossen. Bereits in dieser Konzeption zeigt sich, wie DESY das neue Forschungsgroßgerät PETRA IV am Wissenschaftsstandort Deutschland positionieren will.

Helmut Dosch
Vorsitzender des DESY-Direktoriums

Bild: Rüdiger Nehmzow, DESY

Globale gesellschaftliche Herausforderungen

Unsere Gesellschaft steht heute vor globalen Herausforderungen wie dem Klimawandel, der nachhaltigen Energieversorgung und Ressourcennutzung, der Digitalisierung und Mobilität oder der Therapie bislang unheilbarer Krankheiten. Hier sind dringend Lösungen gefragt. Dabei ist Grundlagenforschung der wichtigste Weg, wirklich innovative Lösungen zu entwickeln.

Mit dem 3D-Röntgenmikroskop PETRA IV schafft DESY ein einzigartiges analytisches Werkzeug, um notwendige Einblicke und Entwicklungen zu ermöglichen, die es für entscheidende wissenschaftliche Fortschritte braucht.

Beitrag zu Nachhaltigkeitszielen

Als Zentrum der Helmholtz-Gemeinschaft forscht DESY in Bereichen, deren Programme sich an den großen und drängenden Fragen der Gesellschaft orientieren. Dazu zählen Energieforschung, Gesundheit, Transport und Technologie, Erde und Umwelt sowie Neue Technologien. Das Forschungszentrum hat dabei auch die Entwicklungsziele der Vereinten Nationen im Blick, die als Meilenstein internationaler Nachhaltigkeitspolitik 2015 verabschiedet wurden. Für viele dieser „Sustainable Development Goals“ (SDGs) ist die Forschung an PETRA IV relevant – wie beispielsweise für „Gesundheit und Wohlergehen“ oder „Bezahlbare und saubere Energie“.

Prof. Otmar Wiestler
Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft

„PETRA IV ist eine bedeutende Investition in unsere Zukunft: Das einzigartige 3D-Röntgenmikroskop wird uns völlig neue Einblicke in die Struktur von Materie erlauben. Damit leistet es einen besonders eindrucksvollen Beitrag zur Mission der Helmholtz-Gemeinschaft – große Herausforderungen angehen und damit die Grundlagen für wissenschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen schaffen.“

Mit der Forschung in diesen Bereichen leistet PETRA IV zudem einen wichtigen Beitrag zu den vorrangigen Zielen der Hightech-Strategie der Bundesregierung – damit Ideen, Erkenntnisse und Ergebnisse zügig auf den Markt gelangen und bei den Menschen ankommen.

„Das neue 3D-Röntgenmikroskop PETRA IV wird der geplanten Science City Hamburg-Bahrenfeld zusätzliche internationale Strahlkraft verleihen und unseren herausragenden Wissenschaftsstandort weiter stärken.“

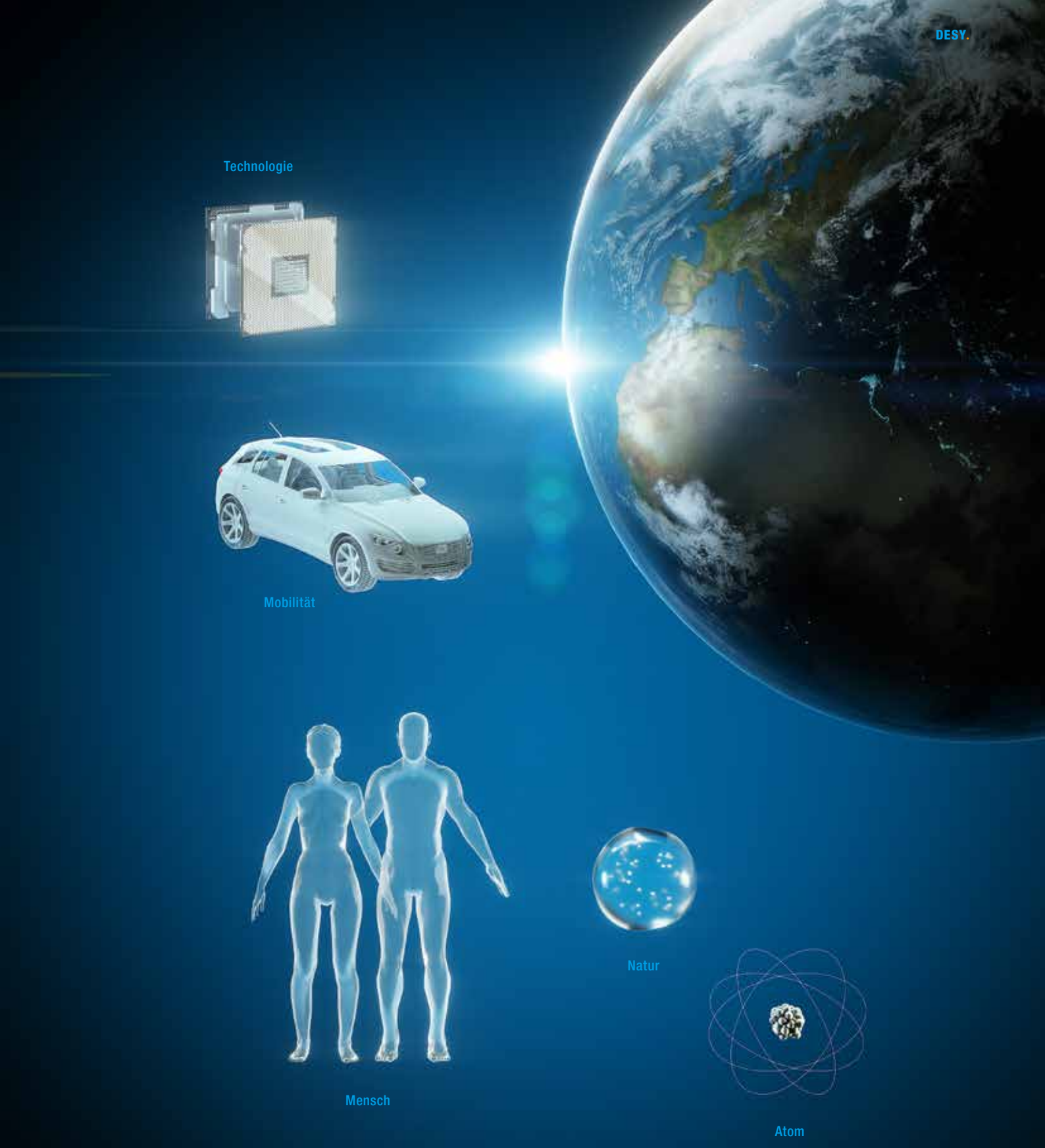
Dr. Peter Tschentscher
Erster Bürgermeister der Freien und Hansestadt Hamburg

Viele dieser Ziele erfordern innovative Materialien, Wirkstoffe und Verfahren, die noch unentdeckt sind oder erst entwickelt werden müssen. Die Spanne reicht von neuen Medikamenten gegen Krebs bis hin zu maßgeschneiderten Lösungen für eine nachhaltige Energieversorgung – beispielsweise auf Basis künstlicher Photosynthese oder schnellerer Prozessoren für intelligente Technologien. Die Eigenschaften geeigneter Substanzen oder Techniken lassen sich aber oft nur auf Nanoebene untersuchen und steuern.

Technologien mit Nanofokus

Mit PETRA IV wird DESY eine neue Beschleunigertechnologie zur Erzeugung von Röntgenlicht nutzen, um kleinste Strukturen und Prozesse in Materialien und biologischen Proben sichtbar zu machen. Völlig neue und präzise Bilder werden revolutionäre Einblicke liefern, wie die mikroskopische Nanowelt mit dem makroskopischen Verhalten von Materialien und Wirkstoffen zusammenhängt. Das macht PETRA IV zu einem entscheidenden Werkzeug, um nachhaltige Lösungsansätze für die Zukunft zu entwickeln.

Bilder: Gesine Born, Helmholtz; Senatskanzlei Hamburg



Grafik: Science Communication Lab, DESY

Vom Mikrokosmos bis hin zur funktionalen Materie

Um den globalen Herausforderungen zu begegnen, müssen wir die Natur in ihrer Gesamtheit verstehen: von den kleinsten Bausteinen – wie Atomen und Molekülen – bis hin zu ganzen Ökosystemen. Nur so können Forscherinnen und Forscher neue Materialien, Technologien und Wirkstoffe entwickeln.

PETRA IV – Lösungen für drängende Zukunftsfragen

Als zukünftig weltbestes 3D-Röntgenmikroskop ist PETRA IV das ideale Forschungsinstrument, um entscheidende Entdeckungen bei der Suche nach neuen, innovativen Materialien und medizinischen Wirkstoffen zu ermöglichen.

Die grundlegenden Prozesse, die unseren Alltag bestimmen – von biologischen Vorgängen in lebenden Zellen über chemische Reaktionen wie Katalyse bis hin zu mechanischen Prozessen wie Reibung in Motoren –, umfassen eine enorme Bandbreite an Längenskalen, die von makroskopischen Dimensionen bis hin zu atomaren Abständen reichen. Lösungen für die globalen Herausforderungen lassen sich nur entwickeln, wenn wir diese Prozesse und die ihnen zugrunde liegenden Wechselwirkungen unter realistischen Betriebs- und Umgebungsbedingungen analysieren und verstehen können. Für wesentliche Durchbrüche fehlt jedoch bisher der Einblick, wie grundlegende Eigenschaften auf der Nanoskala mit dem Verhalten auf makroskopischer Ebene zusammenhängen. Entscheidende Fortschritte sind hier nur möglich, wenn Strukturen und deren Dynamik auf allen relevanten Längenskalen gleichzeitig untersucht werden können.

Genau das bietet PETRA IV: Mit dem neuen Röntgenmikroskop bei DESY können Forschende erstmals biologische, chemische und physikalische Prozesse in 3D sichtbar machen und ihren Ablauf verfolgen. Und das kontinuierlich über längere Zeiträume und auf allen Längenskalen – vom Atom bis in den Millimeterbereich. So können Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Entstehung grundlegender Funktionalitäten in der Natur entschlüsseln – in neuartigen Materialien ebenso wie in Zellen.

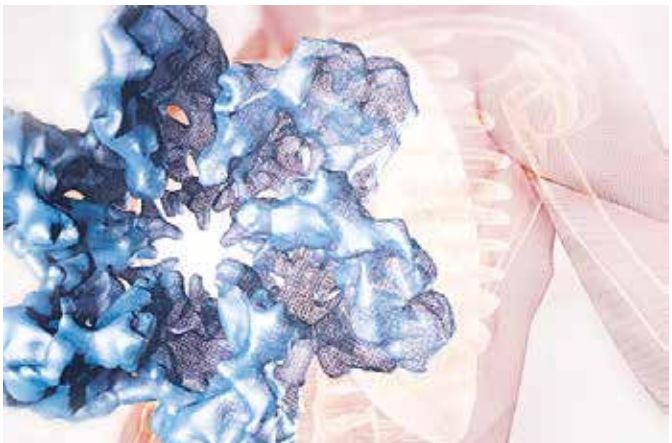
„Mit dem European XFEL und PETRA IV haben wir zwei Quellen, die Weltspitze sind – das gibt es sonst nirgendwo. Mit dem European XFEL können wir besonders gut ultraschnelle Messungen durchführen. Bei PETRA IV kann man Strukturen nanometergenau sehen, sogar in 3D.“

Prof. Robert Feidenhans'l
Vorsitzender der Geschäftsführung der European XFEL GmbH

Dr. Bridget Murphy
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU), Mitglied im Wissenschaftlichen Rat von DESY, Vorsitzende des Komitees Forschung mit Synchrotronstrahlung (KFS)

„Der PETRA IV-Strahl ist um ein Vielfaches feiner und kohärenter. Dadurch werden unsere Experimente nicht nur präziser und schneller, sondern ermöglichen uns zum ersten Mal, komplexe Strukturen im Nanokosmos als Ganzes zu sehen und zu vermessen.“

Mithilfe der Röntgenstrahlen von PETRA IV können Forschende Zellen und Moleküle in ihrer Umgebung analysieren und etwa beobachten, wie Erreger wirken (im Bild: schematische Darstellung eines Tuberkulosebakteriums).



Bilder: Marta Meyer, DESY; European XFEL; Thomas Marlovits, Tibor Kulcsar, IMP Wien

Statt Plastik: Erkenntnisse aus der Röntgenlichtforschung helfen, biologisch abbaubare Ersatzstoffe zu entwickeln. Das Bild zeigt schematisch einen Reaktor zur Herstellung künstlicher, hochfester Zellulosefasern.

Blick in den Nanokosmos: Die Röntgenstrahlen an den zukünftigen PETRA IV-Messplätzen werden Strukturen nanometergenau sichtbar machen.

Neuartige Wirkstoffe für die Medizin

Mit PETRA IV lassen sich einzelne Zellbestandteile wie Proteine und Moleküle sowie ganze Zellen als Teil größerer Proben analysieren. Forschende können Mechanismen in Tumorzellen, Wechselwirkungen der Zellen mit ihrer Umgebung und die Wirkung von ins Gewebe eingebrachten Arzneimitteln in ihrer Gesamtheit betrachten und sehen nicht nur einen einzelnen Ausschnitt. Damit können Wirkung, aber auch Nebenwirkungen von Medikamenten besser untersucht werden.

Die Röntgenstrahlen von PETRA IV sind extrem stark gebündelt und schwingen im Gleichtakt, Fachleute sprechen von Brillanz und Kohärenz. Diese Eigenschaften, verbunden mit schneller Signaldetektion, erlauben einen sehr hohen Messdurchsatz. Das wird die Zeiten für medizinische Studien verkürzen und kann so die hohen Kosten für die Entwicklung neuer Medikamente senken. Aufnahmen, die mit heutigen Messeinrichtungen nur mit außergewöhnlichem Experimentieraufwand und für sehr kleine Probenausschnitte möglich sind, werden mit PETRA IV Routine.

Prof. Martin Stratmann
Präsident der Max-Planck-Gesellschaft (MPG)

„Den Nanokosmos erkunden und verstehen ist eine der großen Forschungsfragen des 21. Jahrhunderts. Mit PETRA IV hätten wir ein starkes Instrument und mit DESY einen starken Partner, die für uns den Nanokosmos erleuchten."

Nachhaltige Materialien mit neuen Funktionalitäten

PETRA IV wird es Forschenden ermöglichen, vor allem komplexe, nicht-kristalline Materialien zu untersuchen, die heutzutage analytisch nur schwer zugänglich sind. So können sie Prozesse im Inneren einer Batterie, eines Katalysators oder eines Mikrochips unter realitätsnahen Betriebsbedingungen in 3D analysieren. Diese Erkenntnisse können helfen, innovative Werkstoffe mit Nanostrukturen gezielt maßzuschneidern.

Bilder: Eberhard Reimann, DESY; Heiner Müller-Elsner, DESY; Axel Griesch

Energie

Nachhaltige Materialien für die Energieversorgung der Zukunft

Weltweit arbeiten Forschungsgruppen daran, Lösungen für die zukünftige Energieversorgung zu entwickeln, die ökonomisch, ökologisch und gesellschaftlich tragfähig sind. Der Klimawandel und der steigende Energieverbrauch in Zeiten zunehmender Mobilität und Digitalisierung machen umwelt- und klimafreundliche Alternativen dringend erforderlich. Hier erschließt PETRA IV neue Wege für die Weiterentwicklung nachhaltiger Materialien über den gesamten Zyklus der Gewinnung, Umwandlung und Speicherung von Energie.

Nanoblick in die arbeitende Batterie

Leistungsfähige Energiespeicher spielen eine Schlüsselrolle für die Abkehr von fossilen Brennstoffen. Ein Beispiel für das große Innovationspotenzial von PETRA IV im Energiesektor ist die Entwicklung neuartiger und nachhaltiger Batterien. Innovative Materialien sollen ihre Kapazität und Lebensdauer erhöhen, Ladezeiten verringern und knappe Ressourcen schonen. Für viele Industriezweige steigt besonders der Bedarf an leichten und sehr sicheren Batterien – zum Beispiel für die Elektromobilität. Insgesamt werden immer kleinere Batterien benötigt, und damit wird ihre Nanostrukturierung immer wichtiger. Je kleiner die Batterie, desto anfälliger ist sie jedoch auch für kleinste Störungen.

Dr. Axel Müller-Groeling
Geschäftsführender Institutsleiter des Fraunhofer Instituts für Siliziumtechnologie (ISIT)

„Von den neuen Möglichkeiten bei PETRA IV versprechen wir uns signifikante Fortschritte bei der Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender und zukünftiger Batteriesysteme. Wir arbeiten damit auf eine klimaneutrale E-Mobilität hin."

Vielfach entstehen während des Betriebs Defekte, die die Leistung der Batterie einschränken und zum Sicherheitsrisiko werden können. PETRA IV bietet die notwendige Detailschärfe, um selbst extreme Formen wie Dünnschichtbatterien zu untersuchen und chemische Reaktionen an den Grenzflächen der Batterieschichten zu entschlüsseln. So können neue Materialien auf ihre Praxistauglichkeit getestet und mithilfe der Erkenntnisse kritische Defekte in Batterien vermieden werden.

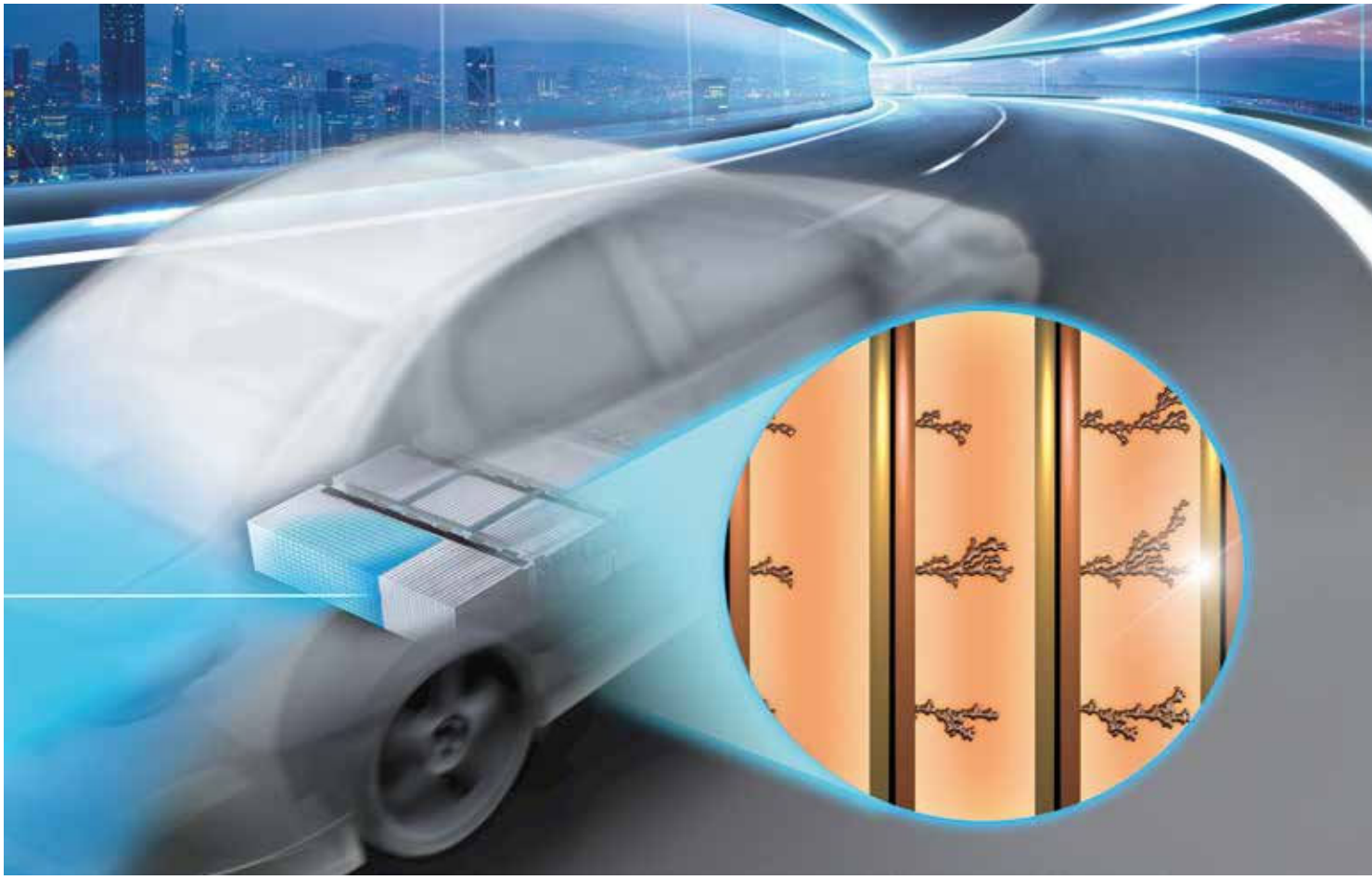
Mit heutigen Instrumenten sind vergleichbare Studien nicht möglich. Standardmethoden analysieren entweder realitätsferne Testbatterien oder aufgeschnittene, nicht mehr funktionsfähige Batterien. Experimente an PETRA IV werden erstmals detaillierte Einblicke in das Innenleben von arbeitenden Batterien ermöglichen. Damit überwindet PETRA IV bisherige messtechnische Grenzen.

Innovative Materialien mit neuen Funktionalitäten

Durch die hohe räumliche Auflösung und die zerstörungsfreie Untersuchungsmethode von PETRA IV können funktionelle Abläufe in innovativen Materialien für die Energieversorgung im Detail studiert und dadurch verbessert werden.

Heutige Festkörperbatterien mit einem Elektrodenmaterial aus Schwefel – als günstigem und praktisch unbeschränkt vorhandenem Rohstoff – zeigen beim Laden und Entladen oft Ablösungen und Risse in der Elektrode, weil das Material sich ausdehnt und chemisch verändert. In kohlenstoffbasierten Festkörperbatterien sind verstopfte Poren des Elektrodenmaterials ein häufiger Auslöser für die Batteriealterung – ähnlich einem verstopften Filter. An PETRA IV können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Ausbildung der Risse während des Batteriebetriebs erstmals genau verfolgen und einzelne Poren im Detail abbilden, um Lösungen gegen die Alterung aufzuzeigen.

Bild: ISIT, Hubert Grimm, IVH



Neue Energiekonzepte: Nanokontrolle für innovative Batterien

Die Röntgenstrahlen von PETRA IV machen sichtbar, wie sich die Nanostrukturen in Batterien während des Betriebs ändern. So entstehen mit der Zeit an den Elektroden kleinste metallische Ablagerungen. Diese Dendriten können wachsen und zu Defekten führen. An PETRA IV lassen sich solche Details untersuchen und dafür nutzen, funktionale Materialien für bessere Batterien zu entwickeln.

Auf dem Weg zu ressourcenschonenden Batterien bietet beispielsweise Natrium, das aus Meerwasser gewonnen werden kann, heute schon einen möglichen Ersatz zum herkömmlich verwendeten Lithium. Allerdings reagieren die Meerwasserbatterien noch zu träge und haben eine zu geringe Energiedichte, um konkurrenzfähig zu sein. Mit PETRA IV können Fachleute der Frage nachgehen, wie der Ionentransfer für diese umweltfreundlichen Batterien beschleunigt und die Energiedichte erhöht werden kann, um sie zu einer realistischen Alternative beispielsweise in Zwischenspeichern von Kraftwerksanlagen für erneuerbare Energien zu machen.

Ultrastarkes Röntgenlicht bei hohen Energien

- Das Röntgenlicht dringt tief in die Materialien ein, erfasst sie in 3D und macht ihre Nanostrukturen im Zeitverlauf sichtbar – bei gleichzeitig sehr hoher räumlicher Auflösung.
- Der ultrastarke Lichtstrahl von PETRA IV erlaubt die Kombination verschiedener Messtechniken, um Zusammenhänge zwischen der Struktur und den elektronischen Eigenschaften eines Materials zu entschlüsseln.
- Erst PETRA IV wird die notwendige hohe Intensität bei hohen Röntgenenergien bereitstellen, um den Zustand von leichten Elementen, wie Lithium im Inneren von Batterien, vermessen zu können.

Bild: Lucid Berlin, DESY

Gesundheit

Das Zusammenspiel von Molekülen, Zellen und Gewebe verstehen

Der medizinische Fortschritt ist rasant, trotzdem steht die Medizin im 21. Jahrhundert vor zahlreichen Herausforderungen. Volkskrankheiten wie Krebs, Diabetes, Demenz oder Herz-Kreislauf-Leiden nehmen in der alternden Gesellschaft zu. Neue Krankheitserreger bedrohen die Gesundheit der Menschen, die Ausbreitung von Infektionskrankheiten und multiresistenten Keimen erfordert neue Ansätze mit maßgeschneiderten Wirkstoffen und molekularbiologischen Therapien. Durch einzigartige Einblicke in Moleküle, Zellen und Gewebe eröffnet PETRA IV für die Gesundheitsforschung völlig neue Möglichkeiten.

Punktgenaue Therapien gegen Krebs

Große Fortschritte erhoffen sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beispielsweise für die Erforschung zielgerichteter Krebstherapien. Diese Behandlungen setzen bei speziellen Wirkmechanismen von Tumoren an. Während Chemo- und Strahlentherapie geschädigtes und gesundes Gewebe gleichermaßen angreifen, hemmen zielgerichtete Arzneimittel das Tumorwachstum. Sie sind allerdings bislang nur für einige Krebsarten nutzbar und meist auch nicht völlig frei von Nebenwirkungen. Um diese Medikamente zu verbessern, müssen Forschende das Tumorwachstum und die Wirkung der Substanzen auf Zellen und Gewebe genauer verstehen, neue Angriffspunkte finden und bereits bekannte Wirkprinzipien verbessern. PETRA IV ermöglicht hierfür zukünftig Studien mit der notwendigen Detailgenauigkeit, Effizienz und statistischen Belastbarkeit.

Ein Schlüsselmechanismus des Tumorwachstums ist die Angiogenese: die Bildung von Mikroblutgefäßen. Diese versorgen den Tumor mit Sauerstoff und Nährstoffen. Gelingt es, in diesen Prozess einzugreifen, kann der Tumor nicht oder nicht mehr so schnell wachsen. Dabei steht die Grundlagenforschung erst am Anfang: Wie genau sind die Blutgefäße aufgebaut und wie wachsen sie? Wie lassen sich Wirkstoffe punktgenau platzieren? Welche Nebenwirkungen haben sie? Auf diese und weitere Fragen können Untersuchungen mit PETRA IV Antworten geben.

Interdisziplinär stark in der Gesundheitsforschung

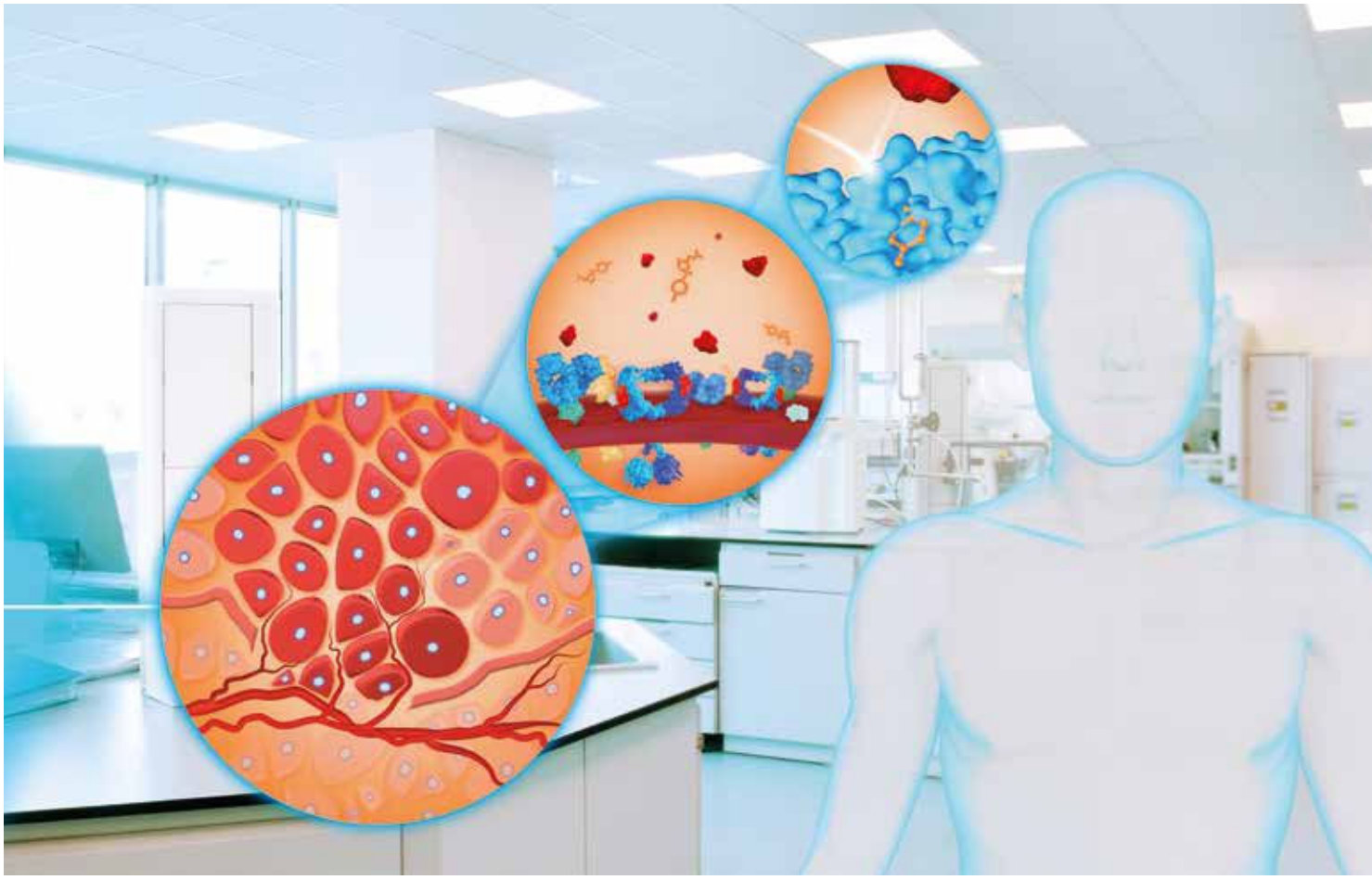
Auch jenseits der Krebsforschung bedeuten die neuen Möglichkeiten der Bildgebung an PETRA IV einen Meilenstein für die Gesundheitsforschung. Die Röntgenuntersuchungen helfen, neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer oder Knochenerkrankungen wie Osteoporose besser zu verstehen. So kann PETRA IV zum Beispiel abbilden, wie einzelne Neuronen im Gehirn kommunizieren, und Defekte in Knochen bereits auf der Nanoskala sichtbar machen.

Führende Institute wie das Europäische Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) werden die PETRA IV-Technologie nutzen. Am DESY-Campus in Hamburg-Bahrenfeld findet die nationale und internationale Wissenschaftsgemeinschaft ein weltweit einzigartiges Mess- und Forschungsumfeld mit individuell zugeschnittener Expertise und fachlicher Unterstützung – von der Messvorbereitung über theoretische Simulationen bis zu gemeinsamen Forschungsprojekten. Im zukünftigen Forschungsbau HARBOR der Universität Hamburg etwa erhalten Nutzerinnen und Nutzer kompetente Hilfe bei der Probenpräparation. Zunehmend bringen anwendungsnahe Vorhaben Fachleute aus Medizinforschung, Kliniken und Lebenswissenschaften zusammen – beispielsweise in Kooperation mit dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf.

„Das Röntgenlicht von PETRA IV erzeugt kontrastreiche Abbildungen für systematische Studien. In der Gesundheitsforschung können die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf vielfältige Weise angewendet werden, um zum Beispiel neue Wirkstoffe zu finden oder zu verstehen, wie Zellen mit ihrer Umgebung interagieren."

Prof. Edith Heard
Generaldirektorin des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL)

Bild: Edith Heard



Neue Medikamente: Molekulare Wirkstoffe gegen Krebs

Für gezielte Krebstherapien sind Andockstellen an die Zelle ein wichtiger Ansatzpunkt, weil diese Rezeptoren Mechanismen wie die Blutgefäßbildung im Tumor steuern. Wenn geeignete Wirkstoffe (orange) verhindern, dass bestimmte Andockstellen (blau) durch Wachstumsfaktoren (rot) aktiviert werden, hemmt dies das Tumorwachstum. PETRA IV kann den Prozess von der molekularen Wirkstoffankopplung bis zum zellübergreifenden Geschehen sichtbar machen.

Bildgebung der Zelle in ihrer Umgebung

- In Experimenten mit Röntgenlicht an PETRA IV wird die Zelle als Teil ihrer natürlichen Umgebung analysiert.
- An PETRA IV können standardmäßig große Proben untersucht werden, in denen biologische Prozesse relevant sind. Bilder, die bisher nur mit außergewöhnlichem experimentellem Aufwand und deutlich geringerer Detailschärfe möglich waren, werden Routine.
- Zur übergreifenden Analyse biologischer Proben können auf dem Campus Instrumente wie Kryo-Elektronenmikroskope und der ultraschnelle Röntgenlaser European XFEL komplementär zu PETRA IV eingesetzt werden.

Bild: Lucid Berlin, DESY

Transport und Technologie

Mobilität umweltverträglich verbessern

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Forschungsbereichs Transport und Technologie erarbeiten Konzepte und Problemlösungen in den Bereichen Verkehr, Mobilität und Ressourcenmanagement sowie Umwelt und Sicherheit. Mobilität spielt eine wesentliche Rolle in unserer Gesellschaft, stößt jedoch zunehmend an Grenzen. Nicht nur Staus auf der Straße und Verspätungen im Bahn- und Luftverkehr nehmen zu, vor allem Lärm und Abgase belasten Mensch, Umwelt und Klima. Neue Ansätze und innovative technische Lösungen sind dringend nötig. PETRA IV kann hier auf verschiedenen Ebenen – von der Materialforschung bis hin zur Gesundheitsforschung – wesentliche und interdisziplinäre Beiträge leisten.

Feinstaubbelastung reduzieren

Für unsere Gesundheit stellt vor allem die Belastung der Luft mit Feinstaub ein großes Problem dar. Fortschritte in der E-Mobilität, zu denen auch die Energieforschung mit PETRA IV beitragen wird, vermindern zwar die Luftbelastung, lösen aber nur einen Teil des Problems, denn für einen Großteil des Feinstaubs im Straßenverkehr sind Reibungsprozesse verantwortlich. Rund siebzig Prozent der feinen und ultrafeinen Partikel stammen aus dem Abrieb von Reifen, Brems- und Straßenbelag, nur die restlichen dreißig Prozent kommen durch Abgase von Verbrennungsmotoren. PETRA IV bringt neue Analysemöglichkeiten, um die Entstehung und Verbreitung von Feinstaub im Gesamtkontext zu verstehen, sein gesundheitliches Schadpotenzial zu bemessen und diesem durch die Entwicklung neuer Materialien und Technologien entgegenzuwirken.

Feinstaub besteht aus Teilchen, die so klein sind, dass sie in der Luft schweben und nicht sofort zu Boden sinken. Einen hundertstel Millimeter Durchmesser (10 µm) haben die größeren Partikel, PM10 genannt. Studien deuten darauf hin, dass die noch feineren Partikel Herz-Kreislauf-Leiden und Krebs fördern. Auch das Risiko für Atemwegserkrankungen wie Asthma steigt. Der Ausbau der heutigen PETRA III-Quelle zu PETRA IV schärft die mögliche Strahlfokussierung um mehr als ein Hundertfaches. So werden Teilchen von wenigen Mikrometern Größe bis hin zu Ultrafeinstaub aus kleinsten Nanopartikeln sichtbar – und damit auch der Teil des Feinstaubs, der als besonders gesundheitsschädlich eingestuft wird.

Innovative Materialien auf dem Prüfstand

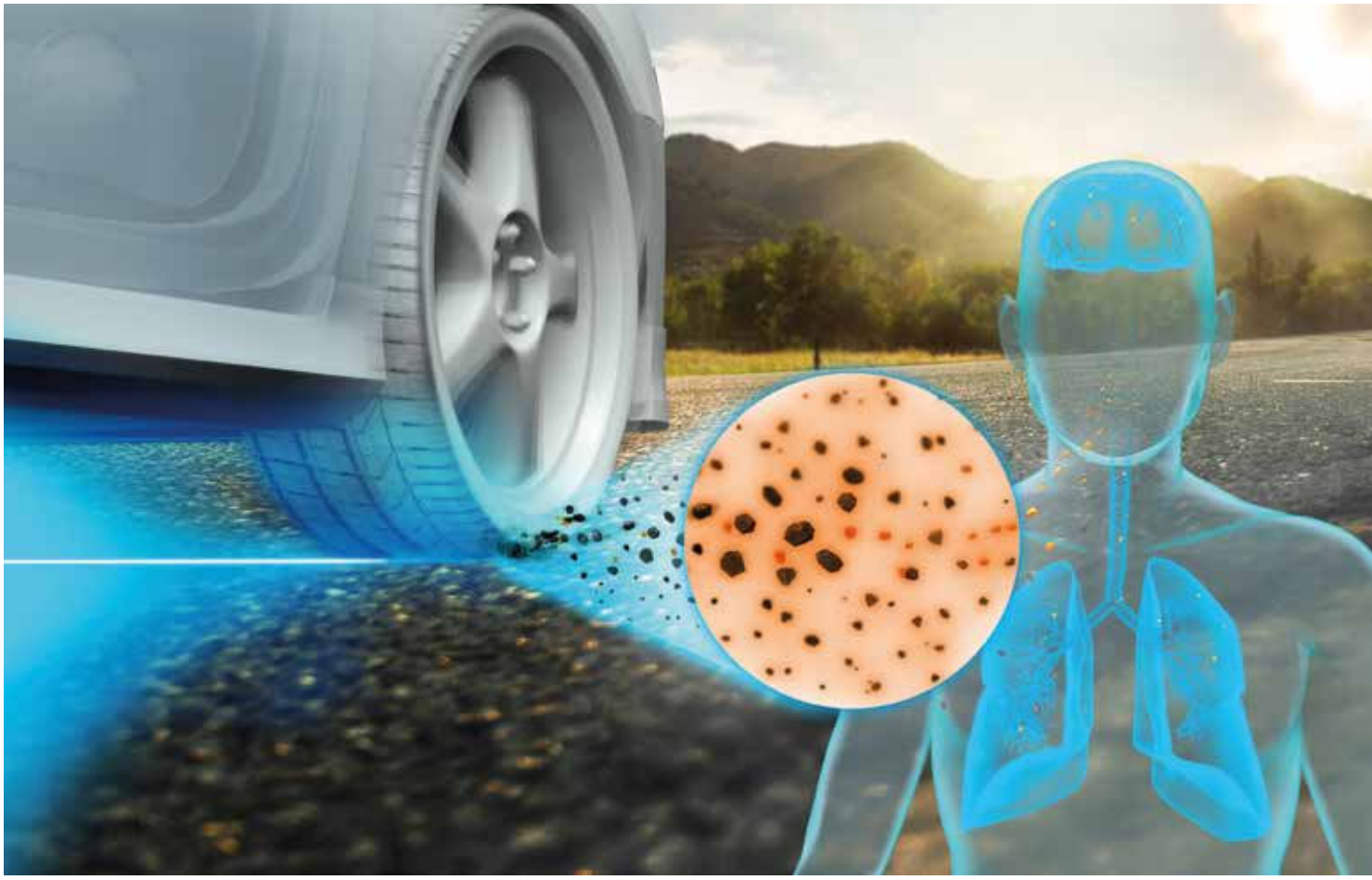
Um Feinstaub aus Abrieb experimentell zu beobachten, sind Röntgenquellen die geeigneten Messinstrumente. Denn der Ort, an dem die Reibung entsteht – die Kontaktfläche zwischen zwei Materialien –, ist im Moment der Entstehung des Abriebs naturgemäß nicht einsehbar. Röntgenlicht dagegen durchdringt die Materialien und liefert Bilder des Reibungsgeschehens. Aus diesen Erkenntnissen können Materialien entwickelt werden, die weniger gefährlichen Abrieb zeigen. Der Gesundheitsforschung bietet sich mit PETRA IV die Möglichkeit, mithilfe der großen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung auch die biologische Wirkung der Feinstaubpartikel im Gewebe im Detail zu untersuchen.

Reibungsprozesse sind nicht nur für die Feinstaubproblematik von großer Bedeutung – sie finden in nahezu allen Maschinen statt. Gelingt es, Reibung zu verstehen und zu kontrollieren, können Prozesse vielerorts effizienter und kostengünstiger gestaltet werden. Der sehr hohe Messdurchsatz mit PETRA IV ermöglicht großangelegte, industrielle Studien für neue Materialentwicklungen.

„Mit PETRA IV und der bahnbrechenden Nanofokussierung bieten sich uns hervorragende Forschungsmöglichkeiten zur Herstellung neuer zukunftsweisender und ressourcenschonender Materialien."

Prof. Matthias Rehahn
Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG)

Bild: Collin Foto



Mobilität der Zukunft: Maßgeschneiderte Materialien für weniger Feinstaub

Mit Reibungsexperimenten an PETRA IV können Forschende analysieren, wie sich Feinstaubpartikel beim Kontakt eines Autoreifens mit dem Straßenbelag aus dem Reifen lösen und in der Umwelt verteilen. Innovative Materialien könnten zukünftig Nanopartikel aus diesem Abrieb reduzieren und so das Gefährdungspotenzial durch Feinstaub verringern.

Licht für kontrastreiche Bilder

- Das brillante Röntgenlicht durchdringt die Materie und macht den Reibungsprozess an der Kontaktfläche zwischen zwei Materialien sichtbar.
- An PETRA III können Abriebexperimente heute schon geplant und getestet werden. Doch erst PETRA IV wird den Röntgenstrahl so fein fokussieren, dass auch kleinste Partikel unterscheidbar werden.
- Im Röntgenlicht erzeugen Teilchen charakteristische Streuungsmuster. Die hohe Kohärenz von PETRA IV garantiert den notwendigen, hohen Bildkontrast, um auch die kleinsten, potenziell gefährlichsten Partikel zeitaufgelöst zu detektieren.

Bild: Lucid Berlin, DESY

Erde und Umwelt

Den Lebensraum Erde und seine Ressourcen erhalten und nutzen

In der Erd- und Umweltforschung untersuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die grundlegenden Funktionen des Systems Erde und die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Natur. Damit schaffen sie eine Wissensbasis, um die Grundlagen des Lebens langfristig zu sichern. Das 3D-Röntgenmikroskop PETRA IV wird den Blick für wesentliche Aspekte unserer Umwelt beträchtlich schärfen. Die Anlage wird es Forschenden erlauben, Materie unter extremen Bedingungen und an Grenzflächen zu studieren und insbesondere die einzigartigen Eigenschaften von Wasser zu entschlüsseln.

Wasserforschung für Mensch, Technik und Umwelt

Wasserforschung schafft die Basis für neue Erkenntnisse und Innovationen – in der Gesundheitsforschung, für neue Energieformen und für ein nachhaltiges Ressourcenmanagement. Wasser ist die Grundlage allen Lebens. Ohne Wasser funktionieren biologische Prozesse nicht. In den Zellen lebender Organismen arbeiten die Proteine unermüdlich in einer Umgebung aus Wasser. In Meeren, Flüssen und Gletschern formt Wasser unseren Planeten und sein Klima – und Wasser ist essenziell für heutige und zukünftige Technologien.

Dennoch sind viele außergewöhnliche Eigenschaften dieses einzigartigen Stoffes im Detail noch unverstanden. Um sie zu ergründen, müssen Forschende das komplexe Zusammenspiel der Wassermoleküle entschlüsseln. Der technische Fortschritt von PETRA IV ermöglicht Analysen der Struktur und Dynamik von Wasser im notwendigen Detail. Daraus können wesentliche Erkenntnisse für Natur- und Lebenswissenschaften, Technik und Gesundheit abgeleitet werden.

Medizinerinnen und Mediziner beobachten zum Beispiel bei Krankheiten wie Alzheimer störende Proteinplaques im menschlichen Gehirn: Proteine, die sich in ihrer wässrigen Lösung in der Zelle zusammengeballt haben und nicht mehr auflösen. Um diesen Vorgang gezielt beeinflussen zu können, müssen Forschende das Zusammenspiel der Wassermoleküle und der Proteine besser verstehen. An PETRA IV können sie die individuellen Bewegungen der nur wenige Nanometer großen Proteine in der Zelle zukünftig live verfolgen. Dabei lässt sich das Röntgenlicht von PETRA IV so präzise dosieren, dass biologische Proben während der Messung keine Strahlenschäden erleiden.

Wasser steckt auch in einer Vielzahl technologischer Innovationen. So birgt Wasserstoff als Energieträger großes Potenzial und kann im Prinzip mithilfe eines geeigneten Katalysators direkt aus Wasser und Sonnenlicht gewonnen werden. Diese photokatalytische Wasserspaltung ist jedoch bisher großtechnisch nicht realisierbar. Mit PETRA IV kann die Wasserspaltung direkt in der Nähe eines Katalysatorpartikels auf der Nanoskala verfolgt werden. Durch das Verständnis der dabei ablaufenden Prozesse können maßgeschneiderte Katalysatoren entwickelt werden.

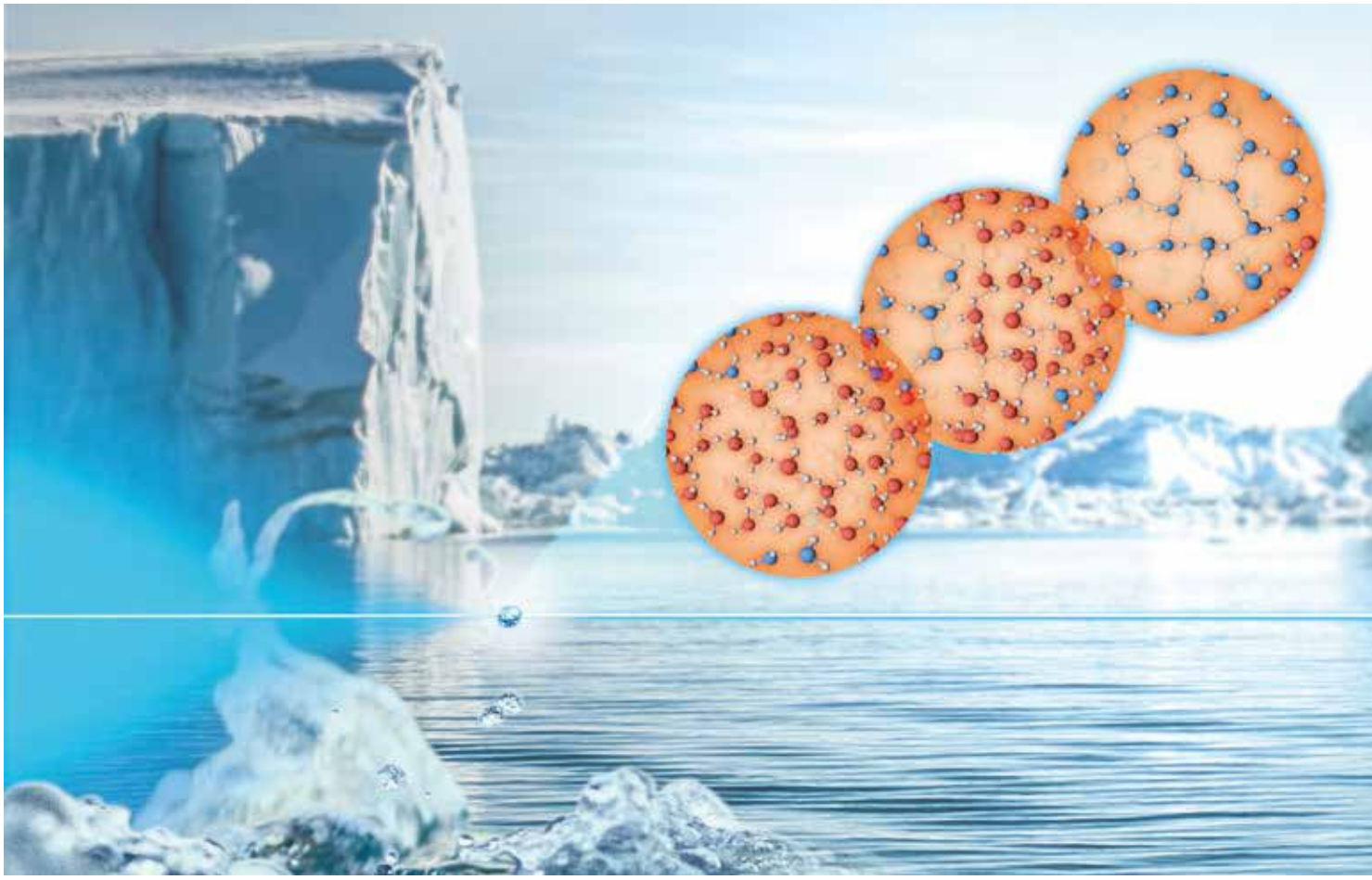
Wasser interdisziplinär erforschen

Um die Arbeit von Forschungsgruppen aus ganz Europa in der Wasserforschung zu bündeln, entsteht in der geplanten Hamburger Wissenschaftsstadt Science City Bahrenfeld das Zentrum für Molekulare Wasserforschung (Centre for Molecular Water Science, CMWS).

„Wasser ist noch nicht im Detail verstanden. Durch die revolutionären Fähigkeiten von PETRA IV kann Wasser mit beispielloser Auflösung untersucht werden, um biologische und chemische Prozesse zu verstehen."

Prof. Anders Nilsson
Professor für Chemische Physik an der Universität Stockholm, Schweden

Bild: Anders Nilsson



Zoom ins Wassermolekül: Schlüsselelement für Leben und Technik

Wasser zeigt Merkmale wie keine andere Flüssigkeit. Diese Anomalien machen Leben auf der Erde möglich und sind wichtig für technische Anwendungen. Noch sucht die Forschung nach Erklärungen, um das einzigartige Verhalten von Wasser zu verstehen. Einer Theorie zufolge besteht es in seiner flüssigen Form aus zwei strukturell und dynamisch verschiedenen Komponenten (rot und blau eingefärbt). PETRA IV könnte diese Flüssigkeitszustände erstmals unterscheiden.

Forschende von European XFEL, der Universität Hamburg und DESY sowie weitere Partner werden dort gemeinsam arbeiten. Ihr Ziel: die Struktur von Wasser zu enträtseln, um künstliche Photosynthese, die Dichteanomalie von Wasser oder die Biochemie von in Wasser gelösten Proteinen zu verstehen. Das Zentrum wird den Austausch mit benachbarten Disziplinen wie der Chemie und Biochemie, den Geowissenschaften, der Astrophysik oder der Nanotechnologie fördern und vereinfachen. Auch wird das CMWS Nutzerinnen und Nutzer bei der komplexen Vorbereitung ihrer Experimente unterstützen.

Kohärentes Licht für Messungen auf multiplen Zeit- und Längenskalen

- PETRA IV wird die Dynamik von komplexen Molekülnetzwerken wie wässrigen Lösungen bis auf die Nanosekunde genau verfolgen, hundert bis zehntausende Male schneller als heutige Anlagen – bei maximaler räumlicher Auflösung.
- Dies ermöglicht grundlegend neue Erkenntnisse dazu, wie das makroskopische Verhalten komplexer Systeme durch ihre molekularen Eigenschaften bestimmt wird. Davon profitieren Forschung und Technik.
- PETRA IV und der Röntgenlaser European XFEL ergänzen sich ideal. Zusammen erschließen sie Zeitskalen vom Femtosekundenbereich bis zu Sekunden, Minuten oder Stunden.

Bild: Lucid Berlin, DESY

Neue Technologien

Innovative Technologien für die digitale Welt von morgen

Die Digitalisierung von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft (Industrie 4.0) führt zu einem gigantischen Bedarf an Geräten und Netzwerken. Gleichzeitig stoßen bisherige Miniaturisierungskonzepte der Informationstechnologie an ihre Grenzen. Es müssen innovative Ansätze für Bauelemente und Architekturkonzepte gefunden und neue physikalische Effekte genutzt werden, um die Rechenleistung, Datenspeicherdichten und Datenübertragungsraten von Informationstechnologien zu erhöhen und gleichzeitig den Bedarf an elektrischer Energie deutlich zu reduzieren. Eine wichtige Zielsetzung von PETRA IV ist, geeignete Materialien mit neuen Funktionalitäten zu erschließen. Diese können nur auf Nanoebene maßgeschneidert werden.

Von verlustfreier Stromversorgung zu Quantencomputern: Supraleitung bei Zimmertemperatur

Eine epochale Wende versprechen sich Forschende zum Beispiel von Materialien, die Strom bei Zimmertemperatur verlustfrei leiten. Solch extreme Hochtemperatur-Supraleiter würden eine technologische Revolution bedeuten: Die möglichen Anwendungen reichen von verlustfreiem Stromtransport für eine nachhaltige Energieversorgung bis zu hochempfindlichen Sensoren, extrem schnellen Schaltern für die Datenverarbeitung oder völlig neuen Möglichkeiten der Informationsverarbeitung in Quantencomputern.

Supraleiter sind Materialien, die Elektronen ohne jeden Widerstand leiten. Möglich machen das spezielle Elektronenzustände im Kristallgitter dieser Materialien. Das Problem: Bei konventionellen Supraleitern ist diese verlustfreie Leitung erst bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt möglich. Sie müssen mit flüssigem Helium auf Temperaturen weit unter -200 Grad Celsius gekühlt werden, um ihre supraleitende Funktionalität zu zeigen. Dies ist mit hohem Aufwand und hohen Kosten verbunden. Forschungsgruppen auf der ganzen Welt suchen daher nach Materialien, die bereits bei Zimmertemperatur supraleitend werden.

Dazu zählen etwa spezielle kupfer- oder eisenhaltige Verbindungen. Den aktuellen Wärmerekord supraleitender Materialien hat eine internationale Forschungsgruppe im Jahr 2019 für metallisches Lanthanhydrid bei erstaunlichen -23 Grad Celsius aufgestellt – ein Rekord, aber immer noch nicht alltagstauglich. Die Forschenden mussten dafür einen fast 200 Millionen Mal höheren Druck als den uns umgebenden Luftdruck künstlich erzeugen.

Funktionale Materialien maßschneidern

Trotz intensiver Forschung war es bisher vor allem Zufall, wenn Fachleute auf neue Hochtemperatur-Supraleiter gestoßen sind. Denn der Zusammenhang zwischen dieser exotischen Eigenschaft und der chemischen Struktur dieser Materialien ist noch unklar. Expertinnen und Experten wissen nicht, warum einige Verbindungen unter bestimmten Bedingungen supraleitend werden und andere nicht. Heutige Experimente können bei den Untersuchungen nur begrenzt helfen: Bereits die Analyse eines einzelnen Materials bedeutet enormen Aufwand und kann lokale Phänomene nur bis auf etwa einen Mikrometer unterscheiden.

„Mit innovativen Analysemethoden bei PETRA IV können in der Spintronik neue Wege beschritten werden, um ‚Big Data' effizienter zu verarbeiten."

Die zukünftigen Messmöglichkeiten mit PETRA IV lassen einen entscheidenden Fortschritt erwarten: Sie machen erstmals die lokale elektronische Struktur in Hochtemperatur-Supraleitern auf der Nanoskala sichtbar – und könnten so aufdecken, wie ein Material beschaffen sein muss, damit die kritische Temperatur für Supraleitung sich der Null-Grad-Marke oder gar Zimmertemperatur annähert. Gelingt dies, so ließen sich gezielt neue Hochtemperatur-Supraleiter für die breite Anwendung entwickeln.

Prof. Martina Müller
Technische Universität Dortmund, Leiterin der Arbeitsgruppe „Functional Quantum Oxides" am Forschungszentrum Jülich

Bild: Marie Schmitz, TU Dortmund

Sparsame Hochleister: Quantenmaterialien für die digitale Revolution

Neue Erkenntnisse an PETRA IV können genutzt werden, um gezielt neue Materialien maßzuschneidern – beispielsweise für Chips und ultraschnelle Prozessoren. Ein experimenteller Durchbruch wird in der Forschung zu Hochtemperatur-Supraleitern erwartet: Der ultrascharfe Röntgenstrahl macht erstmals die lokale elektronische Struktur der Materialien auf der Nanoskala sichtbar.

Röntgen-Nanospektroskopie von Quantenmaterialien

- Mit PETRA IV werden Unterschiede in der elektronischen Struktur von Materialien auf lokaler, atomarer Ebene direkt sichtbar, quantifizierbar und letztendlich kontrollierbar.
- PETRA IV verschiebt die Grenzen heutiger spektroskopischer Verfahren. Abläufe in funktionalen Materialien können live beobachtet werden.
- Die Kombination aus hoher Energieauflösung und hoher räumlicher Auflösung von PETRA IV hat das Potenzial, das Verständnis funktionaler Materialien, deren makroskopische Eigenschaften auf Quantenzuständen beruhen, zu revolutionieren.

Bild: Lucid Berlin, DESY

Ultimatives 3D-Röntgenmikroskop

Mit PETRA IV plant DESY in Hamburg das weltbeste Röntgenmikroskop, das dreidimensionale Strukturbilder liefert – vom Millimeterbereich bis hin zur atomaren Ebene. Seine enorme Leuchtstärke soll ab 2027 Einblicke in den Nanokosmos mit bisher unerreichter Detailschärfe ermöglichen.

DESY betreibt mit PETRA III bereits eine der derzeit besten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen weltweit. Internationale Forschungsgruppen nutzen das besonders brillante, intensive Röntgenlicht für ihre Experimente – von der Medizin- bis zur Materialforschung. Doch der 2300 Meter lange Speicherring hat noch mehr Potenzial: DESY plant, ihn zu einem hochauflösenden 3D-Röntgenmikroskop auszubauen – das Zukunftsprojekt PETRA IV.

PETRA IV ist eine Synchrotronstrahlungsquelle der vierten Generation, mit der das Prinzip der speicherringbasierten Lichtquellen seine physikalische Grenze erreichen wird. Synchrotronstrahlung entsteht, wenn elektrisch geladene Teilchen, die fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wurden, aus ihrer Flugbahn abgelenkt werden. In jeder einzelnen Kurve strahlen die Elektronen Licht ab, welches in der Summe einen extrem intensiven Strahl ergibt. Dabei wird Licht nahezu aller Wellenlängen erzeugt, von Infrarotlicht bis Röntgenstrahlung.

Vorstoß in den Nanokomos

Mit heutigen Röntgenquellen bleiben wichtige Bereiche des Nanokosmos jedoch im Dunkeln. Das Problem: Ihre Quellpunkte sind zu groß, und das von ihnen ausgesandte Licht läuft zu stark auseinander. So lässt sich die Strahlung nicht gut genug fokussieren, um kleine Strukturen punktgenau abzutasten, und die Röntgenbeugungsbilder sind zu verwaschen, um feinste Details zu erkennen. Während der Strahl von PETRA III nur in vertikaler Richtung klein, horizontal hingegen ausgedehnt ist, erzeugt PETRA IV Strahlen, die in horizontaler und vertikaler Richtung nur noch wenige Mikrometer klein sind und sich damit noch weiter auf Nanometerebene fokussieren lassen. Das ermöglicht bildgebende Verfahren mit 100-mal genauerer Detailschärfe und 100-mal schnellere Experimente als bisher. Damit macht PETRA IV jegliche Form von Materie auf Größenskalen bis hinab zu nur einem zehntel Nanometer in 3D sichtbar.

Im Nanobereich liegt der Schlüssel zum Verständnis von vielen Prozessen in der Natur, wie etwa in Protein- und Ionenkanälen von Zellen. Aber auch winzige Leitungen und Schalter in künftigen Computerchips werden so erstmals in 3D sichtbar. PETRA IV eröffnet einen neuen und dreidimensionalen Blick auf kleinste Strukturen und Prozesse, der ausschlaggebend ist für die Untersuchung von Energiespeichern, Brennstoffzellen, Katalysatoren und biologischen Zellen.

„Das Upgrade zu PETRA IV ist ein entscheidender Schritt für den europäischen Forschungsraum. DESYs Lichtquelle der vierten Generation wird die schnellere Entwicklung dringend benötigter zukünftiger Technologien zum Wohle der europäischen Gesellschaft und Wissenschaft befördern."

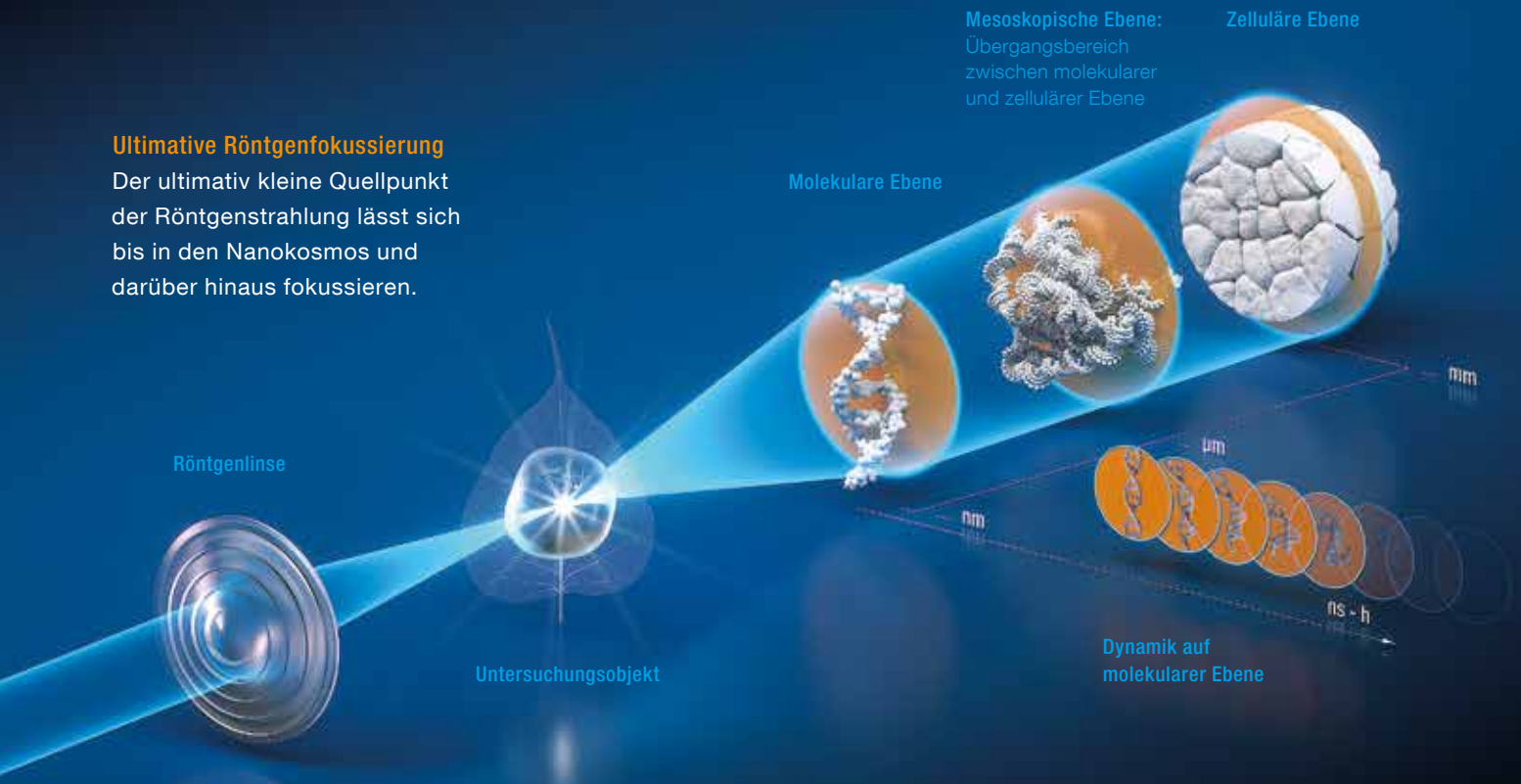
Dr. Caterina Biscari
Direktorin des ALBA-Synchrotrons in Barcelona und Vize-Vorsitzende von LEAPS (League of European Accelerator-Based Photon Sources)

Die Kombination aus hoher Auflösung, Leuchtstärke und Eigenschaften wie Kohärenz macht PETRA IV zum ultimativen 3D-Röntgenmikroskop und bisherige Methoden zu Nano-Experimentiertechniken. Das führt zu neuen Anwendungen in Bereichen wie Energie-, Umwelt- und Gesundheitsforschung, Transportwesen und Neue Technologien. So trägt PETRA IV dazu bei, die Ziele der Hightech-Strategie der Bundesregierung umzusetzen und aus Erkenntnissen der Forschung gemeinsam mit der Industrie die Grundlage für Technologien der Zukunft zu schaffen. PETRA IV leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Lösung globaler Probleme und zur Förderung des gesellschaftlichen Wohlergehens.

Bild: Caterina Biscari

Neue Dimension der Bildgebung
Reale Objekte lassen sich auf verschiedenen Skalen detailreich scharf abbilden, von der Millimeter- bis zur Nanoebene.

Ultimative Röntgenfokussierung
Der ultimativ kleine Quellpunkt der Röntgenstrahlung lässt sich bis in den Nanokosmos und darüber hinaus fokussieren.



Einzigartige Live-Einblicke
Dynamische Prozesse lassen sich in Untersuchungsobjekten während des Betriebs und in ihrer natürlichen Umgebung verfolgen.

Spitzenforschung mit Strahlkraft

Die extrem gebündelten Röntgenstrahlen von PETRA IV durchleuchten Objekte in ihrer natürlichen Umgebung. So lässt sich ihre räumliche Struktur von der makroskopischen Ebene bis hinunter in den Nanokosmos der Atome abbilden. Gleichzeitig wird es möglich sein, die Dynamik der einzelnen Elemente und Strukturen der Untersuchungsobjekte zu beobachten – auf Zeitskalen von Nanosekunden bis Stunden.

Grafik: Science Communication Lab, DESY

Forschungsgerät der Superlative

PETRA IV wird die heutigen messtechnischen Grenzen der Forschung mit Röntgenlicht verschieben. In den vergangenen Jahren haben Beschleunigerkonzepte mit der Entwicklung der „Multibend Achromat“-Technologie (MBA) eine neue Dimension erreicht. Viele kleine Magnete lenken den Teilchenstrahl im Speicherring und ermöglichen so eine extrem hohe Qualität der beschleunigten Elektronenpakete. Das funktioniert umso besser, je größer der Speicherring ist.

An der Forschungsanlage PETRA IV wird DESY das Potenzial dieser neuesten Technologie bis an die Grenze des physikalisch Möglichen treiben – mit dem größten Beschleunigerring für Quellen dieser Art. Dort kann das Licht im Beschleuniger perfekt auf kleinstem Fleck fokussiert werden. Die Elektronen senden dann nahezu parallele Strahlen von Röntgenlicht aus. Im Idealfall geben die Elektronenpakete einen Lichtstrahl ab, der so gut gebündelt ist wie der Lichtstrahl, den ein einzelnes Elektron abgeben würde – so dass im Prinzip alles Licht auf einen Punkt trifft und der kleinste mögliche Röntgenlichtfokus entsteht.

Exzellente Strahlqualität und Ausstattung

Schon PETRA III zieht jährlich Tausende von Forschenden aus aller Welt sowie Industrieunternehmen an. Die neuen Messmöglichkeiten an PETRA IV werden den Kreis der potenziellen Nutzergemeinde nochmals erweitern. Bereits ab der ersten Planungsphase sind Forschung, Industrieprojekte und die Entwicklung von Schlüsseltechnologien zentrale strategische Bestandteile des Großprojekts PETRA IV. Die gesamte Anlage wird so ausgelegt sein, dass Nutzerinnen und Nutzer an den Messplätzen ideale Bedingungen vorfinden, um den sehr hohen möglichen Messdurchsatz und die vorhandene Forschungsinfrastruktur optimal für ihre Projekte auszuschöpfen.

Herausragende Experimentiermöglichkeiten werden zudem durch bewährte Kooperationen mit Partnerinstitutionen sichergestellt – wie etwa dem Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) und dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG), die bereits an PETRA III Experimentierstationen betreiben. Ebenso ist geplant, spezialisierte Forschungs- und Servicezentren in direkter Nachbarschaft zu etablieren, die Kooperationen mit internationalen Partnern wie den USA, Indien, Russland und Schweden zu stärken und die Zusammenarbeit mit lokalen und regionalen Universitäten fortzuführen und auszubauen.

Neue Beschleunigertechnologien

Mit der Umwandlung der Röntgenlichtquelle PETRA III in das 3D-Röntgenmikroskop PETRA IV wird DESY seiner Rolle als eines der weltweit führenden Zentren für die Erforschung der Materie mit Röntgenstrahlung auch zukünftig gerecht. Dabei ergänzen sich die Großforschungsanlage PETRA IV und der Freie-Elektronen-Laser FLASH mit dem European XFEL in ihren Analysemöglichkeiten optimal. Im Zusammenspiel mit interdisziplinären Partnereinrichtungen machen sie Hamburg zu einem einzigartigen Ort der Spitzenforschung und Innovation. Langfristig bereitet PETRA IV zudem den Weg zu neuen Beschleunigertechnologien. Insbesondere ist geplant, die Zukunftstechnologie der Laser-Plasmabeschleunigung an einem Vorbeschleuniger der Anlage im realen Betrieb zu testen.

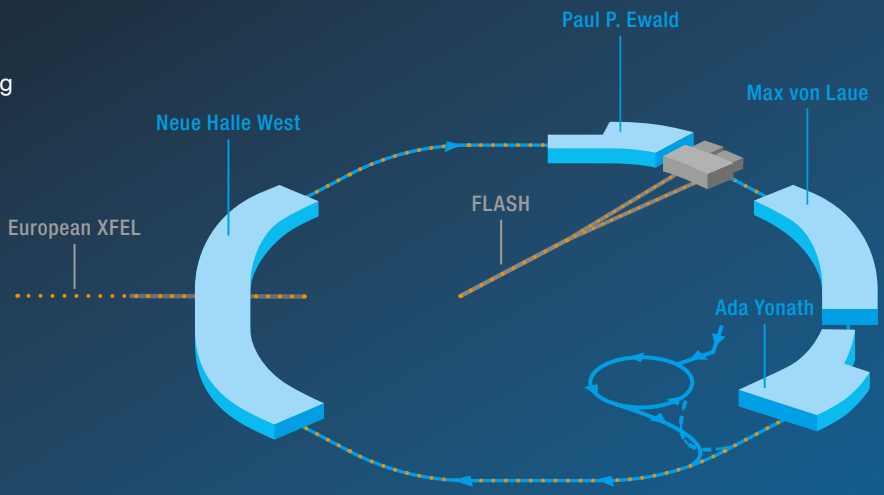
„Das PETRA IV-Upgrade wird weltweit einzigartige Forschung mit Synchrotronstrahlung ermöglichen und dazu beitragen, dass Deutschland weiterhin ein Spitzenreiter auf diesem Gebiet bleibt und die internationale wissenschaftliche Gemeinschaft voranbringt.“

Prof. Chi-Chang Kao
Direktor des SLAC National Accelerator Laboratory in Menlo Park, USA

Bild: SLAC National Accelerator Laboratory

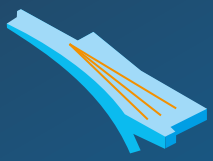
PETRA IV-Experimentierhallen

Am 2304 Meter langen PETRA IV-Speicherring werden sich vier große Experimentierhallen gruppieren. Hier wird die Synchrotronstrahlung über die Strahlführungen zu den Messplätzen geleitet.



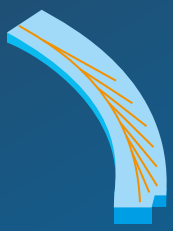
„Neue Halle West“

Um die neuen experimentellen Methoden der Anlage optimal nutzen zu können, wird für PETRA IV eine neue Experimentierhalle gebaut: die Neue Halle West. Bestehende PETRA III-Hallen werden in die zukünftige Nutzung mit PETRA IV überführt.



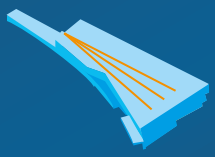
Experimentierhalle „Paul P. Ewald“

Die Experimentierhalle „Paul P. Ewald“ wird Platz für 3 Strahlführungen bieten.



Experimentierhalle „Max von Laue“

Die 300 Meter lange Experimentierhalle „Max von Laue“ bietet eine 7000 Quadratmeter große Experimentierfläche mit insgesamt 8 Strahlführungen. Hier werden sich auch die Laboratorien des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG) und des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) befinden.



Experimentierhalle „Ada Yonath“

Die Experimentierhalle „Ada Yonath“ wird Platz für 3 Strahlführungen bieten.

Strahlführungen

30
Strahlführungen

30 Strahlführungen können parallel genutzt werden. Sie führen die Synchrotronstrahlung zu den Messstationen.

Strahlzeit

circa
5000
Stunden pro Jahr
und Strahlführung

Circa 5000 Stunden Strahlzeit pro Jahr gleichzeitig an jeder der 30 Strahlführungen.

Emittanz reduziert um den Faktor 100

Mit der neuen MBA-Speicherringtechnologie kann der Quellpunkt des PETRA IV-Strahls deutlich verkleinert und der Strahl im Speicherring besser gebündelt werden. Die Emittanz beschreibt die Strahlqualität als Kombination dieser beiden Faktoren.

Grafik: Bureau Bald, DESY

PETRA IV: Starke Forschung am starken Standort

Als einmaliges Großgerät für die hochaufgelöste Strukturforschung macht PETRA IV das Forschungszentrum DESY auch langfristig zu einem international herausragenden Standort für die Erforschung von Materie.

DESY als weltführendes Zentrum für Strukturforschung

Das Forschungszentrum vereint auf seinem Campus in Hamburg-Bahrenfeld herausragende Expertise und vielseitige Anwendungsmöglichkeiten von beschleunigerbasierten Röntgenlichtquellen. So konnte bereits der atomare Aufbau vieler unterschiedlicher Materialien und biologischer Strukturen entschlüsselt werden.

Schon heute brillieren die Freie-Elektronen-Laser FLASH und European XFEL sowie die Speicherring-Röntgenquelle PETRA III. Das interdisziplinäre Zentrum für Infektionsforschung (Centre for Structural Systems Biology, CSSB) nutzt das intensive Röntgenlicht, um nach neuen Wirkmechanismen für künftige Medikamente zu forschen, und erweitert das Methodenspektrum zusätzlich durch modernste Kryo-Elektronenmikroskope. Zusammen mit der Max-Planck-Gesellschaft und der Universität Hamburg betreibt DESY das Center for Free-Electron Laser Science (CFEL), das im Bereich Spektroskopie und Bildgebung von ultrakurzen Prozessen weltweit führend ist.

Prof. Henry Chapman
Leitender Wissenschaftler bei DESY und Professor für Physik an der Universität Hamburg

„Die Synergie zweier herausragender Lichtquellen wie dem European XFEL und PETRA IV in dem exzellenten wissenschaftlichen Umfeld der Science City Bahrenfeld ist für die Strukturforschung an Biomolekülen ein unschätzbarer Standortvorteil."

Ein weiterer Schwerpunkt von DESY ist die Erforschung neuer Nanomaterialien und Hightech-Werkstoffe, die zu Innovationen in wichtigen Zukunftsfeldern wie der Energieforschung, Elektromobilität, Forschung an Wasserstoffspeichern und Informationstechnologie führen.

„PETRA IV ist eine Lichtquelle einer völlig neuen Generation. Das geplante Forschungsgerät führt die Material- und Wirkstoffforschung in die Zukunft und bietet in der Science City Hamburg-Bahrenfeld exzellente Bedingungen für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland."

Gemeinsam mit seinen Partnerinstitutionen von der Universität Hamburg, dem Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG), der Max-Planck-Gesellschaft, dem Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) und weiteren Partnern betreibt DESY Spitzenforschung und entwickelt Schlüsseltechnologien, unter anderem in den Bereichen Laser- und Nanotechnologie sowie Medizin. Neben dem Zukunftsprojekt PETRA IV plant DESY gemeinsam mit der Universität und der Freien und Hansestadt Hamburg die Ansiedlung weiterer interdisziplinärer Forschungszentren – etwa des Centre for Molecular Water Science (CMWS) zur Erforschung der molekularen Eigenschaften von Wasser.

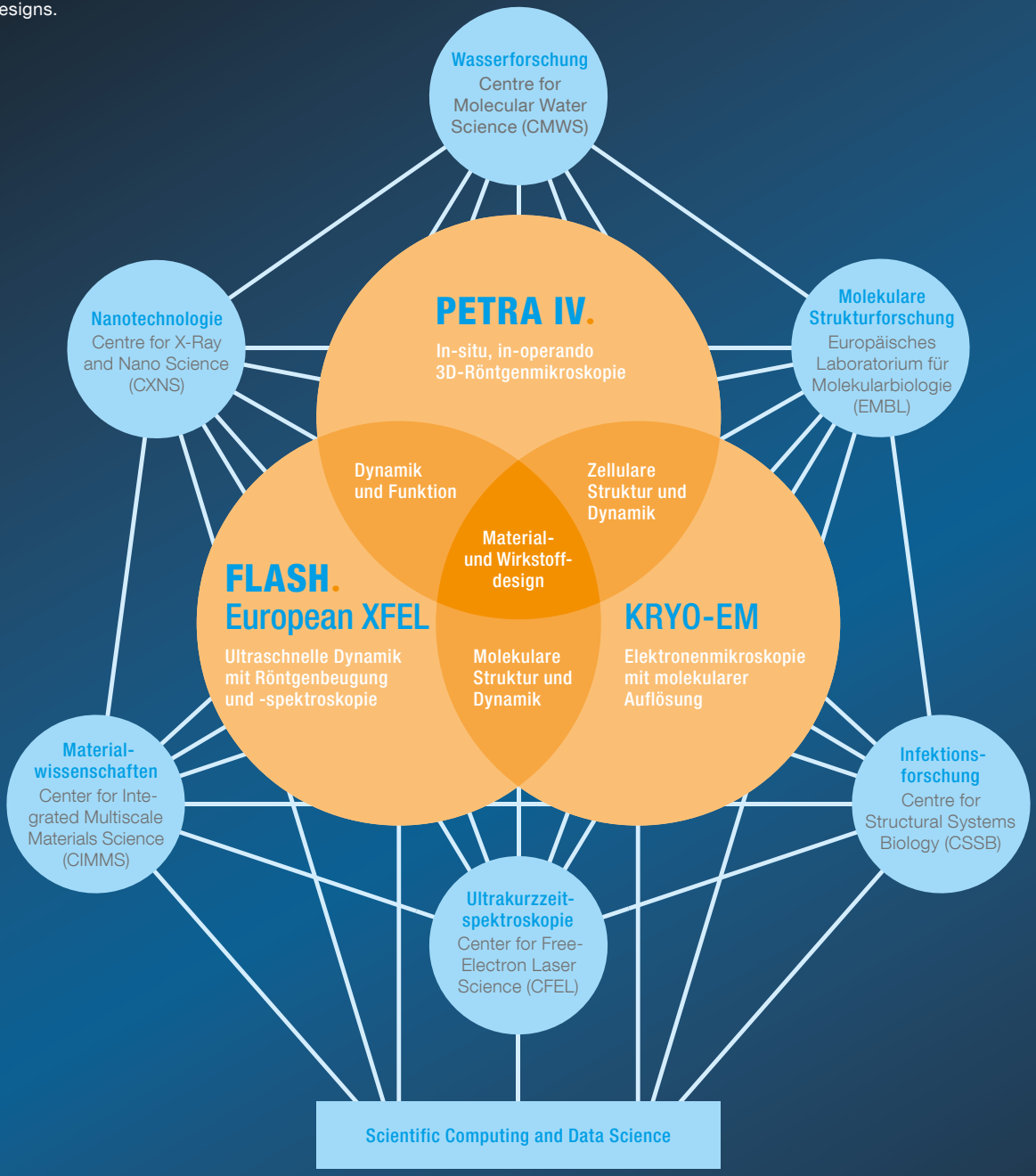
Wissenschaftspark mit internationaler Strahlkraft

Künftig wird DESY zum Herzstück für eine ganze Wissenschaftsstadt – der Science City Bahrenfeld. Schon heute sorgen DESY, Teile der Universität Hamburg und weitere Spitzeninstitute der Wissenschaft für internationale Strahlkraft am Standort Hamburg-Bahrenfeld. Weitere naturwissenschaftliche Bereiche der Universität Hamburg, der Innovationspark Altona und Wohnungsbauvorhaben werden zusätzliche Dynamik in den Stadtteil bringen. PETRA IV ist das zentrale Zukunftsprojekt für DESY auf dem Campus der Science City Bahrenfeld.

Katharina Fegebank
Zweite Bürgermeisterin der Freien und Hansestadt Hamburg und Senatorin der Behörde für Wissenschaft, Forschung und Gleichstellung

Bilder: Gesine Born, DESY; Bina Engel

Spitzenforschung vernetzt
In Hamburg ergänzen sich Großgeräte ideal mit interdisziplinären Zentren. Im Zusammenspiel erschließen sie neue Bereiche des Material- und Wirkstoffdesigns.



Grafik: Science Communication Lab, DESY

Hier wird ein Modell für den Forschungscampus der Zukunft geschaffen, in dem Spitzenforschung mit hochmodernen Großforschungsanlagen, Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses und Transfer in Wirtschaft und Gesellschaft eng verzahnt umgesetzt werden.

Infrastruktur und Service

Für Gastforscherinnen und Gastforscher stehen bei DESY bereits heute umfangreiche Serviceangebote zur Verfügung, die von der wissenschaftlich-fachlichen Betreuung bis hin zu ganz praktischen Fragen des Lebens und Wohnens in Hamburg reichen. Künftig werden insbesondere die Kapazitäten und der Service für die Datenanalyse stark ausgebaut. In der Science City Bahrenfeld entsteht ein interdisziplinäres Zentrum für wissenschaftliches Rechnen, das Center for Data and Computing in Natural Science (CDCS), um den zunehmenden Anforderungen datenintensiver Anwendungen gerecht zu werden. Auch die Experimente an PETRA IV werden enorme Datenmengen erzeugen, und wissenschaftliches Rechnen bildet eine unverzichtbare Basis für den Erfolg moderner Forschungsinfrastrukturen.

Partner für Forschung und Industrie

Als Großforschungsanlage von Weltrang schafft PETRA IV wesentliche Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten für die Industrie und stärkt die Innovationskraft Deutschlands. Der Dreiklang aus Forschung, industrieller Nutzung und Entwicklung von Schlüsseltechnologien ist von Beginn an fest in der Gesamtstrategie des Projekts verankert. Die zukünftigen analytischen Bedarfe der Industrie fließen bereits in die Konzeption ein.

So wird PETRA IV optimale Experimentierbedingungen für Forschungs- und Entwicklungsprojekte der Industrie bereitstellen – zeitsparend und kosteneffizient. Über die Schnittstelle Innovation & Technologietransfer bei DESY erhalten Industriekunden einen passgenauen Zugang zu den Messbereichen und neuen Analysewerkzeugen an PETRA IV: zu Strahlzeit, Machbarkeitsstudien und unterstützenden Leistungen – von der Experimentvorbereitung bis zur Datenauswertung.

„Das geplante Röntgenmikroskop PETRA IV von DESY ist ein Beispiel für Hamburgs ehrgeizige Innovationskultur. Durch die Forschungsergebnisse von PETRA IV entsteht ein großes Potenzial für Sprunginnovationen, die Wissenschaft und Industrie identifizieren und schnell in die Anwendung bringen können. Das sichert uns in Deutschland ein Alleinstellungsmerkmal als Innovationsstandort und macht uns international langfristig wettbewerbsfähig."

Michael Westhagemann
Senator der Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation der Freien und Hansestadt Hamburg

PETRA IV als Technologietreiber

Wissenschaftliche Nutzung und Industrienutzung gehen an PETRA IV Hand in Hand. Neben langfristig angelegten Kooperationsprojekten profitieren Industriekunden auch direkt von der wissenschaftlichen und technischen Expertise vor Ort in der zukünftigen Science City Bahrenfeld.

Dr. Dirk Ullmann
Global Head of Drug Discovery Services, Evotec SE

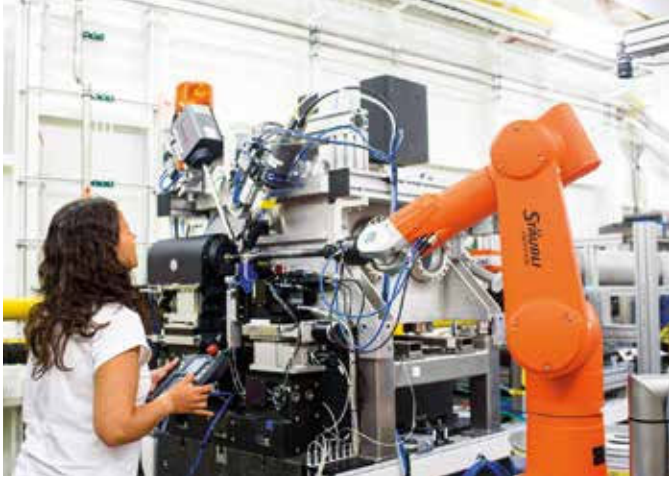
„Mit PETRA IV lassen sich Zellen innerhalb ihrer Umgebung ganzheitlich betrachten. Damit können präklinische Untersuchungen verkürzt, Zielmoleküle punktgenauer optimiert und Medikamente schneller auf den Markt gebracht werden."

Umgekehrt sind der Bau und die wissenschaftliche Nutzung von PETRA IV ohne vorherige Technologieentwicklung seitens der Industrie nicht denkbar. Bereits die hohen Anforderungen an das technische Design – insbesondere die extreme Präzision, die notwendig ist, um eine Strahlfokussierung an der Grenze des physikalisch Möglichen zu realisieren – erfordern neue Hightech-Lösungen.

Ein Beispiel: Damit die mehreren hundert Magnete im PETRA IV-Beschleunigerring stets exakt ausgerichtet bleiben, erforscht DESY gemeinsam mit dem Alfred-Wegner-Institut (AWI) neue, extrem schwingungsarme Unterbauten. Das Konzept setzt auf bionische Strukturen, die auch kleinste störende Vibrationen der Umgebung abfedern. Allerdings müssen für die industrielle Herstellung in hoher Stückzahl neue und innovative Produktionsverfahren entwickelt werden. Gelingt dies, reicht der Markt für eine solche Präzisionslösung weit über die Wissenschaft hinaus.

Bilder: Evonic; BWVI

Bilder: Anne Gaertner; Marta Meyer, DESY



Exzellente Aussichten: In Zukunft können Fachleute aus forschenden Unternehmen an den PETRA IV-Messplätzen Materialien und Wirkstoffe besser untersuchen und Herstellungsprozesse optimieren.

Innovationen für Zukunftsbranchen

In Zukunft wird PETRA IV auch die Herstellung neuer Werkstoffe entscheidend voranbringen, etwa als Türöffner für die Serienproduktion 3D-gefertigter Bauteile. Additive Produktionsverfahren werden immer wichtiger für den Flugzeug- und Automobilbau, da sie besonders leichte Materialien ermöglichen. Aber auch in der Medizintechnik helfen diese Verfahren, beispielsweise in der Produktion von Knochenersatzmaterialien. So gefertigte Bau- oder Ersatzteile müssen jedoch von gleichbleibender Qualität und Sicherheit sein. Bisher verstehen Fachleute die Verschmelzung der Pulverkörner während des Druckprozesses nicht vollständig. Die Frage, warum kleinste Fehler, Unregelmäßigkeiten oder Risse entstehen, lassen sich zukünftig mit PETRA IV beantworten, und zwar durch Messungen der Phasenzusammensetzungen an Pulverkorngrenzen und ortsaufgelöste Untersuchungen der Elementverteilung.

Der 3D-Röntgenblick von PETRA IV erschließt technologische Innovationen in weiteren Bereichen und Branchen, die einen wichtigen Wirtschaftsfaktor darstellen. Er ermöglicht Einblicke in den Nanokosmos von neuartigen Materialien, Nanowerkstoffen, Legierungen oder Kunststoffen. Detailanalysen von Katalyseprozessen eröffnen neues Anwendungspotenzial für die chemische Industrie und den Energiesektor.

„Die Bedeutung neuer Materialien und Werkstoffe steigt. Um sie besser zu verstehen und weiterzuentwickeln, muss man in Größenskalen vordringen, die erst PETRA IV möglich macht. Wichtig für den Innovationsstandort Deutschland ist, dass Spitzenforschung gemeinsam mit der Industrie den Weg für die Technologien der Zukunft bereitet."

Henning Fehrmann
Inhaber und CEO der Fehrmann GmbH und Vorsitzender von DESYs Innovation Advisory Committee

Extrem effiziente Messzeiten und höchste Bildpräzision schaffen die notwendigen Voraussetzungen für die Medikamentenentwicklung in der Gesundheitsbranche. Die enormen Datenmengen der PETRA IV-Experimente treiben intelligente Konzepte der Datenverarbeitung durch „Smart Data"-Technologien und künstliche Intelligenz voran.

Rechtzeitig zum Start von PETRA IV wird die komplette Infrastruktur für Start-ups und Innovationsprojekte fertig sein. Zusätzlich zu dem bereits bezogenen DESY Innovation Village entstehen in den nächsten Jahren weitere Gebäude: das Innovationszentrum Start-up Labs Bahrenfeld sowie das Technologie- und Gründerzentrum, das ab 2025 als Inkubator Start-ups aus den Bereichen neue Materialien, Biotechnologie und verwandten Themengebieten unterstützen wird.

Bild: DFZ Architekten, DESY

Inkubator für Start-ups: Im Innovationszentrum können Unternehmen mit exzellenten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zusammenarbeiten und neue Ideen entwickeln.

Strategie für die Zukunft

Die einzigartigen Einblicke und Experimentiermöglichkeiten mit PETRA IV werden maßgeblich dazu beitragen, entscheidende Fortschritte in Innovation und Technik zu erreichen und den globalen Herausforderungen heute und in Zukunft zu begegnen.

Als Weltklasseanlage und Herzstück der zukünftigen Wissenschaftsstadt Science City Bahrenfeld stärkt PETRA IV den Wissenschafts- und Technologiestandort Deutschland langfristig im internationalen Wettbewerb. Deutschland sichert sich damit für die kommenden Jahrzehnte eine Spitzenposition in der Materialforschung mit Röntgenstrahlung und insbesondere im Zukunftsfeld der Strukturanalyse von Biomolekülen.

PETRA IV ist integraler Baustein nationaler und internationaler Strategien. Sowohl die fachliche als auch die strategische Planung von PETRA IV ist eng in die internationale Forschungslandschaft eingebettet, um sicherzustellen, dass mit PETRA IV ein international sichtbarer Leuchtturm auf dem neuesten Stand der Wissenschaft entsteht. Im nationalen Kontext erfolgt die Planung in enger Abstimmung mit den zukünftigen Nutzergruppen und den Betreibern weiterer Forschungslichtquellen innerhalb und außerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft.

Bereits existierende und geplante Lichtquellen werden sich optimal ergänzen, um die wissenschaftlichen Bedarfe der unterschiedlichen Fachdisziplinen bestmöglich zu decken. Die vorgesehene Begutachtung des PETRA IV-Konzepts durch den Wissenschaftsrat sichert Erfolg und wissenschaftliche Exzellenz.

PETRA IV ist der konsequente Schritt hin zur nächsten Generation von Röntgenlichtquellen. Als eines der führenden Beschleunigerzentren der Welt verfügt DESY über 60 Jahre Erfahrung im Bau und Betrieb von komplexen wissenschaftlichen Großgeräten der Spitzenklasse, nicht zuletzt der Röntgenquelle PETRA III und des Beschleunigers für den Röntgenlaser European XFEL. Durch den Ausbau von PETRA III zur dann weltbesten 3D-Röntgenlichtquelle PETRA IV werden ab 2027 Nutzergruppen aus aller Welt einzigartige Einblicke in den Nanokosmos erhalten – mit bisher unerreichter Detailschärfe. Langfristig wird PETRA IV auch den Weg zu neuen Beschleunigertechnologien wie etwa der Plasmabeschleunigung bereiten. So sichert PETRA IV auch zukünftig exzellente Forschungsbedingungen und erschließt das wissenschaftliche Fundament für neue Entdeckungen und dringend benötigte Entwicklungen.

Zukunftsperspektive: Rund um den DESY-Campus in Hamburg sollen bis zum Jahr 2040 neue Anlagen, Zentren und Forschungsgebäude entstehen. PETRA IV wird in der künftigen Science City Bahrenfeld eine zentrale Großforschungsanlage sein.

Bild: Spengler Wiescholek Architekten Stadtplaner, WES GmbH Landschaftsarchitekten, Urban Catalyst GmbH
Visualisierung: Moka-studio, Luftbild: Matthias Friedel

Titelgrafik: Science Communication Lab, DESY

Deutsches Elektronen-Synchrotron
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Die Helmholtz-Gemeinschaft hat die Aufgabe, langfristige Forschungsziele des Staates und der Gesellschaft zu verfolgen, einschließlich Grundlagenforschung, in wissenschaftlicher Autonomie. Dazu identifiziert und bearbeitet sie große und drängende Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft durch strategisch-programmatisch ausgerichtete Spitzenforschung. Mit mehr als 40 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern und einem Jahresbudget von 4,8 Milliarden Euro ist die Helmholtz-Gemeinschaft die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands.

www.helmholtz.de

HELMHOLTZ
SPITZENFORSCHUNG FÜR
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN

Impressum

Herausgeber
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft

Standort Hamburg
Notkestraße 85, 22607 Hamburg
Tel. +49 40 8998-0 | Fax +49 40 8998-3282
desyinfo@desy.de

Standort Zeuthen
Platanenallee 6, 15738 Zeuthen
Tel. +49 33762 7-70 | Fax +49 33762 7-7413
desyinfo-zeuthen@desy.de

www.desy.de

Redaktion und Realisation
Kristin Hüttmann, Gabriele Schönherr (science³, Berlin)

Fachliche Begleitung
Klaus Ehret, Stephan Klumpp, Katharina Scheffler

Schlussredaktion
Ilka Flegel

Gestaltung und Produktion
Diana von Ilsemann

Bildbearbeitung und Herstellung
EHS Media, Hamburg

Redaktionsschluss
Dezember 2019