



Mehr als Stahl, Beton und Supraleiter

Um ein Forschungszentrum wie FAIR zu bauen, braucht es Menschen mit Leidenschaft.

Kerstin Sonnabend

Im Norden der Wissenschaftsstadt Darmstadt befindet sich das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Dort haben Forschende unter anderem die Elemente Bohrium, Hassium, Meitnerium, Darmstadtium, Roentgenium und Copernicium mit den Ordnungszahlen 107 bis 112 entdeckt und die Krebstherapie mit Schwerionenstrahlen entwickelt. Seit 1990 hat eine größere Beschleunigeranlage die experimentellen Möglichkeiten deutlich erweitert; schon kurz darauf gab es erste Vorschläge, um die Rolle als weltweit führendes Forschungszentrum mit Schwerionenstrahlen dauerhaft zu untermauern: Die Idee für die „Facility for Antiproton and Ion Research – FAIR“ war geboren.¹⁾

Wer die Wissenschaftsstadt Darmstadt nach Norden verlässt, um über die B3 nach Frankfurt zu fahren, trifft bei der Ortseinfahrt des kleinen Stadtteils Wixhausen auf einen Wegweiser zu GSI/FAIR. Nach einem guten Kilometer ist der Campus erreicht, dessen Eingang sich hinter einem zehnstöckigen Parkhaus versteckt. Gleich daneben wächst ein Rohbau in die Höhe, in dem das FAIR Control Center, ein Besucherinformationszentrum und mehr als 200 Büroplätze Raum finden

sollen – neue Infrastruktur, die das wachsende Forschungszentrum in Zukunft braucht.

Derzeit bilden ein Linear- und ein Ringbeschleuniger zusammen mit einem Fragmentseparator die Beschleunigeranlage der GSI. Für FAIR kommt unter anderem mit dem SIS100 ein weiterer Ringbeschleuniger hinzu, der Ionenstrahlen mit höherer Energie und Intensität liefern kann (Infokasten). Weltweit einzigartig ist die Vielfalt der Strahlen an der GSI: Von Wasserstoff bis Uran kann jedes stabile Element beschleunigt werden. FAIR bietet neue Möglichkeiten, damit zu experimentieren, und zielt auf große Fragen der Grundlagenforschung ab, zum Beispiel wie die Elemente entstanden sind. Gleichzeitig bietet sich aber auch die Möglichkeit angewandter Forschung: So geht es in einer Kooperation mit der ESA um den Schutz von Mensch und Technik vor kosmischer Strahlung bei Weltraummissionen.

Als Technischer Geschäftsführer von GSI/FAIR verantwortet Jörg Blaurock auch die Gesamtprojektleitung von FAIR. Als er 2016 sein Amt antrat, hatte das Projekt FAIR gerade eine Evaluation durch das Bundesforschungsministerium hinter sich, die zu einer entscheidenden Neustrukturierung führte: Die Geschäftsleitung von GSI und FAIR arbeitet seither in Personalunion – und verfolgt vier strategische Ziele. Neben der Campus-Entwicklung gehören dazu auch das Upgrade der existierenden Beschleuniger sowie die erste Experimentierphase mit Detektoren und Komponenten für FAIR an den GSI-Beschleunigern: FAIR Phase-0.

1) O. Kester, H.-D. Krämer, H. Eickhoff und H. Stöcker, Physik Journal, Januar 2012, S. 31



ton42 / FAIR

Die größten Herausforderungen bietet aber vermutlich der Bau von FAIR selbst. Da sind einerseits die schieren Dimensionen, wenn es um die bewegte Erde oder den benötigten Beton und Bewehrungsstahl geht. Andererseits gilt es, die technischen Komponenten zu entwickeln und termingerecht zu bauen. Dazu gehören verschiedenste supraleitende Magnete, Vakuumkammern und Hochleistungsnetzgeräte.

Dabei kommt es schnell zu Verzögerungen, wenn nicht alle Zahnräder exakt ineinandergreifen und perfekt zusammenarbeiten. Hinter jedem dieser Zahnräder stehen Menschen – das eigentliche Kapital von FAIR, wie Blaurock betont. Sie sorgen unter anderem dafür, dass die Gebäude der Anlage entstehen, dass internationale Kollaborationen und Angestellte der GSI gemeinsam die Beschleuniger und Detektoren entwickeln und bauen und dass die Infrastruktur für supraleitende Magnete funktioniert.

Gelassenheit ist Trumpf

Einer von ihnen ist Harald Hagelskamp, die Ruhe in Person: Der studierte Geologe ist mit den Herausforderungen von Großbaustellen bestens vertraut. Nach der Promotion an der University of Pretoria in Südafrika über Kohleexploration und -abbau wechselte er zur Anlagenbautechnik und hat danach den Bau von Kraftwerken verantwortet. Mehr als ein Dutzend Gewerke zu koordinieren und den Betrieb auf der Baustelle trotz Änderungen am Plan am Laufen zu halten, sind für den Leiter der FAIR-Baustelle Routine. Ob Kraftwerk oder Forschungsanlage: Komplex und herausfordernd seien beide Aufgaben. Trotzdem habe er sich für FAIR eine andere Arbeitsweise aneignen müssen: „Wir bauen hier einen Prototypen“, bringt er den Unterschied auf den Punkt. Anders als bei großen Industrieanlagen finde hier fast jeder Schritt zum ersten Mal statt. „Und vermutlich wird ihn genau so niemand mehr ein zweites Mal tun.“

◀ Das Rendering zeigt den Blick auf die gesamte Anlage: Den Campus des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung (links oben) ergänzen künftig die Anlagen von FAIR. Während der oberirdische Teil des Kreuzungsgebäudes (Mitte) gut zu sehen ist, verschwindet der Ringbeschleuniger SIS100 (rechts oben) im Wald.

Ein gutes Beispiel dafür ist der neue große Ringbeschleuniger, das SIS100. Wenn von dem Tunnel für diesen Teil der Anlage die Rede ist, sind eigentlich drei konzentrisch ineinander liegende Bereiche gemeint. „Außen für den Beschleuniger, innen zur Versorgung – und dazwischen der Medientunnel für Kabel und Rohrleitungen“, erklärt Hagelskamp den Aufbau. Weil der Medientunnel im Wesentlichen aus neun Metern Stahlbeton besteht, ist es möglich, auch während des Strahlbetriebs an den Anlagen im Versorgungstunnel zu arbeiten. Der Durchgang zum Beschleuniger ist an mehreren Stellen des 1100 Meter langen Rings möglich.

Insgesamt gehören allein zur technischen Gebäudeausrüstung zehn Gewerke wie die Kälteversorgung oder der Starkstrom. Ein detaillierter Plan gibt Tag für Tag an, was an welcher Stelle von wem zu welchem Zeitpunkt fertigzustellen ist. „Bei der kleinsten Abweichung müssen wir alles Nachgeordnete entsprechend anpassen“, beschreibt Hagelskamp dieses dynamische Puzzle. Weil das Einbringen großer und schwerer Bauteile in die Tiefe des Tunnels nur an einer Stelle möglich ist, käme es hier manchmal zu Gedränge: „Wenn sich jemand benachteiligt fühlt, muss ich auch mal die Wogen glätten.“

Dass einige der Bauten für FAIR genauso tief in die Erde reichen, wie sie darüber aufragen, zeigt sich im sogenannten Kreuzungsgebäude. Hier befindet sich eine Rampe, die an eine Skisprungschanze erinnert: 17 Meter geht es in die Tiefe mit etwa 25 Prozent Steigung. Auf mehreren



G. Otto / GSI, FAIR

Im Kreuzungsgebäude von FAIR zeigt Harald Hagelskamp anhand der Tunnel auf verschiedenen Ebenen und den verbindenden Rampen, wo künftig die Strahlführungen vom und zum Ringbeschleuniger verlaufen.

Zum offiziellen Baubeginn im Juli 2017 waren auf dem Gelände von FAIR bereits die Zufahrtswege angelegt und der Wald gerodet. Seither hat sich dort einiges getan, wie die Aufnahmen in Jahresabständen belegen.



Stufen stehen künftig die Magnete, die den Ionenstrahl vom Niveau der GSI-Beschleunigeranlage in die Tiefe des SIS100-Rings führen werden. Drei weitere Strahlführungen kreuzen seinen Weg an diesem Punkt: die Extraktion aus dem Ring in Richtung des Spektrometers Super-FRS und in Richtung des CBM-Experiments sowie eine Abkürzung, die direkt von den GSI-Beschleunigern zum Super-FRS führt. Letztere ist für die „Early Science“ vorgesehen – Untersuchungen, die nicht auf die höheren Strahlenergien aus dem SIS100 angewiesen sind und darum bereits vor dessen Inbetriebnahme stattfinden könnten.

Harald Hagelskamp findet auch im Tunnelgewirr des Kreuzungsgebäudes sofort denjenigen, der zur Halle für das CBM-Experiment führt. Dieses soll helfen, dem inneren Aufbau von Neutronensternen auf die Spur zu kommen. Noch wirkt der leere Raum riesig – doch der Eindruck täuscht: „Wenn die Detektoren mitsamt ihrer Infrastruktur erst einmal aufgebaut sind, wird der Platz gerade ausreichend sein“, sagt Hagelskamp. Auf dem Boden markieren mehr als 120 Löcher, wo später einmal die Stahlträger stehen, welche die Plattform für einen Teil des Detektor-Aufbaus tragen. Eine Miniaturversion des Experiments hat die zuständige Kollaboration als mCBM bereits am SIS18 der GSI aufgebaut, um das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten und die Datenauslese vorab zu testen.

Im Rohbau sollen alle Gebäude bis zum Jahresende fertig sein – ein wichtiger Meilenstein, um ab 2028 mit „First Science“ zu beginnen. Dazu gehören Experimente, die auf Strahlenergien angewiesen sind, die der Ringbeschleuniger SIS100 bereitstellt. Doch noch klaffen Lücken

im Gebäudekomplex: Manchmal müssen die Wände noch in die Höhe wachsen, manchmal fehlt nur noch die Decke. An einer solchen Stelle bestätigt der Blick nach oben, dass die Anlage nicht aus Stahlbeton im herkömmlichen Sinne besteht. Nur in der Mitte der zwei Meter dicken Schicht finden sich die typischen Stahlgitter; darüber und darunter liegen fingerdicke Stahlkabel dicht an dicht. „Dieser Aufbau sorgt für rissfreie Oberflächen und den notwendigen Strahlenschutz“, erklärt Harald Hagelskamp. Für das nächste Teilstück der Decke werden die Stahlkabel miteinander verschraubt.

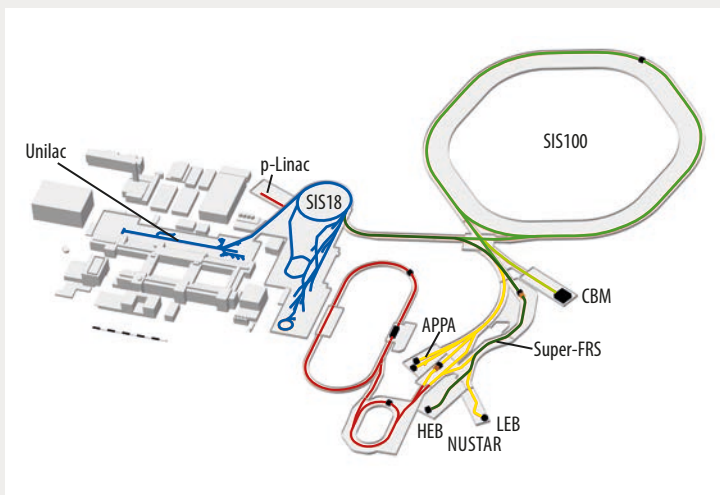
Den Exoten auf der Spur

Für einen Teil der neuen FAIR-Beschleunigeranlage und der Experimente ist Haik Simon zuständig. Der Projektleiter für den Super-FRS ist auch stellvertretender Sprecher des R³B-Experiments, das unter anderem Kernreaktionen untersucht, die für die Nukleosynthese schwerer Elemente entscheidend sind. Seit 2012 verantwortet er den Bereich, der die „Rare Isotope“-Produktion bei FAIR sicherstellen soll. Sein Ziel ist es, die Schwerionenstrahlen aus dem SIS100 zu zertrümmern und die gesuchten Kandidaten aus dem Wust von Fragmenten herauszusortieren.

Das ist die Aufgabe des sechsstufigen Fragmentseparators Super-FRS. Während die Strahlführung im SIS100 aus einer Abfolge von Dipol-, Quadrupol- und Sextupolmagneten besteht, die den Ionenstrahl auf seiner kreisförmigen Bahn halten bzw. ihn fokussieren, kommt der Super-FRS nicht mit diesen Typen aus. „Ohne Korrekturen durch

Das Universum im Labor

Die „Facility for Antiproton and Ion Research – FAIR“ soll unter anderem helfen, die Synthese schwerer Elemente zu verstehen. Dazu gilt es, die Eigenschaften neutronenreicher instabiler Isotope zu bestimmen, die sich nur hier in ausreichender Menge erzeugen lassen. Schon seit 2020 finden im Rahmen von „FAIR Phase-0“ an den Anlagen des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung (blau) Experimente mit Detektoren statt, die für FAIR entwickelt wurden. Der Bau und die Inbetriebnahme von FAIR erfolgen in mehreren Etappen, aus denen sich verschiedene Szenarien für die geplante Forschung ergeben. Bei der „Early Science“ (dunkelgrün) nutzen die Experimente des High Energy Branch (HEB) Ionenstrahlen aus dem Ringbeschleuniger SIS18 und den Fragmentseparator Super-FRS; für die „First Science“ (grün) braucht es dann die höheren Energien aus dem SIS100. Das CBM-Experiment (hellgrün) soll bis 2028 ebenfalls in Betrieb gehen. Danach folgen der Low Energy Branch (LEB, gelb) und Experimente zu Atom- und Plasmaphysik (APPA). Abschließend kommen die Speicherringe für Experimente mit Antiprotonen (rot) hinzu und ein neuer Vorbeschleuniger für Protonenstrahlen (p-Linac).





2018



2019



2020

höhere Multipolordnungen können wir die verschiedenen Isotope nicht voneinander trennen“, sagt Haik Simon. Das besonders geformte und speziell designte Magnetfeld sogenannter Multiplettmagnete sorgt dafür, dass sich das Gemisch immer weiter ausdünn und am Ende genau die Isotope beim Experiment ankommen, die untersucht werden sollen. Diese Magnete sind ein gutes Beispiel, wie beim Aufbau von FAIR In-kind-Beiträge der Gesellschafter einfließen und die internationale Zusammenarbeit funktioniert: „Gebaut in Italien oder Spanien, getestet am CERN, endmontiert von polnischen Technikern vor Ort in Darmstadt“, zählt Simon auf.

Auch die Installationen rund um das Produktionszoo sind eine gemeinsame Entwicklung der niederländischen Universität Groningen und der GSI. Das Target besteht aus Graphit und muss im Betrieb bis zu vier Kilowatt Leistung aufnehmen, wenn die Strahlen aus dem SIS100 darauf treffen. Dabei entsteht so viel Radioaktivität, dass Beton zur Abschirmung nicht ausreicht. „Da helfen nur Eisen und Stahl“, erklärt Haik Simon. Die Seitenwände der „Target Area“ werden 1,60 Meter dick und bestehen aus Eisenblöcken; als Dach dienen mindestens 87 Zentimeter dicke Stahlplatten. Noch ist davon nichts zu sehen und auch die künftige „Hot Cell“ steht knöcheltief unter Wasser. Hier sollen einmal alle aktivierten Komponenten abklingen. Weil vor allem kurzlebige Isotope entstehen, ist die Aktivität anfangs sehr hoch, aber schon nach wenigen Wochen verschwunden.

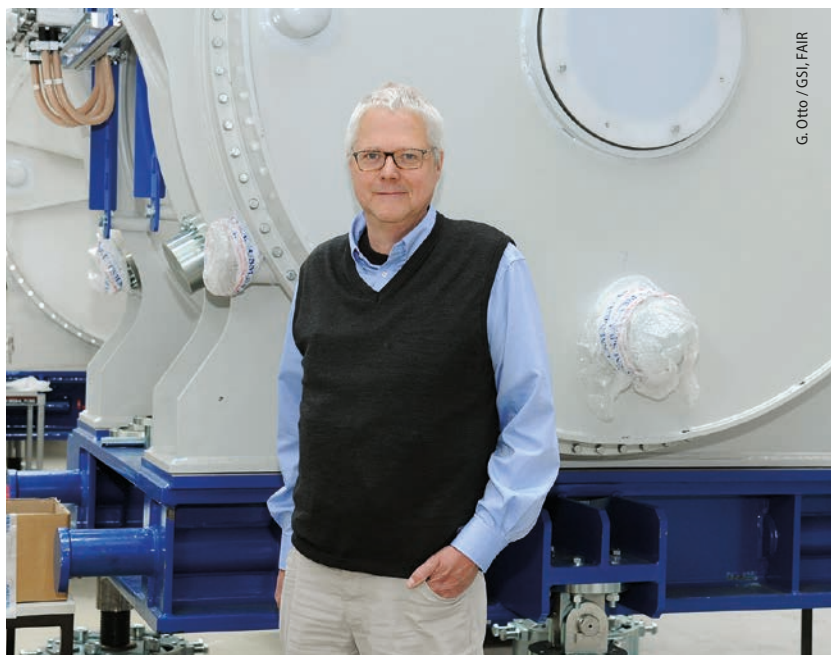
Ganz andere Herausforderungen hat Haik Simon als stellvertretender Sprecher des R³B-Experiments zu meistern, damit mehr als 250 Mitglieder aus 16 Arbeitsgruppen in 23 Ländern reibungslos kooperieren. Sie haben die Detektoren entwickelt und größtenteils auch schon gebaut, um Reaktionen mit relativistischen radioaktiven Ionenstrahlen zu untersuchen. Ein wichtiger Bestandteil ist der supraleitende Dipolmagnet GLAD. Er sorgt dafür, dass die leichten und schweren Reaktionsprodukte, emittierte Neutronen sowie der verbliebene Strahl nach der Reaktion unterschiedliche Wege gehen.

Im Cave C der GSI, wo der Magnet bereits bei Experimenten im Rahmen von FAIR Phase-0 im Einsatz war, nimmt er die komplette Breite ein: Mit einer Grundfläche von 20 Quadratmetern dominiert er den Aufbau. Dahinter drängen sich die Detektoren, um den Flugweg der verschiedenen Teilchen und ihre Energie zu bestimmen. „Im High-Energy-Building von FAIR haben wir mehr Platz und können die Leistungsfähigkeit der Systeme besser nutzen“, stellt Simon fest. Unter anderem sei es dann möglich, den Neutronendetektor NeuLAND so zu platzieren, dass die Energieauflösung um einen Faktor 2 bis 3 besser wird. Von NeuLAND existiert momentan die Hälfte des angestrebten

Aufbaus: Die noch fehlenden Ebenen des modular aufgebauten Detektors sollen nach und nach dazukommen. „Immer dann, wenn der internationalen R³B-Kollaboration das Personal und die Mittel für den weiteren Ausbau zur Verfügung stehen“, erklärt Simon. In Deutschland hänge das von der Förderung des Bundesforschungsministeriums ab, zum Beispiel im Rahmen von Verbundforschungsprojekten.

Eiskalte Leidenschaft

Um all die supraleitenden Magnete in der Strahlführung oder den Experimenten von FAIR zu betreiben, braucht es vor allem tiefe Temperaturen. Dafür hat Holger Kollmus eine Passion: „Flüssiges Helium in großen Mengen dient als Basis aller modernen Beschleunigeranlagen, angefangen mit dem Large Hadron Collider des CERN“, kommt er ins Schwärmen. Nach dem Physikstudium in Frankfurt hat er an der Universität Freiburg mit einer Arbeit an der GSI promoviert und danach am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg gearbeitet. Bei GSI/FAIR leitet er seit 2012 die Gruppe Kryogenik, zu der mittlerweile 16 Mitarbeitende gehören. Sie kümmern sich beim Projekt FAIR um alles, was mit flüssigem Helium zu tun hat. In seinen Verantwortungsbereich fällt es, die Kälteanlagen, Verteil- und Kontrollsysteme für den Beschleuniger auszulegen, aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Aber er hilft auch den



G. Otto / GSI, FAIR

Als Projektleiter des Fragmentseparators Super-FRS verantwortet Haik Simon auch die Entwicklung der Multiplettmagnete, mit denen sich die gewünschten Isotope aus dem Ionenstrahl nach der Fragmentierung aussortieren lassen.



2021



2022



2023

Experiment-Kollaborationen bei Fragen zu ihren Kryosystemen und ist für die Testanlage der kryogenen Magnete zuständig: „Wir haben einen großen Gestaltungsspielraum für kreative Lösungen.“

Welche Komplexität sich zum Beispiel hinter den tonnenschweren supraleitenden Magneten verbirgt, zeigt er an einem der Teststände: „Wir haben jeden der 110 Dipolmagnete des SIS100 bis auf die letzte Verbindung geprüft.“ Das hat jeweils eine Woche gedauert; der Teststand war aber für vier Wochen belegt, weil auch Montage, Cooldown und Demontage je eine Woche benötigten. Um Wartezeit zu vermeiden, waren daher vier Teststände parallel im Einsatz. Neben dem Testen galt es, jeden einzelnen Magneten auf den Einsatz am SIS100 vorzubereiten: Wenn durch die Magnetspulen zum ersten Mal Strom fließt, lässt sich noch nicht der Nominalwert erreichen. Erst ein sogenanntes Quench-Training erhöht den Strom und damit das Magnetfeld in mehreren Anläufen.

Die supraleitenden Kabel, welche die Magnete mit Strom versorgen, bestehen aus einem Chrom-Nickel-Rohr mit fünf Millimetern Durchmesser, durch das später flüssiges Helium zur Kühlung strömt. Darum winden sich mehr als 20 dünne Kupferdrähte für den Strom – so hat es zumindest den Anschein. „Das Kupfer dient nur als Trägermaterial

für den Supraleiter NbTi“, erklärt Kollmus: „Der ist zu bröselig, um daraus freitragende Drähte herzustellen.“ Bis zu 14 Kiloampere fließen später einmal durch die Kabel, die sich gut in die gewünschte Form biegen lassen und wenig Platz brauchen. Ohne diese Technik wären Beschleunigeranlagen wie FAIR nicht realisierbar. Das Kryolabor mit seinen Testständen bleibt auch in Zukunft bestehen, um Magnete, die beim Betrieb Probleme machen, vor Ort zu überprüfen und neue Techniken zu entwickeln und zu erproben.

Die Bevölkerung mitnehmen

Beim Bau von FAIR haben die Verzögerungen im ursprünglichen Zeitplan und steigende Kosten für negative Schlagzeilen gesorgt. Zu Protesten an der Großbaustelle kam es dagegen nicht, denn die Identifikation der Bevölkerung in der Umgebung mit „ihrer GSI“ – und in Zukunft auch FAIR – ist groß. Dafür sorgen Outreach-Aktionen zur Wissenschaft, ein ständiger Austausch über den Fortgang auf der Baustelle, aber auch die Integration der Anlage in die Umgebung. Selbst bewachsende Fassaden werden dazu führen, dass sich die wuchtigen Betonbauten auf dem Betriebsgelände von FAIR in die grüne Außenanlage einfügen. Der nördliche Bauabschnitt mit dem SIS100-Tunnel soll bis auf wenige Zufahrtswege wieder bewaldet werden und ist nach Ende der Bauarbeiten für die Öffentlichkeit zugänglich. Die Prinzenschneise – ein beliebter Forstweg zum Spaziergehen und Radfahren – ist dann wieder ohne Einschränkungen nutzbar. Um das zu ermöglichen, sorgt an der Tunneldecke unter den Kreuzungspunkten eine 80 Zentimeter dicke Stahlschicht für zusätzliche Abschirmung.

Der Rundblick von der Aussichtsplattform am Rand des GSI-Geländes zeigt die komplette Baustelle von FAIR. Der Ringtunnel für das SIS100 ist bereits wieder verschwunden und lässt sich nur noch anhand einzelner Aufbauten erkennen. Das Kreuzungsgebäude ragt als markanter Punkt in scheinbar greifbarer Nähe auf; die Gebäude der GSI wirken im Vergleich zu den Neubauten winzig. Erst der Vergleich macht die Dimensionen der Baustelle klar und belegt deutlich, dass es sich um weit mehr als eine Erweiterung der GSI handelt. Wer Gelegenheit hat, sich das anzuschauen, wird staunen: „Die bauen das wirklich!“



Holger Kollmus hat mit seinem Team und der Abteilung für supraleitende Magnete die 110 Dipolmagnete des Ringbeschleunigers SIS100 an den eigens entwickelten Testständen im Kryolabor Stück für Stück geprüft.

Dieses Video zeigt im Zeitraffer, was sich auf der FAIR-Baustelle von 2018 bis 2023 getan hat.

