

# **BESCHLEUNIGER**

**für Teilchen, Wissen und Gesellschaft**

Komitee für Beschleunigerphysik



Das **Komitee für Beschleunigerphysik KfB** vertritt die deutschen Beschleunigerphysikerinnen und -physiker gegenüber politischen und wirtschaftlichen Organisationen sowie der Öffentlichkeit. Das Komitee fördert zudem den Kontakt und die Zusammenarbeit innerhalb der Gemeinschaft der Beschleunigerphysikerinnen und -physiker. Es besteht aus insgesamt 12 Mitgliedern, die an deutschen Universitäten, Helmholtz-Zentren, sonstigen deutschen Forschungsinstituten oder ausländischen Instituten mit deutscher Beteiligung tätig sind. Die Mitglieder werden für eine Dauer von drei Jahren durch die im Forum registrierten Beschleunigerphysikerinnen und -physiker in geheimer Wahl bestimmt. Das Komitee wurde im Jahr 2011 gegründet und Ende des Jahres 2013 neu gewählt.



**Wolfgang Hillert** ist Vorsitzender des Komitees für Beschleunigerphysik und des Arbeitskreises Beschleunigerphysik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Zudem hat er die technische und wissenschaftliche Leitung des Elektronenbeschleunigers ELSA an der Universität Bonn inne.

## WIE FUNKTIONIEREN BESCHLEUNIGER?

## WER BRAUCHT BESCHLEUNIGER?

2–3	<b>Vorwort</b>	14–15	Elektrische Kräfte <b>Teilchen Beine machen</b>	26–27	Beschleuniger für die <b>Industrie</b>
4–5	<b>Stimmen</b>	16–17	Magnetische Kräfte <b>Ablenkungsmanöver</b>	28–29	<b>Medizin</b>
6–7	<b>Von der Teilchen- quelle bis zum Teilchenfänger</b>	18–19	Linear- und Ringbeschleuniger <b>Gerade oder rund?</b>	30–33	<b>Forschung mit Photonen</b>
8–9	<b>Was womit wozu beschleunigen?</b>	20–21	Technologien <b>»Geht nicht« war gestern</b>	34–37	<b>Forschung mit Neutronen</b>
10–11	<b>Die Energie beschleunigter Teilchen</b>	22–23	Alternative Beschleunigungstechnologien <b>Kompakte Konzepte</b>	38–41	<b>Kernphysik</b>
				42–45	<b>Teilchenphysik</b>

## **SEHR GEEHRTE LESERINNEN UND LESER,**

Teilchenbeschleuniger sind aus unserer heutigen Welt kaum noch wegzudenken. Man findet sie nicht nur in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung und in angewandten Disziplinen wie der Materialwissenschaft, sondern längst auch in Industrie und Medizin. Die Palette reicht von Kompaktanlagen, die kleiner als ein Kühlschrank sind, bis hin zu kilometerlangen Großgeräten. Entwicklung und Betrieb neuartiger Teilchenbeschleuniger bedingen meistens Vorstöße in technologisches Neuland, die vielfach bedeutende Anwendungen in weiten Bereichen der Gesellschaft nach sich ziehen. Immer komplexer werdende Großanlagen erfordern die überregionale Zusammenarbeit von hervorragend ausgebildeten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, Ingenieurinnen und Ingenieuren und führten zur Entstehung des eigenständigen Forschungsgebiets der Beschleunigerphysik, das mittlerweile an einer Reihe deutscher Universitäten als Studienfach angeboten wird.

Zusätzliche Unterstützung erfährt die beschleunigerphysikalische Forschung durch das im Jahr 2011 gegründete Komitee für Beschleunigerphysik KfB. Als ständige Vertretung der deutschen Beschleunigerphysikerinnen und -physiker berät es forschungsfördernde Institutionen und unterstützt die Zusammenarbeit und den Kontakt innerhalb der Gemeinschaft.

Mit der vorliegenden Broschüre wendet sich das KfB an die interessierte Öffentlichkeit, an Schülerinnen, Schüler und Studierende sowie Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft. Wir geben Einblicke in die grundlegenden Fragestellungen und Forschungsschwerpunkte bei Entwicklung und Einsatz von Beschleunigern und stellen Beschleunigerprojekte in Deutschland oder mit deutscher Beteiligung vor. Begleiten Sie uns in die faszinierende Welt der Beschleuniger.

Viel Spaß bei der Lektüre  
wünscht Ihnen

### **WOLFGANG HILLERT**

Vorsitzender des Komitees für Beschleunigerphysik  
Februar 2016

## **RESSOURCEN SCHONEN, MENSCHEN VERBINDEN**

48–49 Energiesparen und Recycling  
**Ressourcenschonend beschleunigen**

Ausbildung  
50–51 **Berufsfeld Beschleuniger**

Internationale Zusammenarbeit  
52–53 **Globale Netzwerke**

54–55 **Beschleunigerphysik in Deutschland**

56 **Impressum**



» Die Forschung und Entwicklung auf unserem Gebiet erfordern eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit und immer wieder innovative Ansätze. Das alles macht Beschleunigerphysik für mich so spannend – jeden Tag erneut.« — **Anke-Susanne Müller**, Professorin für Beschleunigerphysik, Direktorin der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA



» Sowohl der Bau von Beschleunigern als auch deren Nutzung bringen Experten aus aller Welt zusammen. Die Freude an der gemeinsamen Arbeit, ob in der Ausbildung oder in der Spitzenforschung, schlägt dabei unzählige Brücken zwischen Kulturen und Völkern.« — **Helmut Dosch**, Vorsitzender des Direktoriums, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY



» Ich bin Teil des Betriebs-Teams des LHC. In dieser Rolle führe ich im Kontrollraum Messungen durch und schreibe Programme, um die Instrumente im Strahlrohr des LHC zu bedienen. Man kann sich auf nichts richtig vorbereiten, jeder Tag birgt neue Erkenntnisse. Echt motivierend dabei: Jede Idee findet Gehör.« — **Maria Kuhn**, Doktorandin an der Universität Hamburg



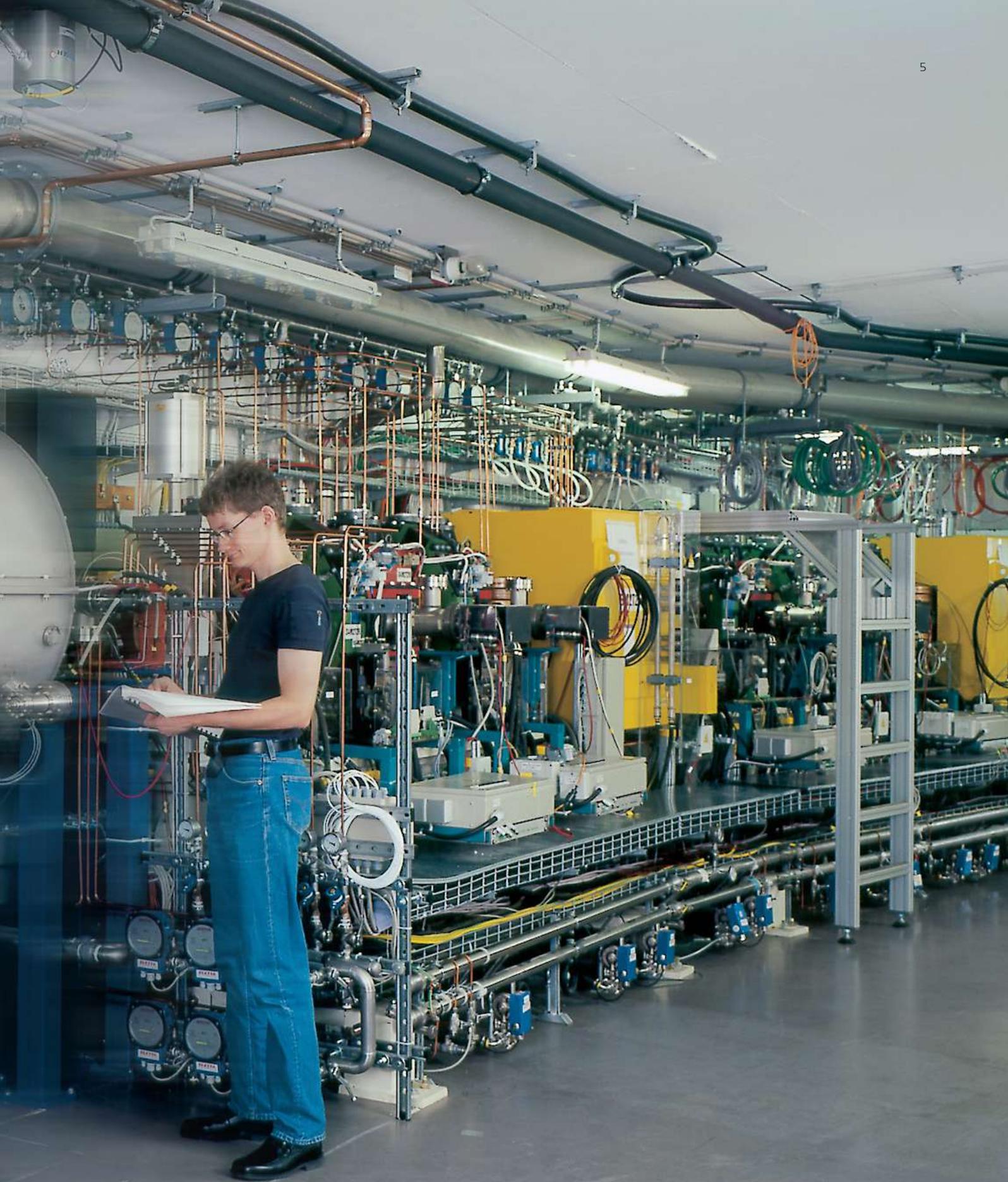
» Der Betrieb und die wissenschaftliche Nutzung von Teilchenbeschleunigern für die Grundlagenforschung in der Kernphysik und der nuklearen Astrophysik an Universitäten erlauben eine herausragende Form von fokussierter, interdisziplinärer Spitzenausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses.« — **Norbert Pietralla**, Direktor des Instituts für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt



» Was mich persönlich immer wieder beeindruckt, ist der Enthusiasmus, mit dem bei CERN und anderen Instituten gearbeitet wird. Diese Begeisterung ist keineswegs auf die Physikerinnen und Physiker beschränkt, sondern findet sich ebenso bei allen anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern.« — **Rolf-Dieter Heuer**, Generaldirektor des Forschungszentrums CERN (2009–2015)



» Mittels Beschleunigern wurde im Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum ein weltweit einmaliges Bestrahlungssystem realisiert. Wir können Tumore aus beliebiger Richtung millimetergenau abtasten und dabei das angrenzende gesunde Gewebe schonen.« — **Thomas Haberer**, wissenschaftlich-technischer Direktor der Ionenstrahl-Therapiezentren in Heidelberg und Marburg (HIT/MIT)



Magnetstrukturen  
zur Strahlungserzeugung  
am Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)

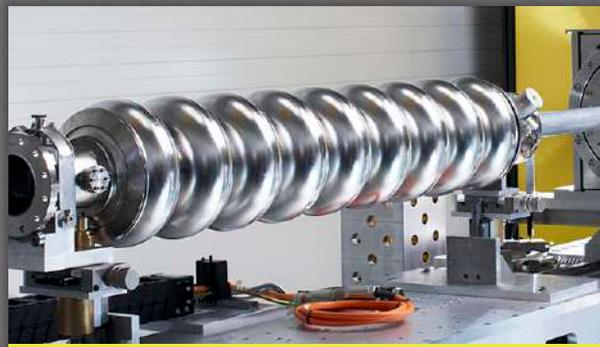
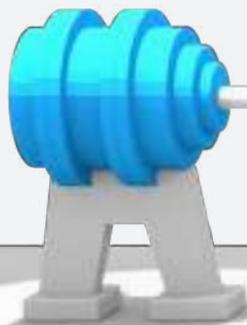
# VON DER TEILCHENQUELLE BIS ZUM TEILCHENFÄNGER

Im Detail können sich Beschleuniger stark voneinander unterscheiden, doch die Funktion zentraler Komponenten ist fast überall gleich.



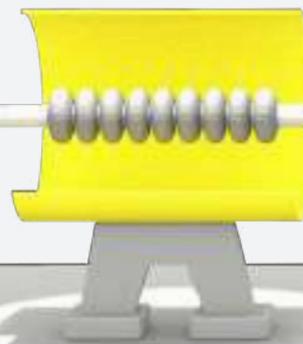
## TEILCHENQUELLE

Die Reise der Teilchen startet an der Quelle. Hier werden Strahlen von Elektronen, Protonen oder Ionen erzeugt. Oft sind viele Milliarden Teilchen zu Paketen gebündelt. ● Quelle für Elektronen (DESY)



## BESCHLEUNIGUNGSELEMENTE

Die Beschleunigung der Teilchen erfolgt in metallischen Hohlräumen, in denen elektrische Kräfte schnell schwingen. Von diesen werden die Teilchen mitgerissen wie Surfer auf einer Wasserwelle. ● Beschleunigungselement aus supraleitendem Niob (DESY)



## KONTROLLRAUM

Beschleuniger für die Wissenschaft laufen 24 Stunden am Tag, sieben Tage die Woche. Im Kontrollraum kümmern sich Expertenteams im Schichtbetrieb darum, dass alles reibungslos vonstattengeht.

● LHC-Kontrollraum (CERN)



## VAKUUMRÖHREN

Um Kollisionen mit Luftmolekülen zu vermeiden, bewegen sich die Teilchen in Vakuumröhren. In einigen Beschleunigern wird ein besseres Vakuum erreicht als das Vakuum in unserem Sonnensystem.

● Vakuumröhren (HZDR)





### **FOKUSSIERMAGNETE**

Fokussiermagnete sorgen dafür, dass die Teilchen in den Teilchenpaketen nicht auseinanderfliegen. Sie wirken wie eine Sammellinse und bündeln die Teilchenpakete ähnlich, wie eine Lupe Licht fokussiert.

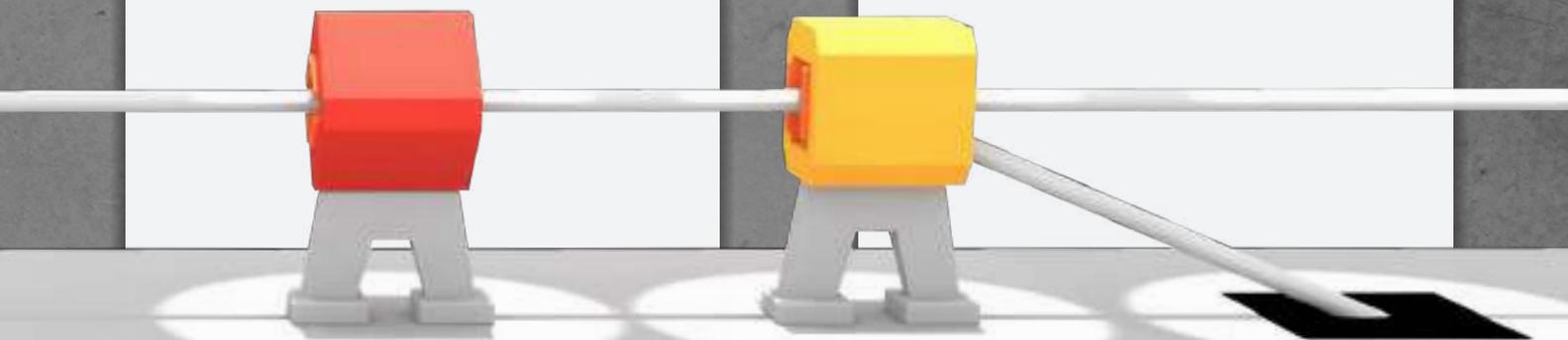
- Vierpoliger Fokussiermagnet (European XFEL)



### **ABLENKMAGNETE**

Ablenkmagnete bringen die Teilchen auf kreisförmige Bahnen. Damit lassen sich ringförmige Beschleuniger realisieren, oder die Teilchen können nach getaner Arbeit aus dem Beschleuniger gelenkt werden.

- Zweipoliger Ablenkmagnet (GSJ)



### **TUNNEL**

Beschleuniger werden oft in Tunneln errichtet. Das liegt an ihrem großen Platzbedarf. Zudem bieten Beton und einige Meter Erdrich ausreichenden Schutz vor entstehender Strahlung.

- Beschleunigertunnel (European XFEL)



### **TEILCHENFÄNGER**

Wenn die Reise der beschleunigten Teilchen zu Ende geht, werden sie zur Entsorgung in dicke Materieblöcke – meist aus Grafit – gelenkt. Dort geben die Teilchen ihre Energie als Wärme frei.

- Die Abzweigung zum Teilchenfänger von FLASH (DESY)



# WAS WOMIT WOZU BESCHLEUNIGEN?

Beschleunigerphysik hilft bei Vielem. Verschiedene Teilchensorten lassen sich mit unterschiedlichen Beschleunigertypen für eine Fülle von Anwendungen beschleunigen.

## ELEKTRONEN

Elektronen sind negativ geladen, vergleichsweise leicht und aus keinen weiteren Bestandteilen zusammengesetzt. Für die Teilchenphysik werden auch die Antiteilchen der Elektronen, die Positronen, beschleunigt.

$$m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

## IONEN / PROTONEN

Positive Ionen sind elektrisch geladene Atome oder Moleküle, denen Elektronen fehlen. Einzelne Protonen – die Kerne der Wasserstoffatome – gehören auch dazu. Sie sind rund 2000-mal schwerer als Elektronen.

$$m_p c^2 = 938,3 \text{ MeV}$$

## LINEARBESCHLEUNIGER

Die Komponenten eines **Linearbeschleunigers** sind entlang einer Geraden angeordnet. Im Unterschied zum Synchrotron müssen Teilchen im Linearbeschleuniger ihre Zielenergie in einem Rutsch erreichen; dafür gibt es keine Kurven, in denen sie Energie in Form von Synchrotronstrahlung verlieren.

## SYNCHROTRON

Die Komponenten eines **Synchrotrons** sind ringförmig angeordnet. Zahlreiche Ablenkmagnete bringen die Teilchen auf eine geschlossene Bahn, so dass sie die Beschleunigungselemente viele Male durchlaufen. In den Kurven geben die Teilchen Energie in Form von Synchrotronstrahlung ab. Sollen die Teilchen mehrfach zum Einsatz kommen, lassen sie sich in **Speicherringen** über Stunden vorrätig halten.

## ZYKLOTRON

In einem **Zyklotron** bringt ein großer Magnet die Teilchen auf eine spiralähnliche Bahn. Dabei werden sie mittels einer Wechselfeldspannung pro Umlauf zweimal beschleunigt. Dieses Zyklotronprinzip lässt sich nur für Ionen einsetzen; Elektronen sind zu leicht.

### **LICHTBLITZE ERZEUGEN**

Werden beschleunigte Elektronen auf einen Slalomkurs gebracht, entstehen hochintensive Strahlungsblitze, die neben sichtbarem Licht auch Röntgenstrahlung enthalten können. Dies geschieht in **Synchrotronstrahlungsquellen** und **Freie-Elektronen-Lasern**.

### **TEILCHEN DIREKT NUTZEN**

Viele der beschleunigten Teilchen kommen direkt zum Einsatz: um Metalle zu schweißen, Tumore zu zerstören, schwere Atomkerne zu erzeugen oder die fundamentalen Naturgesetze zu erforschen. Die Teilchenphysik nutzt dazu oft zwei gegenläufige Beschleuniger (**Collider**), um beschleunigte Teilchen aufeinanderprallen zu lassen.

### **NEUTRONEN ERZEUGEN**

Da Neutronen elektrisch neutral sind, lassen sie sich nicht mit elektrischen Kräften beschleunigen. In **Spallationsquellen** werden energiereiche Neutronen erzeugt, wenn beschleunigte Protonen gezielt auf Atomkerne prallen.

### **INDUSTRIE**

Mit beschleunigten Teilchen und Röntgenlicht werden unter anderem Materialien für Halbleiterschips hergestellt, medizinische Geräte und Lebensmittel sterilisiert, Metalle bearbeitet oder Frachtstücke durchleuchtet (siehe Seite 26).

### **MEDIZIN**

Von Beschleunigern erzeugte Röntgen- und Teilchenstrahlen helfen sowohl bei der Diagnose von Erkrankungen als auch bei der Zerstörung von Tumoren (siehe Seite 28).

### **FORSCHUNG MIT PHOTONEN**

Mit intensiven Strahlungsblitzen lassen sich Struktur und Verhalten ganz unterschiedlicher Materialien untersuchen – vom einzelnen Molekül bis zur biologischen Zelle (siehe Seite 30).

### **FORSCHUNG MIT NEUTRONEN**

Mit energiereichen Neutronen können winzige Strukturen wie Moleküle, aber auch große Objekte – darunter ganze Motoren im laufenden Betrieb – studiert werden (siehe Seite 34).

### **KERNPHYSIK**

Beschleuniger helfen, die Eigenschaften von Atomkernen genau zu vermessen und die Entstehung der Materie im Universum zu untersuchen (siehe Seite 38).

### **TEILCHENPHYSIK**

Die Teilchenphysik erforscht die Welt der kleinsten Dinge – mit Hilfe von Kollisionen beschleunigter Teilchen, aber auch mit Neutrinos und anderen Teilchen, die mit Beschleunigern erzeugt werden können (siehe Seite 42).

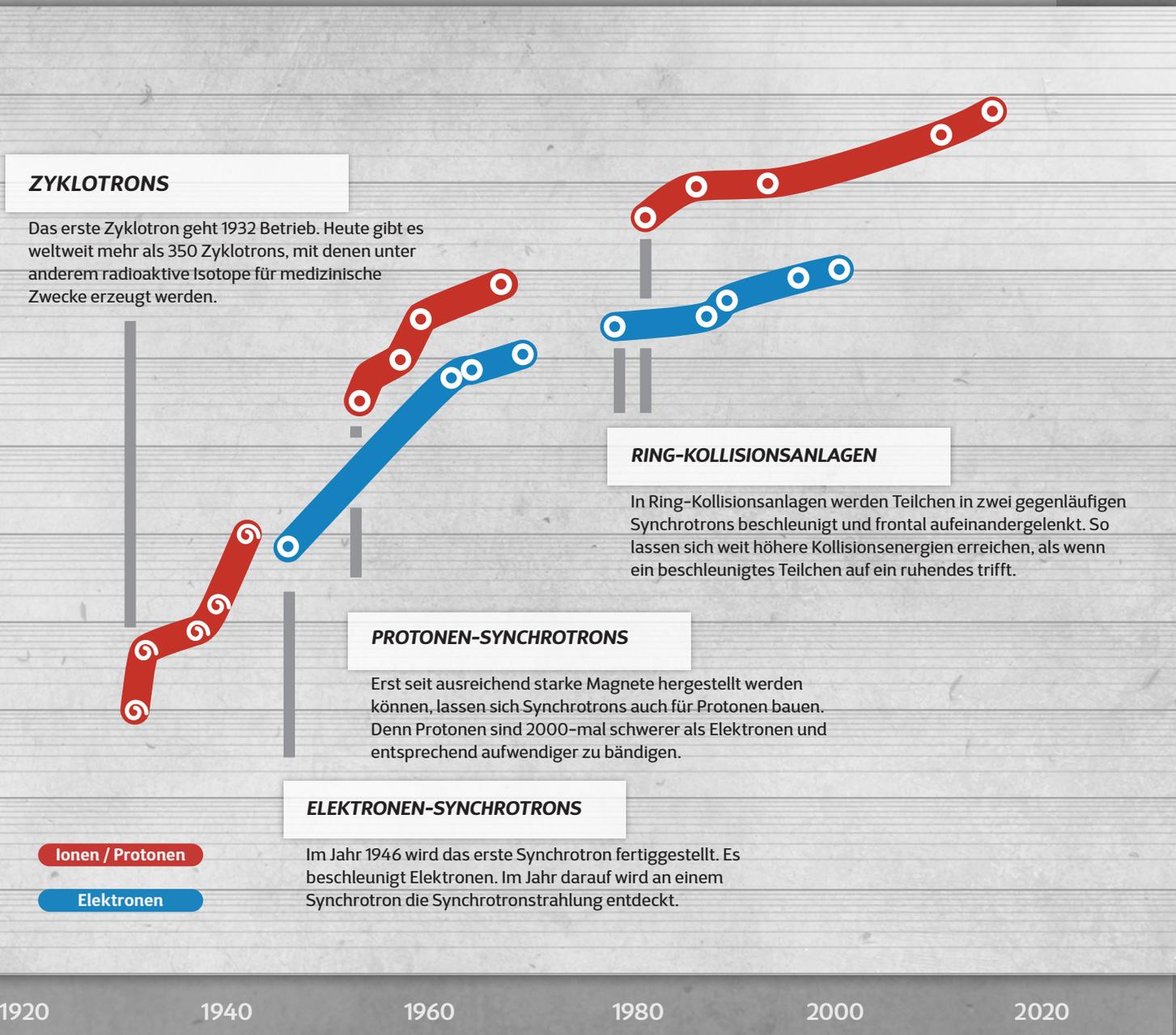
# DIE ENERGIE BESCHLEUNIGTER TEILCHEN

Heute können Teilchen auf millionenfach höhere Energien beschleunigt werden als noch vor 10 Jahren. Zudem lassen sich viel dichtere und feinere Teilchenpakete beschleunigen und genauer kontrollieren.

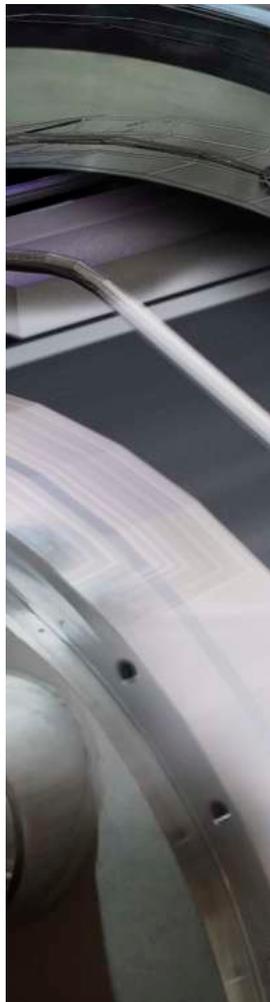
Auch wenn das Wort »Beschleunigung« anderes vermuten lässt: Wirklich schneller werden Teilchen in Beschleunigern nicht mehr, wenn sie erst einmal fast Lichtgeschwindigkeit erreicht haben. Den Grund liefert Einsteins Relativitätstheorie, der zufolge nichts schneller werden kann als das Licht. Was hingegen weiter erhöht werden kann, ist die Bewegungsenergie der Teilchen. Genau dazu sind Beschleuniger gemacht.

## IMMER ENERGIEREICHER

Maximale Teilchenenergie der jeweils energiereichsten Zyklotrons und Synchrotrons

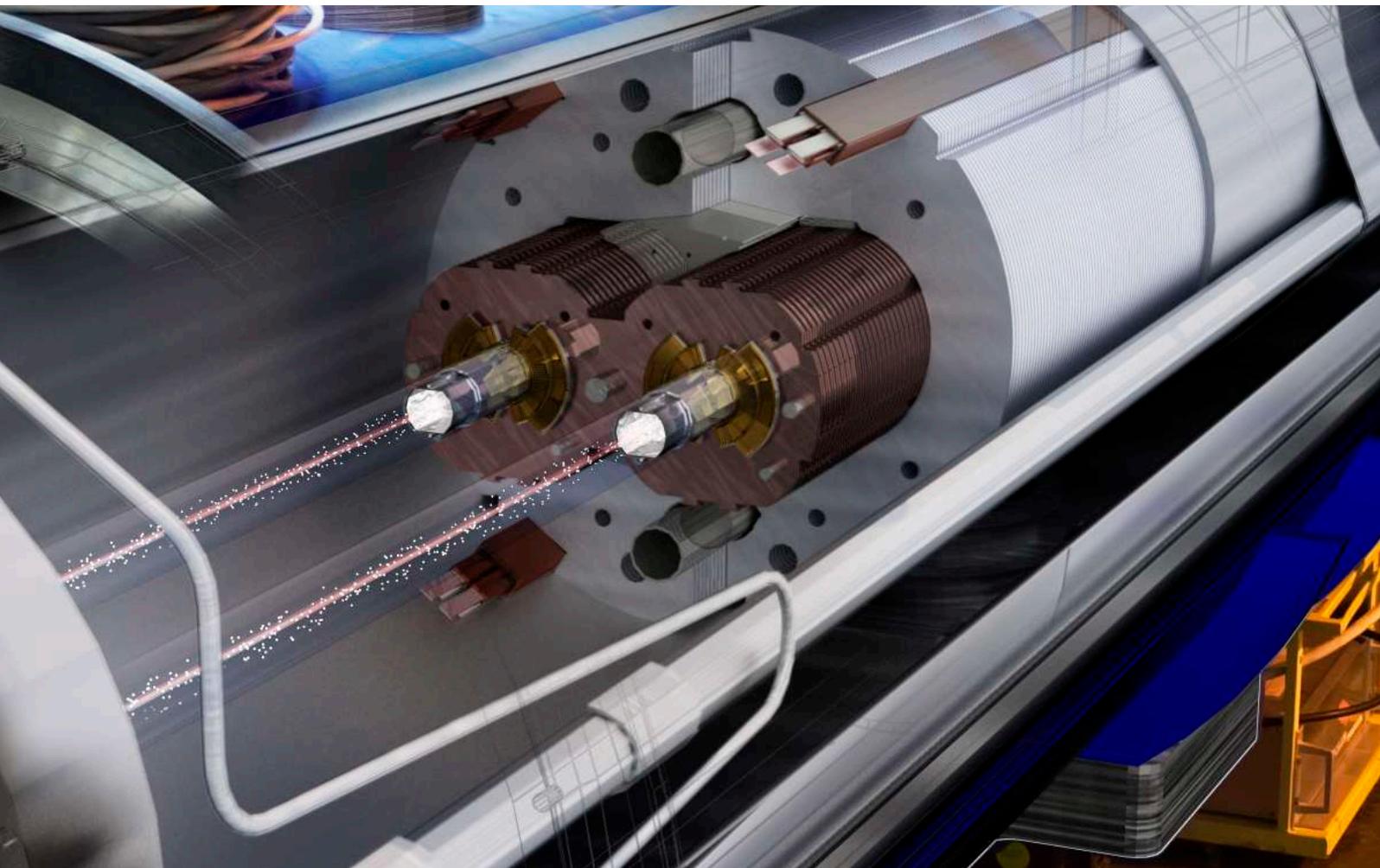






Visualisierung eines supraleitenden Ablenkmagneten des LHC-Beschleunigers (CERN)

# WIE FUNKTIONIEREN BESCHLEUNIGER?



Teilchen Beine machen 14–15

Ablenkungsmanöver 16–17

Gerade oder rund? 18–19

»Geht nicht« war gestern 20–21

Kompakte Konzepte 22–23

Elektrische Kräfte

## TEILCHEN BEINE MACHEN

Wer Elektronen oder Protonen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen will, kommt mit Schleudern, Kanonen und schiefen Ebenen nicht weit.

Das geht nur elektrisch.

### GLEICHSPANNUNG

Elektrische Kräfte wirken immer dort, wo zwischen zwei Orten eine elektrische Spannung herrscht. Die ersten Beschleuniger für elektrisch geladene Teilchen arbeiteten mit **Gleichspannung**. Auf diese Weise werden auch Elektronen in der guten alten Fernschröhre beschleunigt: Dort bringt eine Gleichspannung von einigen zehntausend Volt Elektronen auf eine entsprechende Energie von einigen zehntausend Elektronenvolt. Die Teilchen erreichen dabei schon ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit.

Für größere Energien sind höhere Spannungen vonnöten. Doch diese können nicht beliebig gesteigert werden, da es irgendwann zu Blitzenentladungen kommt. Auch lassen sich Gleichspannungsbeschleuniger nicht einfach hintereinander in Reihe schalten. Dazu ist ein Umstieg auf **Wechselspannung** nötig. Den ersten Wechselspannungsbeschleuniger realisierte der Norweger Rolf Wideröe im Jahr 1928.

### DRIFTRÖHREN-BESCHLEUNIGER

In einem **Driftröhren-Beschleuniger** liegt zwischen metallischen Rohrstücken eine Wechselfspannung an. Sind die Längen der Rohrstücke geschickt an die Geschwindigkeit der Teilchen angepasst, werden die Teilchen zwischen den Rohrstücken beschleunigt; innerhalb der Röhren wirken keine Kräfte, die Teilchen driften, ohne schneller zu werden. Bei großen Geschwindigkeiten müssen die Driftröhren sehr lang werden, oder die Wechselfspannung muss so schnell schwingen, dass intensive Radiowellen abgestrahlt würden. Um diese Energieverluste zu verhindern, baute Luis Alvarez 1947 um die Röhren einen metallischen Tank und ließ darin Radiowellen schwingen, die für die richtigen Spannungen an den Driftröhren sorgten. Die leistungsstärksten dieser **Alvarez-Strukturen** beschleunigen Protonen auf mehr als 230 Millionen Elektronenvolt.

### HOHLRAUMRESONATOREN

Moderne Beschleuniger nutzen Mikro- oder Radiowellen, die innerhalb eines metallischen Hohlkörpers elektrische Kräfte auf geladene Teilchen ausüben. Dabei kommen entweder stehende Wellen zum Einsatz, die ihre Lage bezüglich des Hohlraums nicht ändern, oder Wanderwellen, die sich mit den Teilchen mitbewegen.

Die Form der Hohlräume ist an die gewünschte Welle in ähnlicher Weise angepasst, wie die Form einer Orgelpfeife an den gewünschten Orgelton. In beiden Fällen spricht man von »Resonanz«; die Metallkörper heißen daher auch »**Hohlraumresonatoren**«. Mit ihnen lassen sich bis zu 100 Millionen Volt pro Meter erreichen. Zudem lassen sich beliebig viele von ihnen hintereinander in Reihe schalten.

### Gleichspannungsbeschleuniger

Leistungsstarke Gleichspannungsbeschleuniger müssen zum einen hohe Spannungen von mehreren Millionen Volt erzeugen und zum anderen diese geschickt zur Beschleunigung von Teilchen anwenden.

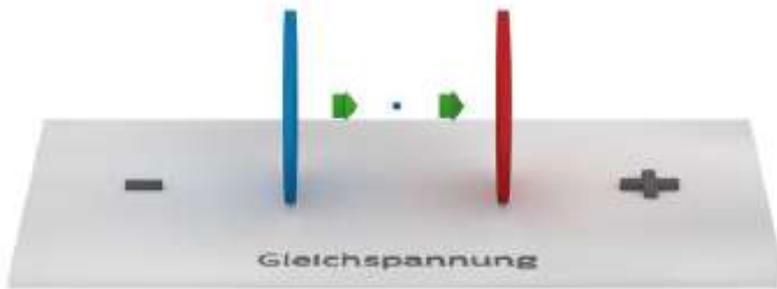
Mit Van-de-Graaff- und Cockcroft-Walton-Beschleunigern lassen sich über zehn Millionen Elektronenvolt erreichen. In ihnen werden hohe Spannungen über mechanische Laufbänder beziehungsweise aus Wechselfspannungen mittels Dioden und Kondensatoren erzeugt.

Beide Beschleunigertypen aus den 1930er Jahren werden auch heute noch – insbesondere als Vorbeschleuniger – für Teilchen aller Art eingesetzt.

#### Cockcroft-Walton-Beschleuniger

am Paul Scherrer Institut, Schweiz (PSI)





• Beschleunigung eines Elektrons zwischen Metallplatten, an denen eine **Gleichspannung** anliegt. Die Spannung bewirkt eine elektrische Kraft, die das Teilchen beschleunigt.



• Beschleunigung eines Elektrons mittels **Driftröhren** zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Die Pfeile zeigen in Richtung der elektrischen Kraft. Sie sind grün, falls das Elektron in Bewegungsrichtung beschleunigt würde; sie sind grau, falls das Elektron abgebremst würde. Wechselfeld und Länge der Röhren sind auf die Bewegung des Elektrons abgestimmt, so dass das Teilchen nie abgebremst wird.



• Beschleunigung eines Elektrons in einem **Hohlraumresonator** zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Die Pfeile zeigen in Richtung der elektrischen Kraft. Sie sind grün, falls das Elektron in Bewegungsrichtung beschleunigt würde; sie sind grau, falls das Elektron abgebremst würde. Das elektrische Kraftfeld ist so auf die Bewegung des Elektrons abgestimmt, dass das Teilchen nie abgebremst wird.

## Supraleitung

Selbst wenn man hochleitendes Kupfer für moderne Hohlraumresonatoren nutzt, führen die großen elektrischen Ströme in den Wänden zu starker Erwärmung und großen Energieverlusten. Einen Ausweg bieten supraleitende Materialien wie Niob, das bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt Strom verlustfrei leiten kann. Die Vorteile sind so groß, dass sie die aufwendige Kühlung mittels flüssigen Heliums rechtfertigen. Die Technologie der Niob-Resonatoren wurde beim Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in internationaler Zusammenarbeit im Laufe eines 20-jährigen Entwicklungsprogramms perfektioniert. Dabei können zuverlässig Feldstärken von über 30 Millionen Volt pro Meter erreicht werden.



Industrielle Fertigung von **supraleitenden Hohlraumresonatoren** für den European XFEL (Zanon)

Magnetische Kräfte

## ABLENKUNGSMANÖVER

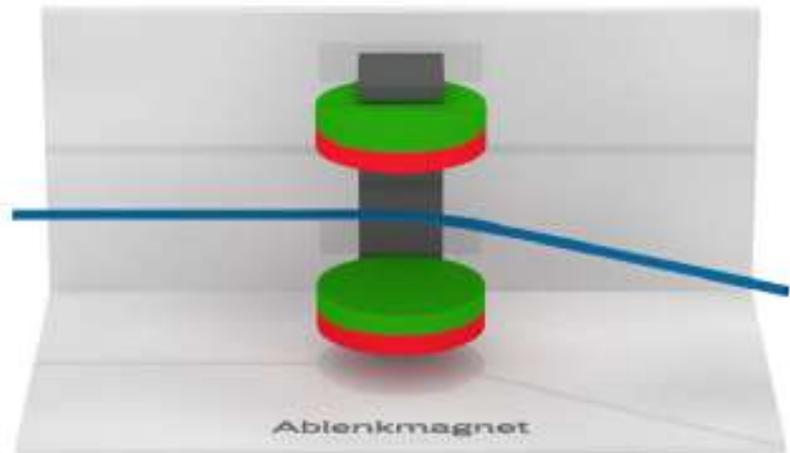
Magnetkräfte lassen nicht nur Kompassnadeln kreisen; sie bringen jede sich bewegende elektrische Ladung auf eine kreisförmige Bahn.

In Beschleunigern werden sie deshalb eingesetzt, um Teilchen auf die gewünschten Bahnen zu bringen und dort zu halten.

### ABLENKMAGNETE

Damit ein geladenes Teilchen die Kraft eines Magneten spürt, muss es sich bewegen. Die Kraft wirkt dann quer zur Bewegungsrichtung. Daher lässt sich mit einem Magneten nur die Richtung, jedoch nicht die Geschwindigkeit eines Teilchens ändern; die Teilchen werden auf eine Kreisbahn gelenkt, werden aber nicht schneller.

In einem Ablenkmagneten verfolgen Teilchen keinen ganzen Kreis, sondern nur ein Teilstück davon. Sie verlassen den Magneten dann unter einem anderen Winkel als den, unter dem sie in den Magneten eingetreten sind. Der einfachste Ablenkmagnet, der Dipol, besteht aus einem Nord- und einem Südpol.



### Synchrotronstrahlung

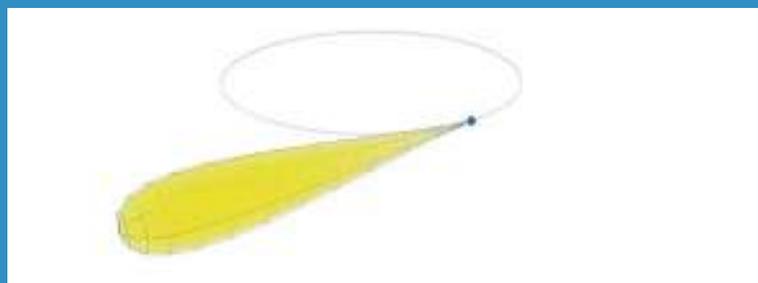
Werden geladene, fast lichtschnelle Teilchen durch Magnetkräfte von der geraden Bahn abgelenkt, so senden sie in Flugrichtung eine typische Strahlung aus, die Synchrotronstrahlung. Man könnte sie sich wie einen Autoscheinwerfer vorstellen.

Viele Eigenschaften der Synchrotronstrahlung ergeben sich aus der Relativitätstheorie und sind umso ausgeprägter, je näher die Teilchen der Lichtgeschwindigkeit kommen.

Um dies zu beschreiben, spielt der Lorentzfaktor  $\gamma$  eine wichtige Rolle: Er entspricht dem Verhältnis aus der Gesamtenergie  $E$  zur Ruheenergie:  $\gamma = E / mc^2$ . So hängt der kleine Öffnungswinkel des Strahlungskegels beispielsweise umgekehrt proportional vom Lorentzfaktor ab ( $\theta = 1 / \gamma$ ). Für Elektronen mit einer Energie von 500 Millionen Elektronenvolt beträgt der Öffnungswinkel beispielsweise nur einen Millimeter pro Meter. Steht ein Beobachter vor dem Beschleuniger, sieht er daher nur einen extrem kurzen Strahlungsblitz

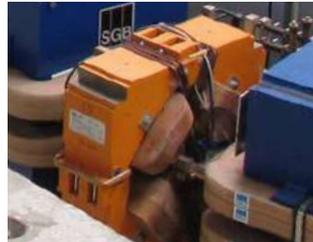
Je relativistischer die Teilchen, umso enger der **Kegel der Synchrotronstrahlung**

vorbeihuschen. Aus dieser Zeitstruktur ergibt sich, weshalb Synchrotronstrahlung so viele verschiedene Wellenlängen – vom Infraroten bis in den Röntgenbereich – enthält. Auch die Intensität der Synchrotronstrahlung hängt extrem vom Lorentzfaktor ab. Da Elektronen 2000-mal leichter sind als Protonen, ist ihr Lorentzfaktor bei gleicher Energie 2000-mal größer, so dass ihre Strahlung sechszehnbillionenfach intensiver ist. Damit begrenzt die Synchrotronstrahlung sogar die Energie, die Elektronen in einem Ringbeschleuniger erreichen können. Denn irgendwann ist der Energieverlust in Form von Synchrotronstrahlung bei jedem Umlauf so groß, dass er nicht mehr durch die Beschleunigungsresonatoren ausgeglichen werden kann. Bei Protonen sind die entsprechenden kritischen Energien noch lange nicht erreicht.





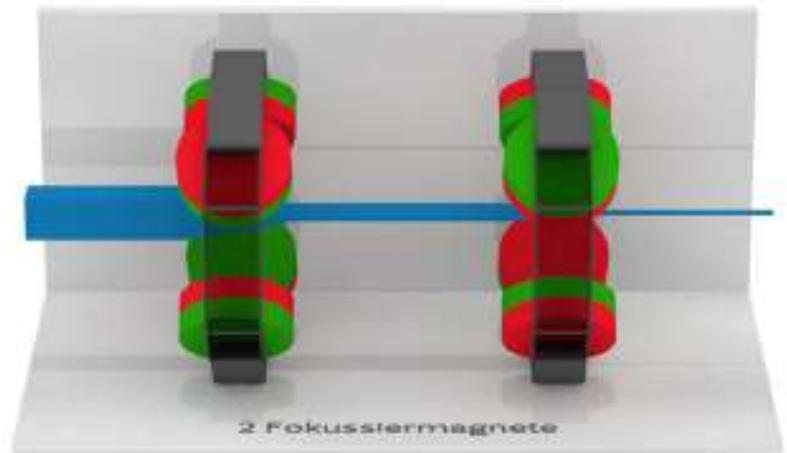
Ablenkmagnet (DELTA)



Fokussiermagnet (DELTA)

## FOKUSSIERMAGNETE

Bei einem Quadrupolmagneten stehen sich zwei Nordpole und zwei Südpole gegenüber. Damit lässt sich ein Teilchenstrahl bündeln – allerdings nur in einer durch die Orientierung der Pole bestimmten Richtung. Will man den Teilchenstrahl auch senkrecht dazu fokussieren, so braucht man einen zweiten Quadrupolmagneten, der um 90 Grad gedreht ist. Die Idee, Teilchen auf diese Weise abwechselnd zu fokussieren, kam Anfang der 1950er Jahre auf. Damit lassen sich Teilchenstrahlen so gut bündeln, dass für die Vakuumröhren, die die Teilchen vor Zusammenstößen mit Luftmolekülen schützen, Durchmesser von wenigen Zentimetern ausreichen.

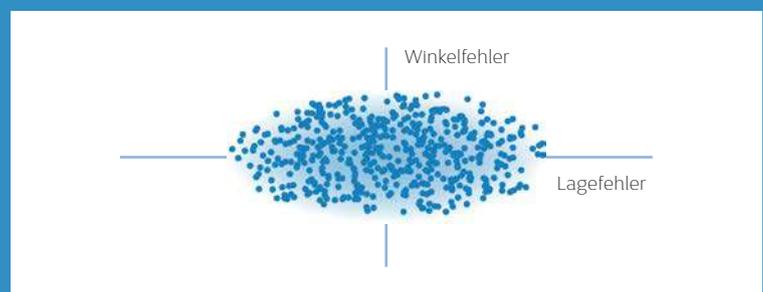


## Teilchenoptik

In Beschleunigern sorgen in der Regel viele Fokussiermagnete dafür, dass sich die Teilchen entlang der Sollbahn bewegen und nicht gegen die Wände der Vakuumröhre prallen. Denn mit einer einmaligen Fokussierung mit Hilfe eines einzelnen Fokussiermagneten ist es nicht getan. Das kennt man aus der Optik: Auch ein gebündelter Lichtstrahl läuft hinter dem Fokus wieder auseinander. Im magnetischen Fall kommt erschwerend hinzu, dass Quadrupolmagnete nur in einer Richtung fokussieren und senkrecht dazu defokussieren. Daher ist die Teilchenstrahlfokussierung in Beschleunigern ein ständiges Hin und Her. Die große Herausforderung ist es, für alle möglichen Abweichungen von der Sollbahn periodische Bahnen zu finden, auf denen die Teilchen in kleinem Abstand um die Sollbahn herum schwingen. Eine Abweichung der Teilchen von der Sollbahn

Die Bahnen der Teilchen in einem Beschleuniger verlaufen immer mit leichten Fehlern um die Sollbahn. Mathematisch wird dies durch die **Emittanz** beschrieben.

kann aus einer geringfügig falschen Lage oder einem etwas falschen Winkel in Bezug zur Sollbahn entstehen. Das Produkt aus Lage- und Winkelfehler, gemittelt über alle Teilchen des Strahls, wird Emittanz genannt. Die Emittanz ist eine Erhaltungsgröße, die sich mit Fokussiermagneten nicht verkleinern lässt. Je näher man die Teilchen zusammenrücken lässt, umso stärker werden sie später auseinandertreiben. Je paralleler man die Teilchenbahnen macht, umso weiter müssen sich die Teilchen voneinander entfernt befinden. Die Emittanz ist eine der bedeutendsten Kenngrößen eines Beschleunigers: Sie legt fest, wie gut der Strahl fokussiert werden kann. Daher ist es wichtig, dass die Teilchenstrahlen bereits an der Quelle mit einer möglichst geringen Emittanz erzeugt werden.



Linearbeschleuniger und Ringbeschleuniger

## GERADE ODER RUND?

Die Komponenten eines Beschleunigers lassen sich in gerader Linie oder ringförmig anordnen. Im geraden Fall müssen die Teilchen in einem Rutsch auf die gewünschte Energie gebracht werden; bei ringförmigen Anlagen können die Teilchen Runde für Runde beschleunigt oder über längere Zeit gespeichert werden.

### LINEARBESCHLEUNIGER

Die einfachste Art, die Komponenten eines Beschleunigers anzuordnen, ist die Linie. Beim Linearbeschleuniger verfolgen die Teilchen – von der Teilchenquelle bis zur Strahlensorgung – eine gerade Bahn.

Diese Einfachheit hat ihren Preis: Jedes Teilchen durchläuft den Beschleuniger nur einmal, daher sind viele besonders leistungsfähige Komponenten nötig. Im Gegenzug ist die Strahlqualität von Linearbeschleunigern in mancher Hinsicht derjenigen von Ringbeschleunigern überlegen.

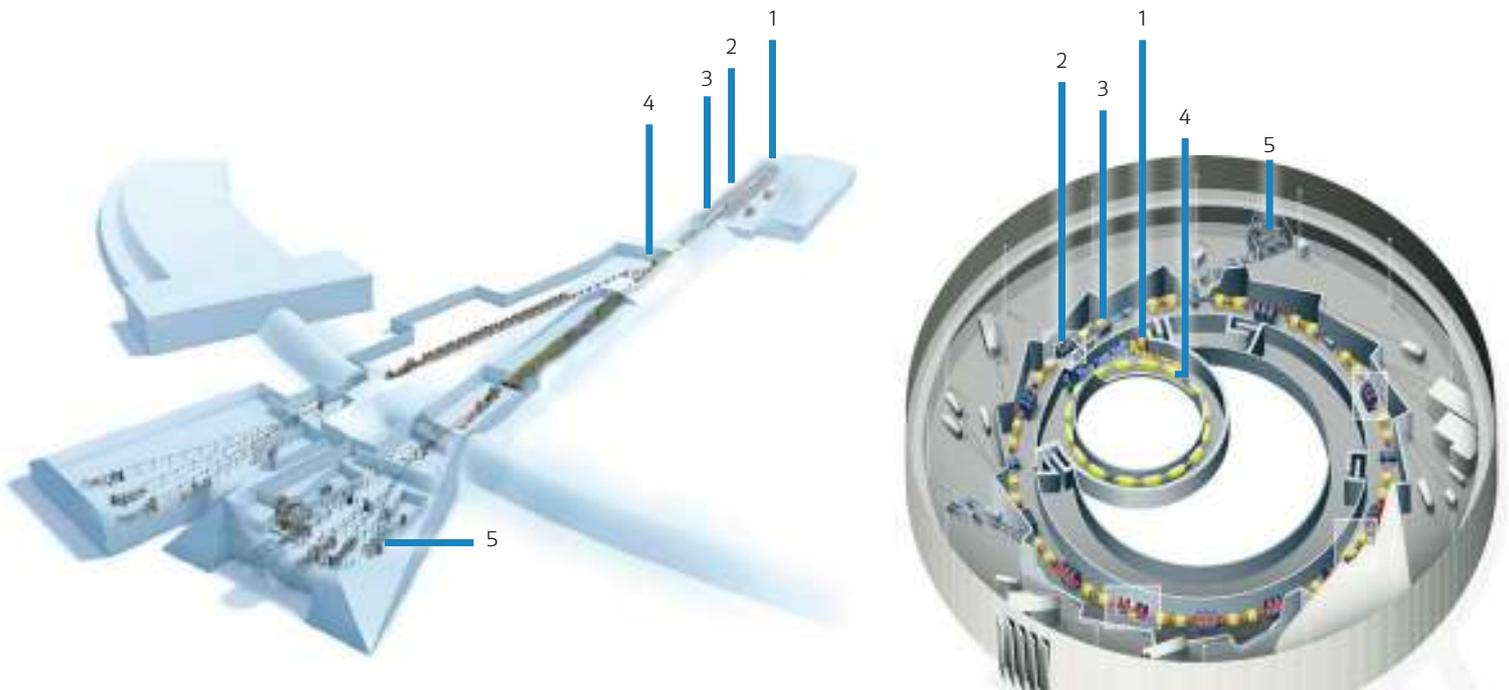
● FLASH bei DESY und ● BESSY II am Helmholtz-Zentrum Berlin im Vergleich. FLASH besteht aus einem Linearbeschleuniger, der Elektronen für zwei Freie-Elektronen-Laser bereitstellt. Bei BESSY II werden Elektronen zunächst in einem Synchrotron beschleunigt (kleiner gelber Ring) und dann in einem Speicherring vorrätig gehalten: 1. Teilchenquelle, 2. Beschleunigungselement, 3. Fokussiermagnet, 4. Ablenkmagnet, 5. Experiment (DESY, HZB)

### SYNCHROTRON UND SPEICHERRING

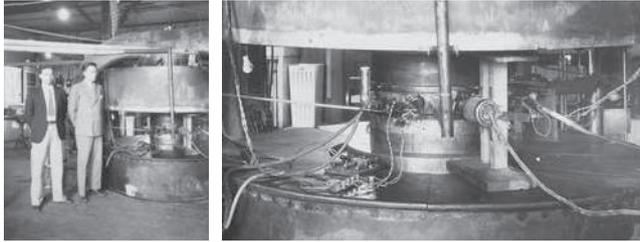
Bei einem Synchrotron sorgen ringförmig angeordnete Ablenkmagnete für eine geschlossene Teilchenbahn. Daher können die Teilchen dieselben Komponenten mehrfach durchfliegen und werden Umlauf für Umlauf immer weiter beschleunigt.

Im Synchrotron nimmt die Teilchenenergie synchron mit der Stärke der Magnetfelder zu – daher der Name. Zudem müssen die beschleunigenden elektrischen Kräfte in den Hohlraumresonatoren so schwingen, dass die Teilchen stets beschleunigt werden. Dies lässt sich am einfachsten erreichen, wenn die Teilchen bereits auf nahezu Lichtgeschwindigkeit vorbeschleunigt werden, bevor sie in ein Synchrotron überführt werden. Die Energie der Teilchen erhöht sich im Synchrotron dann zwar weiter, ihre Geschwindigkeit ändert sich jedoch – gemäß den Gesetzen der Relativitätstheorie – nicht mehr wesentlich.

Ist die gewünschte Energie der Teilchen erreicht, kann ein Synchrotron als Speicherring betrieben werden. Die Teilchenenergien und Magnetfeldstärken bleiben dann konstant; beschleunigt wird höchstens, um Energieverluste wie etwa durch Synchrotronstrahlung zu kompensieren. Bei ausreichend hoher Qualität der Vakuumsysteme und Magnetfelder können die beschleunigten Teilchen in einem Speicherring über Stunden oder sogar Tage vorrätig gehalten werden – etwa zur Produktion von Synchrotronstrahlung sowie für Experimente der Kern- und Teilchenphysik.



- M. Stanley Livingston und Ernest O. Lawrence vor einem 27-Zoll-Zyklotron (National Archives and Records Administration)



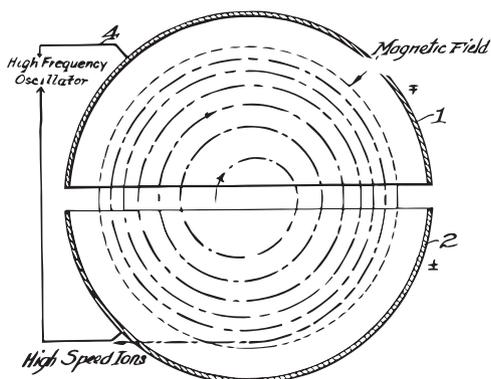
## ZYKLOTRON

**Ein Zyklotron besteht aus einem großen Elektromagneten, zwischen dessen Polen Teilchen auf einer spiralähnlichen Bahn beschleunigt werden.**

Dazu befinden sich zwischen den Magnetpolen zwei D-förmige Metallgehäuse, an denen eine Wechselspannung anliegt, so dass die Teilchen im Spalt zwischen den Metallkörpern schneller werden. Das Zyklotronprinzip stößt an seine Grenzen, wenn sich die Geschwindigkeit der Teilchen der Lichtgeschwindigkeit nähert. Bei Elektronen geschieht dies schon bei relativ geringer Bewegungsenergie, so dass das Zyklotron nur zur Beschleunigung von Protonen oder Ionen geeignet ist.

In seiner einfachsten Form kann ein Zyklotron Protonen auf 10 bis 20 Millionen Elektronenvolt beschleunigen, was für die Forschung in der Kernphysik oder für die Produktion von Isotopen in Krankenhäusern oft ausreicht. Mit raffinierten Methoden ist es über die Jahre gelungen, die Maximalenergie deutlich zu erhöhen. So liefert das Isochron-Zyklotron des Paul Scherrer Instituts in der Schweiz Protonen mit 590 Millionen Elektronenvolt und die weltweit höchste kontinuierliche Strahlleistung.

- Zyklotron-Schema (Patentschrift von Ernest Lawrence)



## Strahl oder Pakete?

In modernen Linearbeschleunigern und Synchrotrons werden die Teilchen von den verwendeten Wechselkräften nur dann optimal beschleunigt, wenn sie genau zum richtigen Zeitpunkt in die Hohlraumresonatoren einlaufen. Deshalb können keine kontinuierlichen Strahlen, sondern nur Pakete von Teilchen beschleunigt werden. Der Mindestabstand der Pakete ist durch die Schwingung der Wechselkräfte vorgegeben.

## Gepulst oder Dauerbetrieb?

Die meisten Beschleuniger arbeiten nicht im Dauerbetrieb, sondern gepulst, d.h. die Hohlraumresonatoren werden einige bis zu mehrere tausend Male in der Sekunde an- und wieder ausgeschaltet. Diese Pulstaktung bestimmt neben der Schwingung der Wechselkräfte, in welchem Abstand die Teilchenpakete (s. o.) aufeinander folgen können.

## »GEHT NICHT« WAR GESTERN

Neue Beschleuniger für die Wissenschaft stoßen immer auch in technologisches Neuland vor. Dabei wird die Grenze zwischen dem Machbaren und dem Wünschenswerten regelmäßig verschoben. Davon profitiert die gesamte Gesellschaft.



### EISKALT ENERGIE GESPART

**Viele Komponenten moderner Beschleuniger werden bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt betrieben. Dies ermöglicht neben stärkeren Magnetfeldern auch eine effizientere Beschleunigung.**

In jedem Synchrotron kommen Magnete zum Einsatz, um die zu beschleunigenden Teilchen auf ringförmiger Bahn zu halten. Dabei gilt: Je schwerer die Teilchen und je höher ihre Bewegungsenergie, desto stärkere Magnetfelder sind nötig, wenn der Umfang des Synchrotrons nicht ins Gigantische wachsen soll.

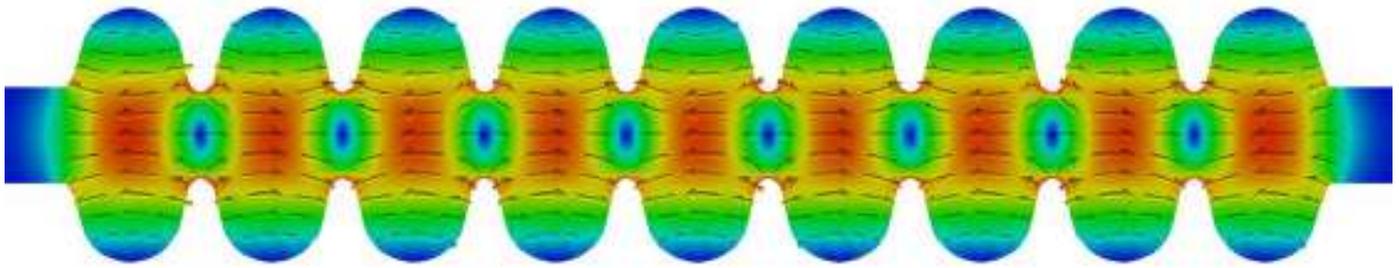
Starke Magnetfelder lassen sich erzeugen, indem man hohe Ströme durch Magnetspulen fließen lässt. Doch bei normalleitenden Spulen entsteht mit zunehmender Stromstärke immer mehr Wärme, bis die Spule schließlich schmilzt. Keine Wärme entsteht hingegen bei supraleitenden Spulen. Supraleiter können Strom verlustfrei leiten – vorausgesetzt, sie sind ausreichend gekühlt. Daher können hier weit höhere Ströme fließen als in Normalleitern.

Die Ablenkmagnete des 27 Kilometer langen *Large Hadron Collider* (LHC) bei CERN in Genf arbeiten supraleitend und erzeugen Magnetfeldstärken von acht Tesla. Dies ist viermal soviel, wie mit normalleitender Technologie möglich wäre. Ohne Supraleitung würde sich der Umfang des LHC auf über 100 Kilometer vervierfachen. Außerdem wäre die Stromrechnung für so einen Beschleuniger kaum bezahlbar.

Auch bei der Teilchenbeschleunigung kommt in vielen Anlagen Supraleitung zum Einsatz, so etwa in Hamburg beim Freie-Elektronen-Laser FLASH und dem im Bau befindlichen Röntgenlaser European XFEL sowie bei der ebenfalls im Bau befindlichen europäischen Neutronenquelle ESS in Lund, Schweden. Mit supraleitenden Beschleunigungselementen kann praktisch die gesamte eingespeiste elektrische Leistung auf die Teilchen übertragen werden, so dass die Effizienz der Beschleunigung wesentlich größer ist als bei normalleitenden Komponenten. Zudem erlaubt die Supraleitung die Beschleunigung von weit mehr Teilchenpaketen pro Sekunde, so dass ein supraleitender Freie-Elektronen-Laser hundertmal mehr Lichtblitze pro Sekunde erzeugen kann als ein normalleitender.

An Beschleunigerzentren gehört Supraleitung längst zum Alltag. Das hier gewonnene Wissen steht der gesamten Gesellschaft zur Verfügung.

● Im LHC-Beschleuniger werden die umlaufenden Protonen von 1232 **supraleitenden Ablenkmagneten** auf der Bahn gehalten. Aufwendige Kältetechnik sorgt dafür, dass die Magnete nicht wärmer als minus 271 Grad Celsius werden. (CERN)



## VOM LABOR ZUM SMARTPHONE

**Bevor auch nur ein Teilchen durch einen neuen Beschleuniger fliegt, wird alles exakt simuliert. Software aus der Beschleunigerphysik hilft mittlerweile auch bei der Entwicklung von Flugzeugen und Smartphones.**

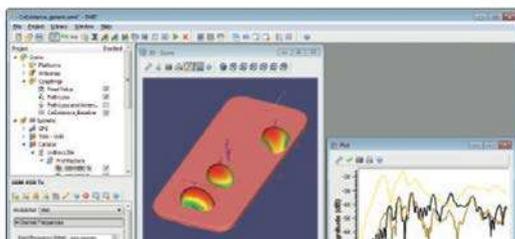
In Beschleunigern kommen magnetische und elektrische Kraftfelder zum Einsatz, die extrem stark und zugleich extrem gleichförmig sein müssen. Da Teilchenstrahlen oft haarfeine Abmessungen haben, können bereits Abweichungen von einem zehntel Promille die Teilchenbahn empfindlich stören. Daher stellt die Beschleunigerphysik außerordentliche Anforderungen an die Mess- und Simulationstechnik.

Bei der Berechnung der Magnetfelder müssen kleinste Details – wie etwa zehntel Millimeter dicke Isolierschichten der Kabel – berücksichtigt werden. Fortschritte bei den Rechenmethoden erlauben es, die Felder immer genauer zu berechnen. Optimale Anordnungen der Magnetspulen werden mit Methoden der genetischen Optimierung ermittelt. Dieses Verfahren orientiert sich an den Prinzipien der natürlichen Evolution, indem es bestehende Lösungen mutiert und überprüft, ob sich dabei bessere Lösungen ergeben.

Auch die Form der Beschleunigungsresonatoren wird mittels intensiven Rechereinsatzes optimiert. Dabei stellen die komplexe Geometrie und die extrem hohen Feldstärken und Frequenzen außergewöhnliche Anforderungen an die Simulationssoftware.

Die für die Beschleunigerphysik entwickelten Methoden zur Simulation von elektromagnetischen Kräften sind so leistungsstark, dass sie auch in der Industrie verwendet werden – unter anderem bei der Entwicklung von Elektromotoren, Flugzeugen und Smartphones.

● Mit Hilfe der **Simulationssoftware CST MICROWAVE STUDIO** lassen sich auch Störfelder bei Smartphones berechnen. Die TU Darmstadt ist weltweit führend im Bereich elektromagnetischer Simulationen. (CST AG)

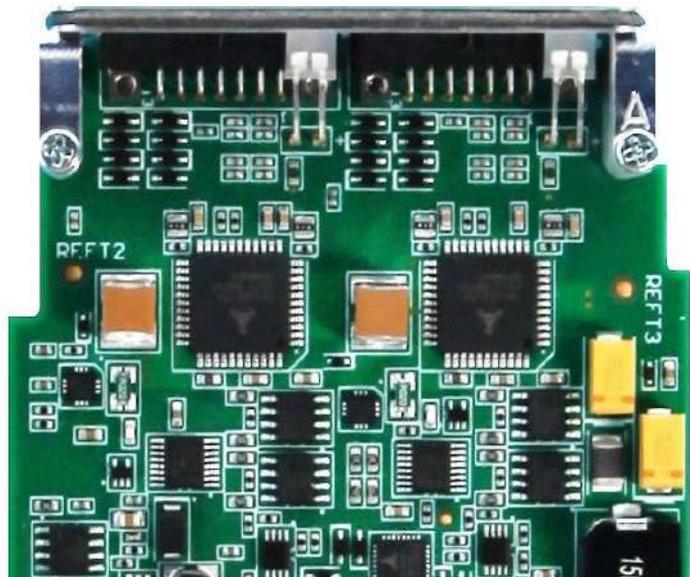


## SCHNELLE STEUERUNG FÜR DIE INDUSTRIE

**Die Komplexität moderner Beschleuniger lässt sich nur mittels hochpräziser und schneller Steuerungselektronik zähmen. Die für FLASH und European XFEL entwickelte neue Generation von Steuerungstechnik steht auch der Industrie zur Nutzung zur Verfügung.**

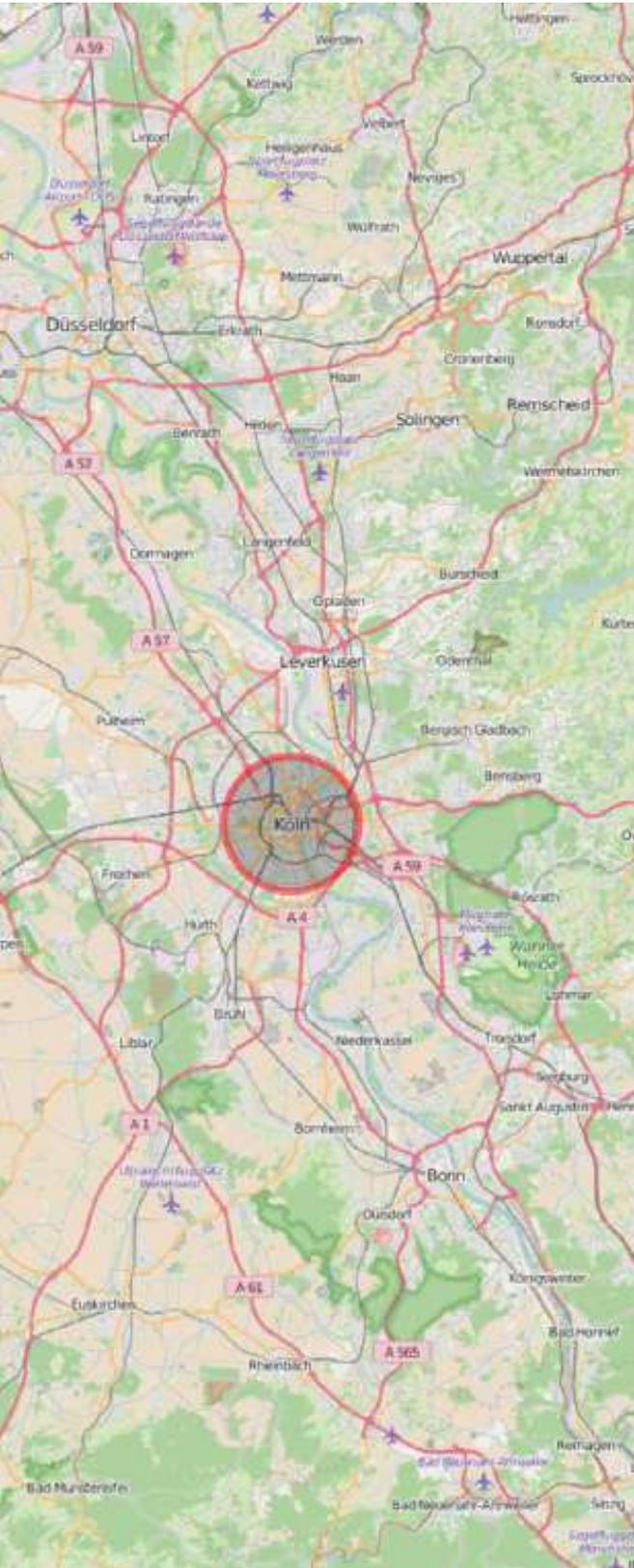
In Linearbeschleunigern werden Teilchen in einem Rutsch auf hohe Energien gebracht. Anders als bei Synchrotrons kann man zur Steuerung daher nicht mehr einfach eine Kenngröße messen und in der nächsten Teilchenrunde regulierend eingreifen. Stattdessen müssen ermittelte Daten nahezu augenblicklich für Steuerungszwecke verarbeitet werden. Bei DESY wurde hierfür eine Regelungshardware entwickelt, die bereits auf die nächsten Teilchenpakete im selben Paketzug einwirken kann. Dies setzt die schnelle parallele Verarbeitung großer Datenmengen voraus. Für diese Aufgabe kommt der recht junge Elektronikstandard MTCA.4 (*Micro Telecommunications Computing Architecture*) zum Einsatz, der unter maßgeblicher Beteiligung von DESY innerhalb einer internationalen Arbeitsgruppe erarbeitet und 2011 verabschiedet wurde. Auf Basis von MTCA.4 wurde bei DESY ein System von Steuerungsplatinen entwickelt, die analoge wie auch digitale Signale verarbeiten. Das System kann mehr als eine Milliarde Messungen pro Sekunde auslesen, lässt sich aus der Ferne bedienen und bietet eine enorme Skalierbarkeit, ist also von kleinsten Einheiten bis zu komplexen Riesensystemen einsetzbar. Diese Flexibilität in Funktion und Aufbau eröffnet eine ganze Palette von Einsatzmöglichkeiten in der Industrie, z.B. in der Telekommunikation, Online-Inspektion, Luftfahrt, Medizintechnik oder Präzisionsmesstechnik.

● Eine der **MTCA.4-Steuerungsplatinen**, die bei DESY in Zusammenarbeit mit Industriepartnern entwickelt wurden und nun der Industrie zur freien bzw. lizenzierten Nutzung zur Verfügung stehen. (DESY)



## KOMPAKTE KONZEPTE

Die Länge von Linearbeschleunigern hängt maßgeblich von ihrer maximalen Beschleunigungskraft ab. Ließe sich diese wesentlich erhöhen, könnten viele Beschleuniger in Zukunft kürzer gebaut werden.



### WIESO SIND BESCHLEUNIGER SO GROSS?

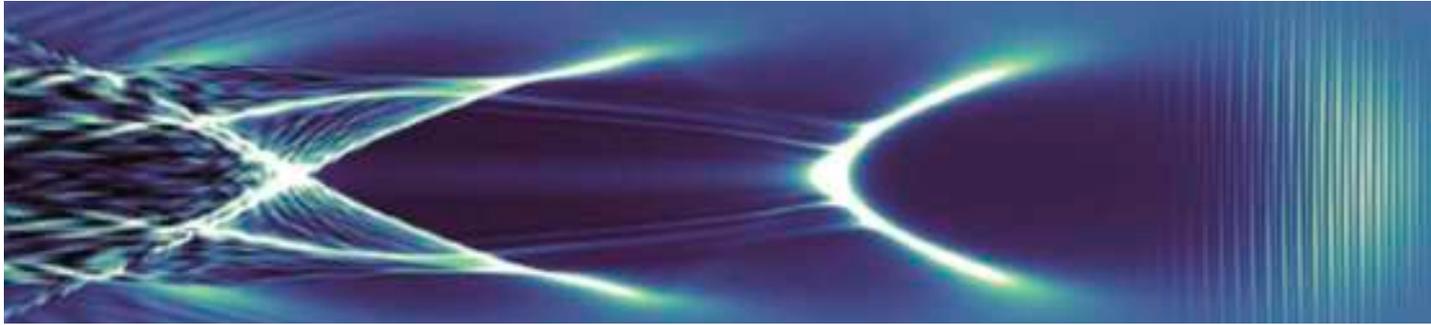
**Beschleuniger für die Wissenschaft sind gewaltige Kolosse. Selbst kleinere Exemplare füllen eigene Gebäude, und der LHC bei CERN in Genf umschließt eine Fläche, auf der sich ein Großteil Kölns unterbringen ließe.**

Die Größe eines Synchrotrons wird wesentlich durch die Magnetfelder bestimmt, die die Teilchen auf ringförmiger Bahn halten. Denn mit zunehmender Teilchenenergie müssen entweder die Magnetfeldstärken oder der Umfang der Anlage vergrößert werden. Die supraleitenden Magnete des Protonen-Synchrotrons LHC arbeiten allerdings schon nahe an der Grenze des prinzipiell Machbaren, so dass man, um höhere Energien zu erreichen, nur noch den Umfang vergrößern kann. Bei der Beschleunigung von Elektronen kommt erschwerend hinzu, dass die Teilchen weit mehr Energie in Form von Synchrotronstrahlung verlieren, als dies bei Protonen der Fall ist. Neue Energierekorde lassen sich für Elektronen daher nur aufstellen, indem man die Teilchen möglichst schwach ablenkt – entweder in extrem großen Synchrotrons oder in Linearbeschleunigern. Doch auch Linearbeschleuniger lassen sich nicht beliebig verkürzen; ihre Länge wird durch die Stärke ihrer maximalen Beschleunigungskräfte bestimmt. Bei herkömmlicher, normalleitender Technologie liegt die obere Grenze bei rund 100 Millionen Volt pro Meter; darüber kommt es zu Funkenentladungen. Im supraleitenden Fall liegt die theoretische Grenze bei rund 50 Millionen Volt pro Meter; darüber bricht die Supraleitung zusammen. Vorausgesetzt, man könnte diese theoretischen Maximalwerte erreichen, bräuhete man bereits 10 bzw. 20 Kilometer lange Beschleunigungsstrecken, um Elektronen auf eine Energie von einer Billion Elektronenvolt (ein Teraelektronenvolt) zu bringen.

Die einzige Möglichkeit, kürzere Beschleuniger zu realisieren, besteht darin, auf Antriebstechnologien mit höheren maximalen Beschleunigungskräften zu wechseln. Potenzielle Kandidaten sind die Plasmabeschleunigung und die Beschleunigung an nichtmetallischen Oberflächen oder an dünnen Folien. Dabei können – theoretisch – bis zu tausendfach höhere Beschleunigungskräfte erzielt werden, mit denen sich – theoretisch – tausendfach kürzere Beschleuniger realisieren ließen. Was im herkömmlichen Fall 10 Kilometer lang ist, wäre – theoretisch – auf 10 Meter geschrumpft.

Auch wenn diese Werte wohl nie erreicht werden, versprechen die alternativen Ansätze wesentlich kompaktere Beschleunigeranlagen. Doch der Weg dorthin ist mit zahlreichen schwierigen physikalischen und technischen Hindernissen gepflastert.

Der LHC umschließt eine Fläche, die einem Großteil Kölns entspricht. (openstreetmap)



## PLASMABESCHLEUNIGER

In Plasmen sind die elektrisch geladenen Bestandteile der Atome – die positiven Kerne und negativen Elektronen – nicht mehr aneinander gebunden, sondern bewegen sich – zumindest teilweise – frei. Solche Plasmen entstehen bei großer Hitze wie etwa in der Sonne. Im Normalzustand sind die elektrischen Ladungen dabei gleichförmig über das Plasma verteilt. Bei einem Plasmabeschleuniger wird diese Gleichverteilung gestört, so dass innerhalb des Plasmas starke elektrische Kräfte entstehen, die bis zu tausendmal stärker sein können als die mit herkömmlicher Beschleunigertechnologie erreichbaren Kräfte. Es bilden sich Plasmawellen, die Elektronen beschleunigen können.

Die Störung der Ladungsgleichverteilung kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen: Bei einem lasergetriebenen Plasmabeschleuniger wird ein Laserpuls genutzt, bei einem strahlgetriebenen Plasmabeschleuniger kommt ein kurzes, bereits nahezu lichtschnelles Elektronen- oder Protonenpaket zum Einsatz.

Nachteil des lasergetriebenen Prinzips ist, dass die beschleunigten Teilchen schneller werden können als das Licht im Plasma. Sobald die Teilchen den Laserpuls überholt haben, werden sie nicht weiter beschleunigt. Dieses Problem haben strahlgetriebene Plasmabeschleuniger nicht. Dafür setzen sie einen eigenen (herkömmlichen) Beschleuniger für die Erzeugung der Plasmawellen voraus.

Im Gegensatz zur herkömmlichen Beschleunigung unterliegt der Energiegewinn der beschleunigten Elektronen bei der Plasmabeschleunigung noch starken Schwankungen. Da für die meisten Anwendungen jedoch eine genaue Kontrolle der Teilchenenergie unerlässlich ist, werden derzeit unterschiedliche Möglichkeiten untersucht, wie diese Kontrolle erreicht werden kann.

In Deutschland arbeiten zahlreiche Universitätsgruppen und Helmholtz-Zentren an der Weiterentwicklung der Plasmabeschleunigung; es gibt Forschungscluster in Dresden, Düsseldorf, Hamburg, Jena und München. Ziel ist es, auf Grundlage der Ergebnisse der bisherigen Grundlagenforschung konkrete Beschleunigeranlagen zu realisieren. Entscheidend könnte hierbei das Zusammenwirken mit herkömmlicher Beschleunigertechnologie sein.

• Mit der **Plasmabeschleunigung** können tausendfach höhere Beschleunigungskräfte erzielt werden als mit herkömmlichen Methoden. Dabei werden in Plasmen Wellen erzeugt, die Elektronen beschleunigen. (Sören Jalas, AG Grüner, Universität Hamburg)

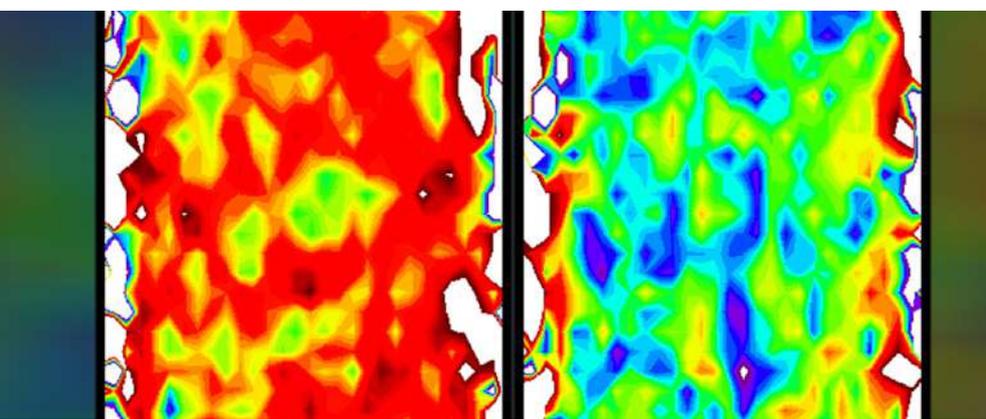
## GLAS-BESCHLEUNIGER

Herkömmliche Beschleuniger bestehen aus Metall, dessen Eigenschaften die maximal möglichen Beschleunigungskräfte auf 100 Millionen Elektronenvolt pro Meter begrenzen. Nichtmetallische Materialien wie etwa Quarzglas halten hundertmal höheren Feldstärken stand.

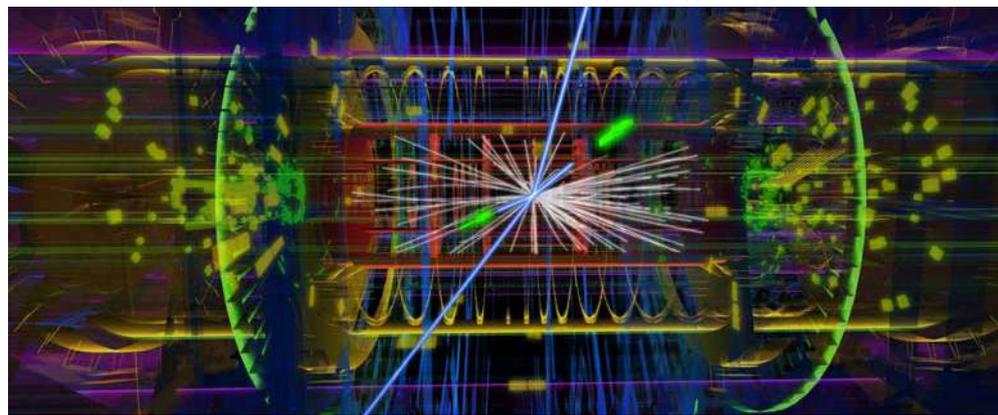
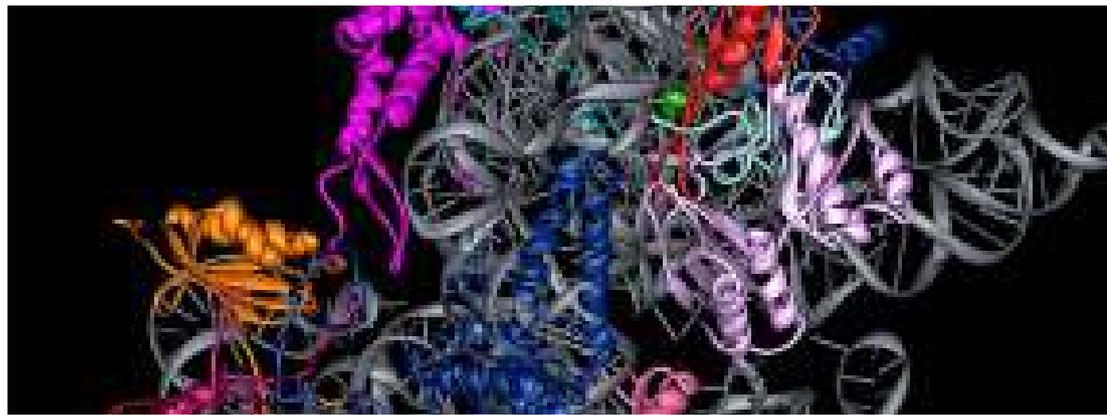
Diese Eigenschaft wird in »Glas-Beschleunigern« genutzt. 2013 konnten Forscherinnen und Forscher der Universität Erlangen zum ersten Mal ähnliche Beschleunigungsfelder erreichen, wie sie an großen Beschleunigeranlagen von DESY in Deutschland oder SLAC in den USA genutzt werden. Doch gelingt dies bisher nur über wenige Millimeter. Die Möglichkeiten der Glas-Beschleuniger sowie ihre Vor- und Nachteile gegenüber der Plasmabeschleunigung sind Gegenstand aktueller Forschung.

## LASER-FOLIEN-BESCHLEUNIGER

Wenn ein hoch intensiver Laserpuls auf eine dünne Folie trifft, werden aus den Folien-Atomen energiereiche Elektronen herausgeschlagen, die mühelos die Folie durchqueren können. Die Folge ist eine Ladungstrennung über die kurze Distanz der Foliendicke, aus der sich extrem starke elektrische Kräfte ergeben. Diese Kräfte können die Atome auf der hinteren Folienseite ionisieren und die Atomrümpfe stark beschleunigen. Im Projekt LIGHT (*Laser Ion Generation, Handling and Transport*) nutzt eine Gruppe von Forscherinnen und Forschern den 100-Terawatt-Laser PHELIX am GSI Helmholtzzentrum in Darmstadt, um die so beschleunigten Ionen in eine herkömmliche Beschleunigerstruktur mit einer Länge von einigen Metern einzuschleusen. Im Projekt arbeiten die TU Darmstadt, das Institut für Angewandte Physik der Universität Frankfurt sowie die Helmholtz-Zentren in Darmstadt und Dresden-Rossendorf zusammen.



# WER BRAUCHT BESCHLEUNIGER?



Industrie 26-27

Medizin 28-29

Forschung mit Photonen 30-33

Forschung mit Neutronen 34-37

Kernphysik 38-41

Teilchenphysik 42-45



## Beschleuniger für die **INDUSTRIE**

Beschleunigertechnologie hat einen milliardenschweren Wirtschaftszweig geschaffen. Über 24 000 Beschleuniger wurden bisher für industrielle Zwecke gebaut.

**Mit beschleunigten Teilchen und dem damit erzeugten Röntgenlicht werden unter anderem Materialien für Halbleiterchips hergestellt, medizinische Geräte und Lebensmittel sterilisiert sowie Frachtstücke durchleuchtet.**

### **IONENBESCHLEUNIGER**

Die am weitesten verbreitete industrielle Anwendung von Beschleunigern ist das **Einbringen von Fremdatomen** in Werkstoffe. Dazu werden Ionen auf einige hunderttausend Elektronenvolt beschleunigt und dann auf Materialien gelenkt, um deren Eigenschaften – wie etwa Farbe, Härte, Transparenz oder Leitfähigkeit – gezielt zu verändern. In der Halbleitertechnik gehört diese Ionenimplantation zu einem zentralen Fertigungsprozess: Jährlich werden dort Ionenimplantationssysteme im Wert von über einer Milliarde Euro ausgeliefert, um damit unter anderem Mikroprozessoren, Sensoren und Bauteile für die Stromversorgung im Wert von rund 300 Milliarden Euro zu erzeugen.

Ionenbeschleuniger werden auch zur **Isotopenherstellung** genutzt. Isotope sind Varianten von Atomen, die sich in der Zahl der Neutronen unterscheiden. Sie sind meist radioaktiv und werden beispielsweise für Untersuchungen in der Medizin verwendet.

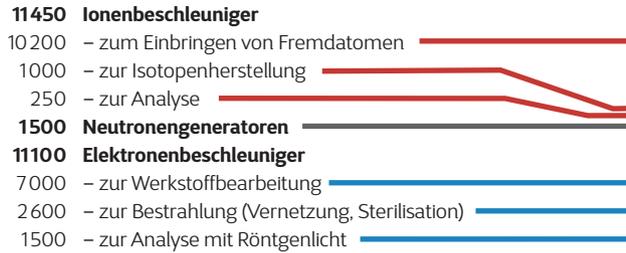
Immer öfter sind Ionenbeschleuniger auch für den **Nachweis von Atomen und Molekülen** im Einsatz – insbesondere, wenn es um winzige Mengen geht, wie beispielsweise in der Umwelttechnik.

### **NEUTRONENGENERATOREN**

Auch Neutronengeneratoren sind in der Industrie im Einsatz. Sie stellen Neutronen bereit, die beispielsweise in medizinischen Anwendungen, in der Materialanalyse und in der Sicherheitstechnik verwendet werden. In diesen Neutronengeneratoren werden beschleunigte Kerne des schweren Wasserstoffs auf superschweren Wasserstoff gelenkt. Dabei entstehen Neutronen mit einer genau definierten Energie.

◆ **Schrumpfschläuche** ziehen sich unter Hitze einwirkung stark zusammen und helfen unter anderem, Kabel zu isolieren. Bei ihrer Herstellung kommen auch Elektronenbeschleuniger zum Einsatz. Im kalten (engen) Zustand werden die Moleküle durch Elektronenbeschuss vernetzt und dann im warmen Zustand aufgeweitet. Nach Abkühlung bleibt die weite Form erhalten, bis die Vernetzung der Moleküle die Schläuche bei erneuter Erhitzung wieder zusammenschrumpfen lässt. (maksim\_e-Fotolia)

Anzahl Typ und Anwendung



• Schätzung der Anzahl der bisher für die Industrie gefertigten Beschleuniger (Hamm, Hamm (2012): Industrial Accelerators and Their Applications)

## ELEKTRONENBESCHLEUNIGER

In der **Werkstoffbearbeitung** wird mit beschleunigten Elektronen geschnitten, gehärtet, geschweißt und gebohrt. Dabei kommt es auf eine besonders hohe Leistung – Energie pro Zeit – der Beschleuniger an. Auch in der **Verarbeitung von Kunststoffen** kommen Elektronenbeschleuniger zum Einsatz. Denn mit Elektronenstrahlen lassen sich die vielen Moleküle, aus denen Kunststoffe bestehen, dreidimensional verknüpfen. Damit können die mechanischen, thermischen und chemischen Eigenschaften des Plastiks gezielt beeinflusst werden. Die vielfältigen Anwendungen umfassen wärmeschrumpfende Schläuche, hitzebeständige Drahtisolierungen, Lebensmittelverpackungen, Gelenkimplantate und sogar Gummireifen. Auf drei bis zwölf Millionen Elektronenvolt beschleunigte Elektronen helfen auch bei der **Sterilisation** von medizinischen Geräten und Lebensmitteln. Denn ausreichend energiereiche Elektronen wirken auf chemische Bindungen ein und können insbesondere die DNA von Bakterien zerstören. Die Menge der weltweit bestrahlten Lebensmittel wird auf jährlich über 500 000 Tonnen geschätzt, die Hälfte davon sind Gewürze; Zulassungen bestehen in über 60 Ländern. Was bei der Diagnose eines Knochenbruchs im Krankenhaus hilft, wird auch industriell bei der **Materialprüfung mit Röntgenlicht** genutzt. In beiden Fällen wird die Röntgenstrahlung mit Hilfe beschleunigter Elektronen erzeugt. Doch während in der Medizin Energien von maximal 120 000 Elektronenvolt ausreichen, sind in der Industrie aufgrund der hohen Dichte von Metallen Energien von einigen Millionen Elektronenvolt notwendig. Die so erzeugten Röntgenstrahlen helfen, kleinste Risse oder Ungleichmäßigkeiten aufzuspüren – selbst in massiven Bauteilen wie Rotoren von Windenergieanlagen, Turbinenschaufeln oder Automotoren. Industrielle Röntgengeräte werden auch verstärkt bei der Kontrolle von Fracht auf Schmuggelware, radioaktive Stoffe oder Waffen eingesetzt.

- Der **Siemens Industrial Linear Accelerator SILAC** ist ein kompakter Elektronenbeschleuniger zur Erzeugung von Röntgenstrahlung, der unter anderem für die zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen und Frachtcontainern eingesetzt werden kann. Das Gerät beschleunigt Elektronen auf bis zu neun Millionen Elektronenvolt. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens Healthcare GmbH)
- **Durchleuchtung eines Containers** mit Hilfe eines SILAC von Siemens am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS (Fraunhofer IIS)



• Das Forschungszentrum Jülich bietet **Ionenimplantation** mit kommerziell erhältlichen Systemen auch als Dienstleistung für industrielle Zwecke an. (FZ Jülich)





Beschleuniger für die

## **MEDIZIN**

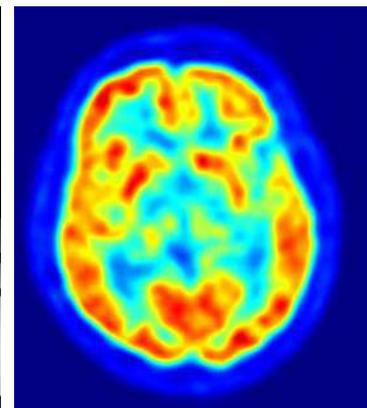
Beschleunigertechnologie hilft bei der Diagnose und Therapie von Erkrankungen. Über 11 000 Beschleuniger waren bisher im medizinischen Einsatz.

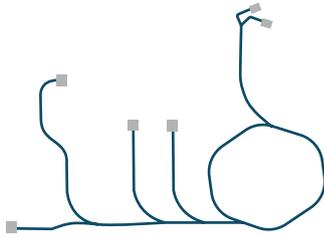
### **FRISCH AUS DEM ZYKLOTRON**

**Mit Zyklotrons lassen sich kurzlebige Isotope für die Radiodiagnostik erzeugen – direkt vor Ort.**

Voraussetzung für die Behandlung von Krebserkrankungen ist die präzise Diagnostik. Lage, Größe und Art der Tumore müssen vor der Therapie bekannt sein und auch während der Behandlung regelmäßig überprüft werden. Bei der Diagnose kommen Elektronenbeschleuniger zur Erzeugung von Röntgenstrahlung zum Einsatz. Auch das bildgebende Verfahren der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) nutzt Beschleuniger. Denn für PET werden schwach radioaktive Isotope benötigt, die dem Patienten in die Blutbahn gespritzt werden, um Stoffwechselvorgänge im Körper sichtbar zu machen. Tumore geben sich im PET-Bild durch ihren verräterischen Energiestoffwechsel zu erkennen. Die Strahlenbelastung bei einer PET-Untersuchung ist für Patienten besonders gering, wenn das radioaktive Material bereits nach wenigen Minuten oder Stunden komplett zerfallen ist. Doch dieses kurzlebige Material kann nicht über kommerzielle Anbieter bezogen werden; es muss vor Ort erzeugt werden. Aus diesem Grund produzieren einige medizinische Einrichtungen mit Hilfe von Beschleunigern – wie dem Zyklotron – die benötigten radioaktiven Isotope selbst. Diese Isotope werden auch für viele andere diagnostische Zwecke verwendet, wie etwa Szintigramme von Herz, Knochen und Schilddrüse.

- Kommerzielle **Zyklotrons zur Isotopenerzeugung** sind nur wenige Meter groß und können an einem normalen Stromanschluss betrieben werden. Zur effektiven Produktion der Isotope benötigt man intensive Protonenstrahlen mit Energien von einigen Millionen Elektronenvolt. Das Bild zeigt ein Zyklotron von Siemens. (Mit freundlicher Genehmigung der Siemens Healthcare GmbH) • **PET-Aufnahme** eines menschlichen Gehirns (Jens Maus, HZDR)





### HIT

Heidelberger Ionenstrahl-  
Therapiezentrum  
Speicherringumfang: 65 m  
Protonenenergie: 200 MeV  
Behandlungsstationen: 3

## KREBS ZERSTÖREN

**Krebserkrankungen werden – außer durch Operation und Chemotherapie – auch mit Strahlen behandelt, die von Beschleunigern erzeugt werden.**

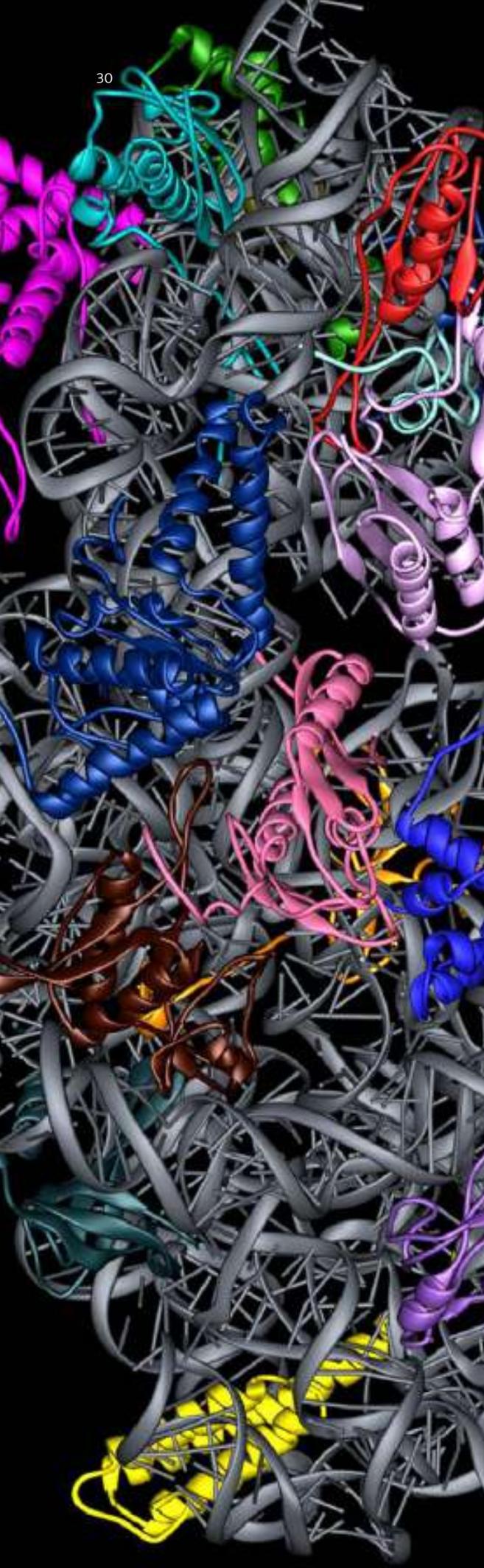
Ziel jeder Strahlentherapie ist es, Tumorzellen zu zerstören und gleichzeitig umliegende gesunde Zellen zu verschonen. Für die Behandlung von Krebs wird dabei am häufigsten **Röntgenstrahlung** eingesetzt, die mit kompakten, drehbaren Elektronen-Linearbeschleunigern erzeugt wird. Durch geschickte Positionierung von Strahlungsquelle und Patient lässt sich der Einschusskanal der Strahlung so wählen, dass umliegende Körperregionen möglichst gut geschützt werden. Neben Röntgenstrahlung kommen in der **Hadronentherapie** auch beschleunigte Protonen und andere Ionen zum Einsatz. Wenn Röntgenstrahlung den Körper durchdringt, wird die größte Dosis dicht unter der Haut abgegeben; die Wirksamkeit nimmt mit wachsender Eindringtiefe bis zum Verlassen des Körpers ab. Ionen hingegen dringen in den Körper ein und entfalten ihre Wirkung erst am Ende ihrer Flugbahn in einer Tiefe, die von der Teilchenenergie abhängt. Daher können mit Ionenstrahlen auch solche Tumore behandelt werden, die gegenüber herkömmlicher Bestrahlung widerstandsfähig sind oder sich in der Nähe von lebenswichtigen Organen befinden.

Pionierarbeit in der Protonentherapie leistete das Paul Scherrer Institut in der Schweiz. In Deutschland gibt es heute fünf Hadronentherapiezentren (Berlin, Essen, Heidelberg, Marburg und München). Das Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum HIT nutzt Protonen und Kohlenstoffionen und war weltweit die erste Anlage, bei der die Teilchenstrahlen dank einer gewaltigen Umlenkeinrichtung unter beliebigen Winkeln auf die Patienten gerichtet werden konnten. Mit Hilfe der bei GSI in Darmstadt entwickelten Beschleunigertechnologie konnten in den Jahren 2010 bis Ende 2015 über 3200 Krebspatienten behandelt werden.



• Der **Beschleuniger des Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrums HIT** produziert Ionen für die Krebstherapie. Die Ionen werden zunächst in einer Quelle erzeugt und in einem Linearbeschleuniger auf einige Millionen Elektronenvolt pro Kernbestandteil (Nukleon) gebracht. Anschließend werden sie in ein Synchrotron überführt (oben) und dort während einiger Millionen Umläufe weiter beschleunigt. Bei Energien von bis zu 430 Millionen Elektronenvolt pro Nukleon erreichen die Ionen die für die Behandlung erforderlichen Eindringtiefen in den Körper des Patienten; sie werden aus dem Synchrotron ausgekoppelt und zu den Behandlungsstationen geführt (unten links). Eine gewaltige drehbare Umlenkeinrichtung (unten rechts) ermöglicht es, den Ionenstrahl unter beliebigen Winkeln auf den Patienten zu richten. (HIT)





Beschleuniger für die

## **FORSCHUNG MIT PHOTONEN**

Beschleunigerbetriebene Lichtquellen sind ein unentbehrliches Werkzeug für die Wissenschaft. Bessere Beschleuniger ermöglichen immer erhellendere Einsichten.

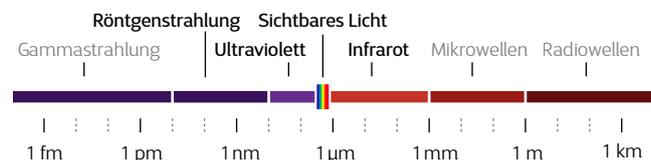
Was haben Kochsalz, Penicillin, unser Erbgut, Insulin, zelluläre Eiweißfabriken, Bodenproben vom Mars und Charlotte Constanze Röntgens Hand gemeinsam? Sie alle gaben ihre Struktur durch Röntgenstrahlung zu erkennen. Das war in den Jahren 1913, 1946, 1953, 1969, 1998, 2012 und 1895.

Röntgenstrahlung ist der Tausendassa der Physik: Über 30 Nobelpreise wurden für Einsichten mit Röntgenstrahlung verliehen. Schon der erste Physik-Nobelpreis überhaupt ging 1901 an Wilhelm Conrad Röntgen, den Entdecker jener Strahlen, die Materie durchdringen können und sich alsbald als extrem kurzwelliges Licht entpuppten. Sie wurden von Röntgen selbst »X-Strahlen« genannt. Mit X-Strahlen wurde es möglich, nicht nur auf Materie zu schauen, sondern auch endlich hinein.

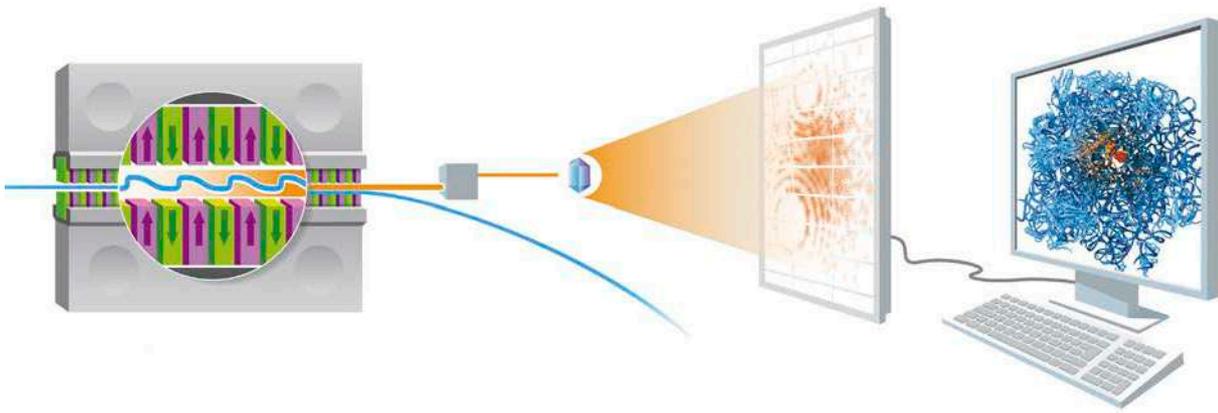
Wenig später zeigte Albert Einstein, dass man sich Licht auch aus Teilchen zusammengesetzt vorstellen kann, den Photonen. Die Röntgenröhre – 1901 zum Patent angemeldet – wurde in Medizin und Wissenschaft schnell zum unentbehrlichen Werkzeug. Doch für heutige wissenschaftliche Anforderungen reichen einfache Röntgenröhren schon lange nicht mehr aus. Der Stand der Experimentierkunst wird von Lichtquellen bestimmt, die auf viele hundert Meter langen Beschleunigern basieren – den **Synchrotronstrahlungsquellen** und **Freie-Elektronen-Lasern**.

Bei diesen, wie auch bei Röntgenröhren, spielen beschleunigte Elektronen die zentrale Rolle. Denn wenn Elektronen abgebremst oder abgelenkt werden, senden sie intensive elektromagnetische Strahlung aus. Synchrotronstrahlungsquellen und Freie-Elektronen-Laser sind die hellsten Röntgenquellen auf unserem Planeten und werden auch in Zukunft noch viele Einsichten liefern.

Daher ist es nur eine Frage der Zeit, bis die Liste der Entdeckungen mit Röntgenstrahlung um weitere Errungenschaften ergänzt werden wird – etwa um das erste vollständige Bild einer biologischen Zelle mit atomarer Auflösung oder den ersten Zeitlupenfilm einer komplexen chemischen Reaktion auf molekularer Ebene.



• Das elektromagnetische Spektrum reicht von der energiereichen Gammastrahlung bis zu den langen Radiowellen. Bei der Forschung mit Photonen kommen vornehmlich Röntgenstrahlung, Ultraviolett, sichtbares Licht und Infrarot zum Einsatz.



## BEISPIELE AUS DER FORSCHUNG

**Mit intensiven Lichtblitzen lässt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Proben untersuchen – von einzelnen Molekülen bis hin zu alten Gemälden. Mit ihnen können aber auch Bauteile für die Mikrosystemtechnik hergestellt werden.**

### Viele Proben, ein Bild

Quellen für Synchrotronstrahlung erzeugen milliardenfach brillanteres Licht als normale Röntgenröhren. Dennoch reicht ihre Intensität selten aus, um die atomare Struktur einzelner Moleküle mit einem einzelnen Lichtblitz zu bestimmen. Ein Ausweg ist die Kristallisation: Dabei werden aus den Molekülen regelmäßige Kristalle geformt, um aus der Überlagerung der Aufnahmen einer Vielzahl von Molekülen ein brauchbares Messergebnis zu erhalten.

Doch Kristallisation kann extrem mühsam sein und ist in vielen Fällen gar nicht möglich. Als besonders aufwendig erwies sie sich bei den Ribosomen – großen Molekülkomplexen in biologischen Zellen, in denen Eiweiße erzeugt werden. Erst Anfang der 1990er Jahre gelang es, ausreichend reine Ribosomenkristalle zu züchten, um diese unter anderem an den Lichtquellen bei DESY in Hamburg zu durchleuchten. Die Strukturaufklärung der Ribosomen wurde 2009 mit dem Nobelpreis für Chemie belohnt.

### Eine Probe, ein Bild

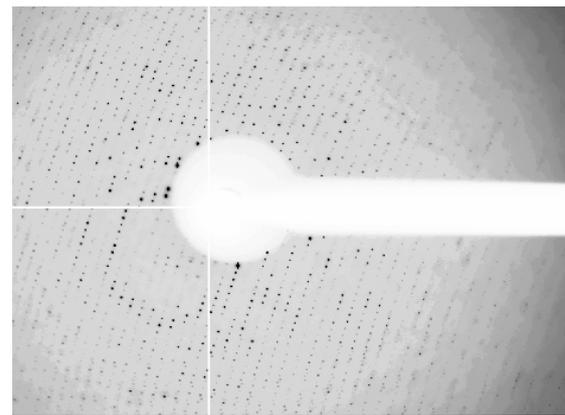
Die Strahlung von Freie-Elektronen-Lasern ist der Strahlung von konventionellen Synchrotronstrahlungsquellen nochmals weit überlegen und theoretisch intensiv genug, um die atomare Struktur einzelner Moleküle mit einem einzelnen Lichtblitz und ohne den Umweg der Kristallisation aufzulösen. Doch Freie-Elektronen-Laser stellen die Forschergruppen vor ganz neue Herausforderungen. Zum einen gilt es, die winzigen Moleküle mit den ebenso winzigen Röntgenblitzen überhaupt zu treffen. Zum anderen explodieren die Moleküle nach dem Beschuss mit den intensiven Röntgenblitzen in ihre atomaren Einzelteile.

Im Jahr 2008 gelang es einer Forschergruppe am Freie-Elektronen-Laser FLASH bei DESY, mit einzelnen Lichtblitzen Schnappschüsse ultraschneller Veränderungen auf einem Festkörper aufzunehmen – ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu molekularen Filmen, bei denen zahlreiche solcher Bilder aneinandergereiht den zeitlichen Ablauf von chemischen Reaktionen zeigen sollen. Theoretisch ist hier eine zeitliche Auflösung von einer Billiardstelsekunde (Femtosekunde) möglich.

### Tiefe Schluchten voller Licht

Synchrotronerzeugte Röntgenstrahlung wird auch zur Herstellung von filigranen Mikrostrukturen verwendet, die einen Detailgrad von unter einem Millionstel Meter (Mikrometer) besitzen, aber mehrere Millimeter hoch sein können, also über extrem tiefe Schluchten verfügen. Dazu wird die Grundfläche der herzustellenden Struktur auf einem Kunststoff belichtet. Durch chemische Entwicklung werden dann die unbelichteten Stellen entfernt und aus den so erzeugten Negativen die gewünschten Mikrostrukturen geschaffen – etwa durch elektrochemisches Metallaufbringen. Tiefe Schluchten lassen sich nur mit Hilfe von Synchrotronstrahlungsquellen herstellen, da das Licht aus normalen Röntgenröhren nicht parallel genug ist. An der Synchrotronstrahlungsquelle ANKA in Karlsruhe werden so in Zusammenarbeit mit der Industrie Mikrostrukturen für mechanische und optische Anwendungen entwickelt.

☉ Schema eines typischen Experiments in der **Forschung mit Photonen**: Zunächst werden beschleunigte Elektronen in einer regelmäßigen Magnetanordnung – einem Undulator – auf einen Slalomkurs gezwungen. Dabei senden sie intensive Strahlung aus, die auf eine Probe, wie etwa einen Kristall aus Biomolekülen, geleitet wird. Das Resultat der Wechselwirkung der Strahlung mit der Probe wird von Detektoren aufgezeichnet und mit Hilfe von Computern analysiert. (Lothringer/DESY)



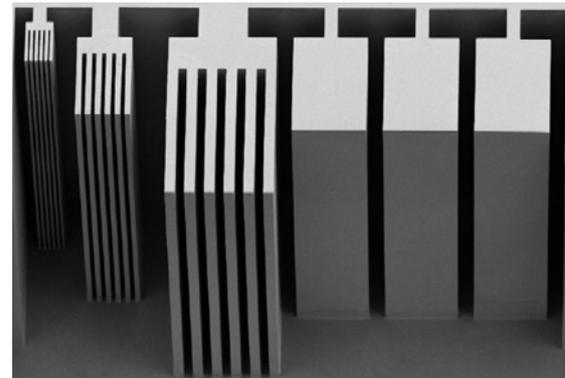
### ☉ Röntgenbeugungsbild

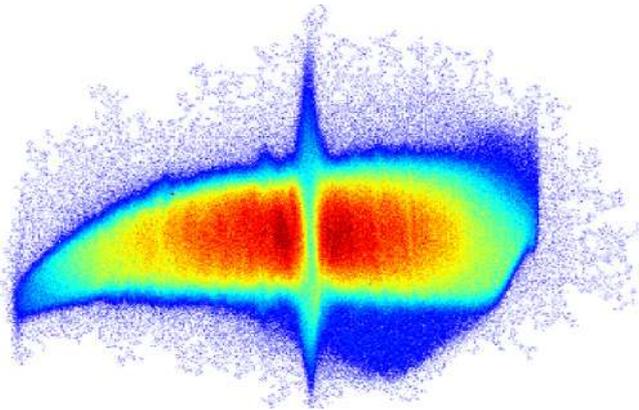
einer Untereinheit der Eiweißfabrik des Bakteriums *Thermus thermophilus*

☉☉ **Visualisierung** dieser Untereinheit, die aus Röntgenbeugungsbildern berechnet wurde.

(beides: Jörg M. Harms / MPSD)

☉ Mit Hilfe von Synchrotronstrahlung erzeugte **Mikrostruktur**. Die Zähne des linken Kamms sind 1500 Mikrometer hoch, haben aber einen Abstand von nur fünf Mikrometern. (ANKA)





H 50 Femtosekunden (Billiardstelsekunden)

## BESCHLEUNIGER- BETRIEBENE LICHTQUELLEN

**Das Grundprinzip aller beschleunigerbetriebenen Lichtquellen ist gleich: Beschleunigte Elektronen senden Licht aus, wenn man sie auf einen Slalomkurs zwingt.**

### Vom Ärgernis zur Photonenschmiede

Das Licht, für dessen Erzeugung heute kilometerlange Beschleunigeranlagen gebaut werden, war zunächst gar nicht gern gesehen. Es zeigte sich zuerst in den Ablenkmagneten, die Elektronen in Synchrotrons auf Kurs halten: In Kurven verlieren elektrisch geladene Teilchen Energie in Form von Synchrotronstrahlung. Während dieser Energieverlust für die energiehungrige Teilchenphysik ein Ärgernis darstellte, erkannte man schnell den potenziellen Nutzen des intensiven Lichts – auch aufgrund des extrem breiten Wellenlängenspektrums der Strahlung, das sich vom Infraroten über das sichtbare Licht bis zur extrem kurzwelligen Röntgenstrahlung erstreckt. Die wissenschaftlichen Möglichkeiten vergrößerten sich noch, als man herausfand, dass die Strahlung intensiviert werden kann, wenn man die Elektronen durch regelmäßig angeordnete Magnetstrukturen auf einen Slalomkurs zwingt. In diesen Undulatoren geben die einzelnen Elektronen mehrmals Lichtpulse ab, deren Intensitäten sich so zu intensiven Blitzen addieren, dass das Strahlungsspektrum nur noch aus einem sehr schmalen Wellenlängenbereich besteht. Heute gibt es allein in Europa über zehn Synchrotronstrahlungsquellen, die der europäischen Forschung mit Photonen dienen. Deutschland trägt hierzu mit **BESSY II** in Berlin und **PETRA III** in Hamburg sowie seiner Beteiligung an der **ESRF** in Grenoble bei. **DELTA** in Dortmund steht Forscherinnen und Forschern aus Nordrhein-Westfalen zur Verfügung. Ferner wird Synchrotronstrahlung bei **ANKA** in Karlsruhe und **MLS** in Berlin genutzt.

### Von der Photonenschmiede zur Photonenfabrik

Erste Versuche, die Intensität der Synchrotronstrahlung weiter zu steigern, erfolgten in den 1970er Jahren. Im Vergleich zu herkömmlichen Synchrotronstrahlungsquellen geht die Lichterzeugung in einem Freie-Elektronen-Laser (FEL) geordneter vonstatten. Das Ergebnis ist extrem intensive Strahlung mit den Eigenschaften von Laserlicht.

◉ **Manipulation eines Elektronenpakets mittels Laser:** Die Energiebreite des Pakets wird während eines nur 50 Femtosekunden dauernden Laserpulses an einer wohldefinierten Stelle gezielt vergrößert. Der Femtosekundenbereich ist für die Untersuchung vieler extrem schneller chemischer Prozesse wie der Photosynthese bedeutsam. (DESY)

Bei einem FEL sind die Elektronenpakete in schmalen Scheiben gruppiert, deren Abstand genau der Wellenlänge des erzeugten Lichts entspricht. Diese Gruppierung sorgt dafür, dass sich nicht nur die Intensitäten addieren, sondern die Lichtwellen selbst. Die Folge ist, dass FEL-Strahlung noch einmal zehnmillardenfach brillanter sein kann als herkömmliche Synchrotronstrahlung.

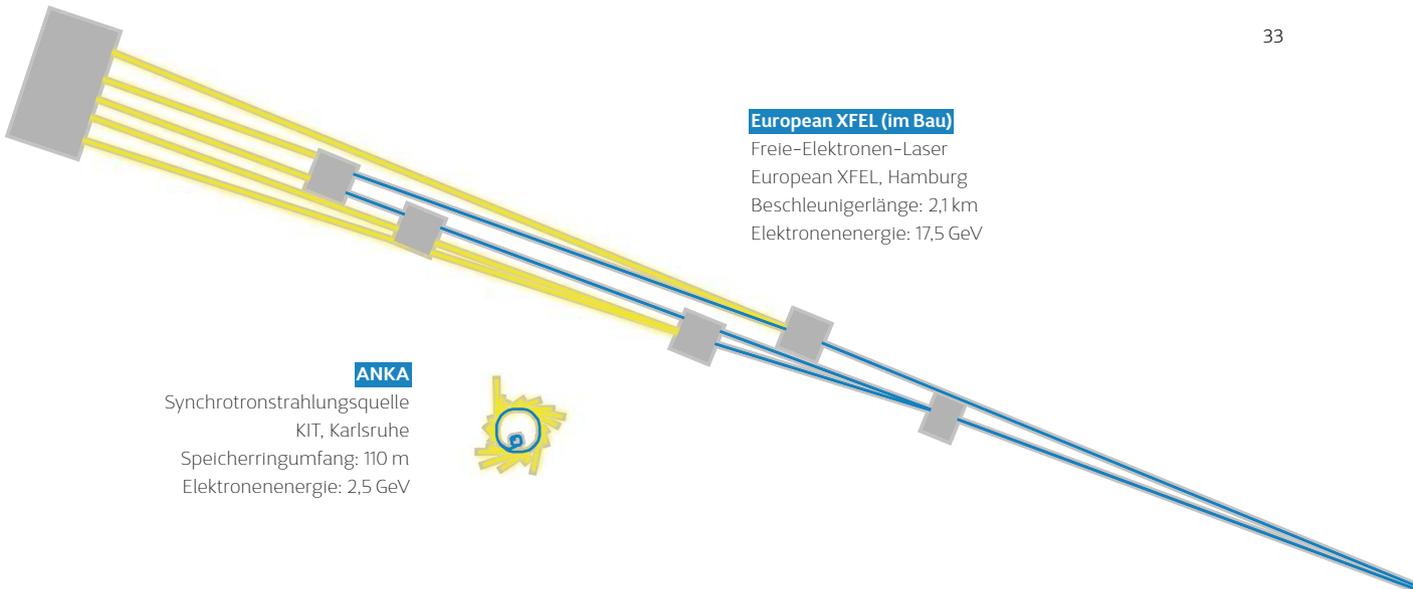
Der erste FEL ging 1976 in Betrieb. Er produzierte intensive Infrarotstrahlung und benötigte ein Paar Spiegel, zwischen denen sich die Intensität der Strahlung durch Wechselwirkung mit vielen Elektronenpaketen allmählich aufbaute. Bevor ein FEL im weichen Röntgenbereich realisiert werden konnte, sollten noch einmal 25 Jahren vergehen. Denn da es für Röntgenstrahlung keine guten Spiegel gibt, musste der FEL-Strahlungsverstärkungsprozess in einem einzigen Durchgang eines Elektronenpakets durch einen Undulator erfolgen. Für eine handhabbare Undulatorlänge müssen die Elektronenpakete dabei extrem anspruchsvollen Anforderungen genügen. So muss die Länge der Pakete so stark komprimiert werden, dass ein momentaner Strahlstrom von mehr als 1000 Ampere entsteht. Teilchenpakete mit solch extremen Eigenschaften lassen sich nicht in Ringbeschleunigern realisieren. Hier sind Linearbeschleuniger gefragt. Mittlerweile gehören Elektronenpulse von wenigen Femtosekunden Dauer zum Standard.

Der erste FEL im weichen Röntgenbereich war **FLASH** bei DESY in Hamburg. Das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf betreibt einen FEL für Infrarotstrahlung, genannt **FELBE**.

### Lichtquellen von morgen

Unter starker Beteiligung von DESY entsteht in Hamburg und Schleswig-Holstein der **European XFEL** – ein Röntgenlaser, an dem 12 Nationen beteiligt sind. Die 3,4 km lange Anlage basiert auf einem supraleitenden Linearbeschleuniger, der mehrere FELs im Röntgenbereich antreibt. Dank supraleitender Beschleunigertechnologie wird der European XFEL rund 300-mal mehr Röntgenblitze pro Sekunde produzieren können als vergleichbare normaleitende Anlagen in den USA, Japan, Korea und der Schweiz.

Die Entwicklung der Strahlungsquellen ist bei weitem nicht abgeschlossen. Speicherringe sollen in Zukunft noch besser gebündelte Elektronenpakete erzeugen, und völlig neuartige Beschleunigungsprinzipien wie die Laser-Plasmabeschleunigung könnten die Anlagen kompakter und preiswerter machen. Die Fortschritte in der Laser- und Hochfrequenztechnik sowie ein immer besseres Verständnis der Dynamik hochkomprimierter Elektronenpakete werden dazu führen, dass die Qualität von Strahlungspulsen mit einer Dauer von Billiardstelsekunden (Femtosekunden) bis Trillionstelsekunden (Attosekunden) immer genauer an die Anforderungen der Experimente angepasst werden kann.



**European XFEL (im Bau)**

Freie-Elektronen-Laser  
European XFEL, Hamburg  
Beschleunigerlänge: 2,1 km  
Elektronenenergie: 17,5 GeV

**ANKA**

Synchrotronstrahlungsquelle  
KIT, Karlsruhe  
Speicherringumfang: 110 m  
Elektronenenergie: 2,5 GeV



**BESSY II**

Synchrotronstrahlungsquelle  
HZB, Berlin  
Speicherringumfang: 240 m  
Elektronenenergie: 1,7 GeV



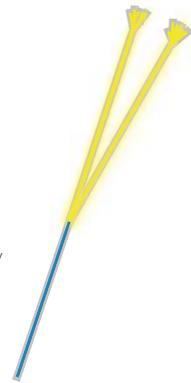
**DELTA**

Synchrotronstrahlungsquelle  
TU Dortmund  
Speicherringumfang: 115 m  
Elektronenenergie: 1,5 GeV



**FLASH**

Freie-Elektronen-Laser  
DESY, Hamburg  
Beschleunigerlänge: 150 m  
Elektronenenergie: 1,25 GeV



**MLS**

Synchrotronstrahlungsquelle  
PTB, Berlin  
Umfang: 48 m  
Elektronenenergie: 630 MeV



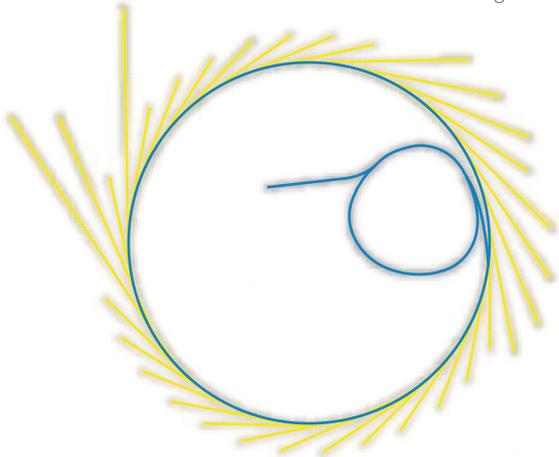
**FELBE**

Freie-Elektronen-Laser  
HZDR, Dresden-Rossendorf  
Beschleunigerlänge: 20 m  
Elektronenenergie: 40 MeV



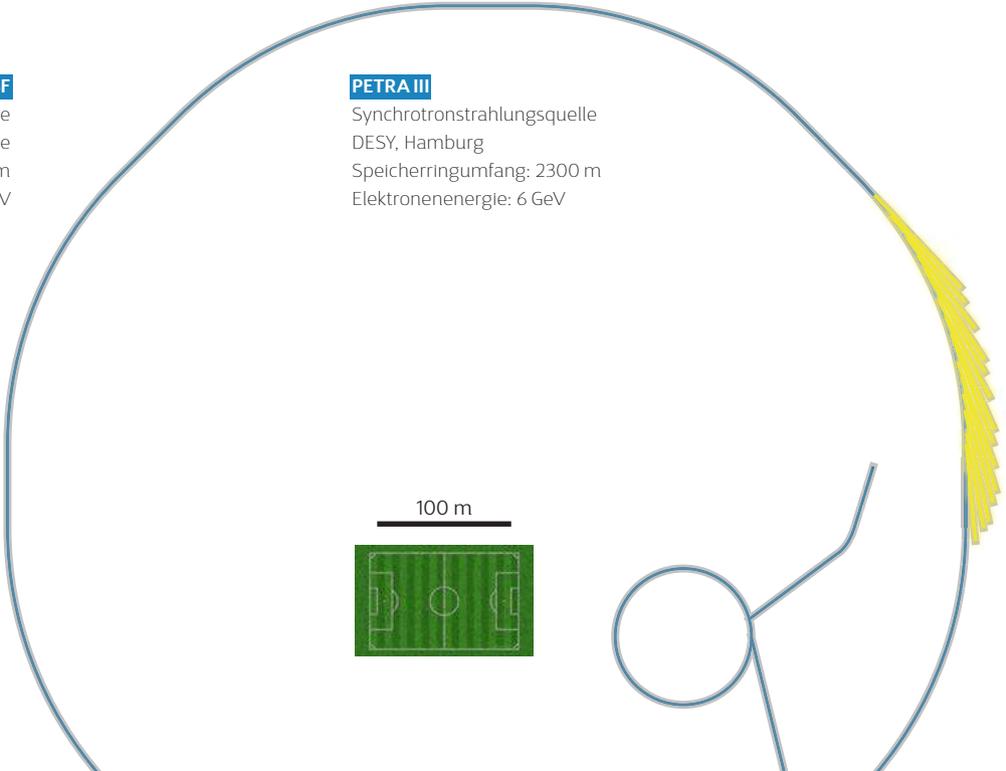
**ERSF**

Synchrotronstrahlungsquelle  
ERSF, Grenoble  
Speicherringumfang: 844 m  
Elektronenenergie: 6 GeV



**PETRA III**

Synchrotronstrahlungsquelle  
DESY, Hamburg  
Speicherringumfang: 2300 m  
Elektronenenergie: 6 GeV



100 m



Beschleuniger für die

## **FORSCHUNG MIT NEUTRONEN**

Neutronen gewähren Einsichten in Materie, die mit anderen Untersuchungswerkzeugen verborgen bleiben. Dank Beschleunigertechnologie kann dabei auf Kernreaktoren verzichtet werden.

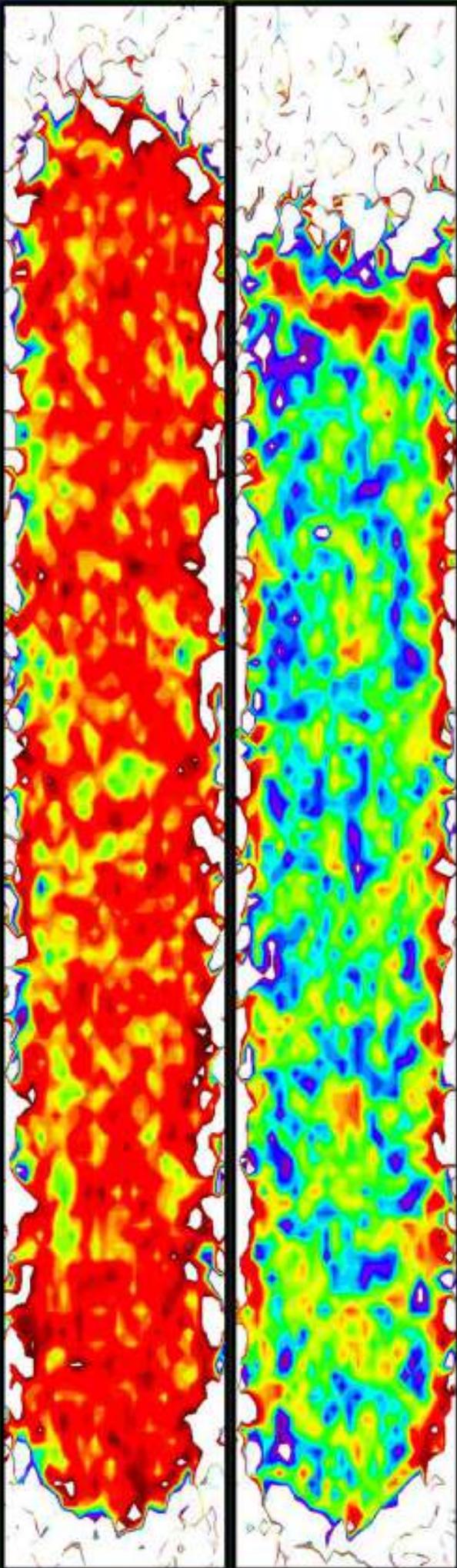
Der Nobelpreisträger Bertram N. Brockhouse brachte einmal seine Begeisterung über Neutronen mit den Worten zum Ausdruck: »Wenn Chadwick 1932 das Neutron nicht entdeckt hätte – man hätte es erfunden.« Und in der Tat haben sich Neutronen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu einem vielseitigen Analysewerkzeug entwickelt.

Dabei gaben sich die Neutronen selbst erst als letzte der Atombestandteile zu erkennen – 13 Jahre, nachdem das Proton nachgewiesen wurde. Zwar war vermutet worden, dass in Atomkernen auch elektrisch neutrale Varianten des Protons vorhanden sein müssten, doch das Neutron war aufgrund seiner fehlenden elektrischen Ladung schwer zu fassen.

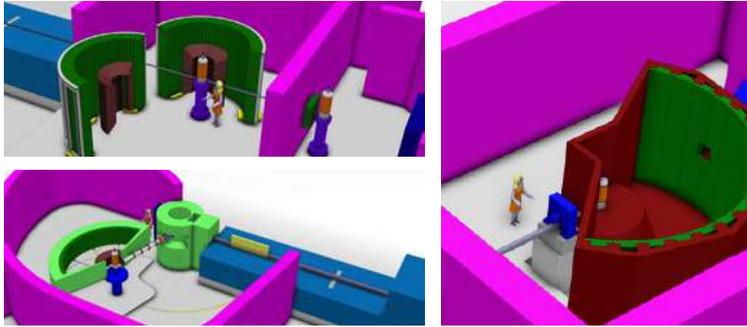
Dabei macht diese elektrische Neutralität das Neutron für Forschungszwecke gerade interessant. Denn im Gegensatz zu Elektronen oder Protonen können Neutronen Materie durchdringen, ohne durch elektrische Kräfte gestoppt zu werden. Neutronen durchfliegen dicke Schichten von Metallen und können organische Materialien wie Holz, Leder oder Knochen in versiegelten Behältern sichtbar machen.

Völlig unbeeindruckt bleiben Neutronen beim Durchfliegen von Materie allerdings nicht. Kernkräfte und magnetische Kräfte verändern Energien und Bahnen der Teilchen.

Dabei reagieren Neutronen besonders empfindlich auf die chemische Zusammensetzung der Proben, so dass sich verschiedene Elemente einfach unterscheiden lassen.



◆ Räumliche Verteilung von Eis und Wasser, wie sie bei einer Untersuchung zu **Brennstoffzellen** am Paul Scherrer Institut gemessen wurde. Die linke Abbildung zeigt die Verteilung bei minus, die rechte bei plus einem Grad Celsius. Rot bedeutet: nur Eis vorhanden, violett: nur flüssiges Wasser. (American Physical Society)



- Drei der über 20 Instrumente aus dem Technischen Designbericht für die im Bau befindliche Europäische Spallationsquelle ESS. Die Abmessungen der Instrumente sind im Vergleich zu denen für die Forschung mit Photonen weit größer. (ESS)

## BEISPIELE AUS DER FORSCHUNG

**Die Forschung mit Neutronen kann Fragen in vielen Anwendungsbereichen klären. Sie trägt unter anderem zur Entwicklung von besseren Computern, Kosmetika, Farbstoffen, Batterien und Kunststoffen bei.**

### Eis in Brennstoffzellen

Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen können elektrische Energie effizient und umweltfreundlich erzeugen. Im Betrieb reagiert hier Wasserstoff mit dem Sauerstoff der Luft zu Wasser, Wärme und Elektrizität. Doch gerade das entstehende Wasser kann zum Problem werden, wenn es etwa den Gaszufluss verstopft oder gar in kälteren Klimaregionen gefriert.

Aus diesem Grund entwickelten Forscherinnen und Forscher am Paul Scherrer Institut PSI im schweizerischen Villigen ein Verfahren, um die räumliche Verteilung von Eis und Wasser in Brennstoffzellen in Echtzeit sichtbar zu machen (siehe Abbildung links). Dabei gelang auch der erste direkte Nachweis, dass in Brennstoffzellen produziertes Wasser im unterkühlten Zustand vorhanden sein kann. Unterkühlt bedeutet, dass das Wasser selbst bei Temperaturen unter null Grad Celsius nicht gefriert. Neutronen trafen noch bei minus 7,5 Grad auf flüssiges Wasser.

### Kupplungsversuche – zunächst missglückt

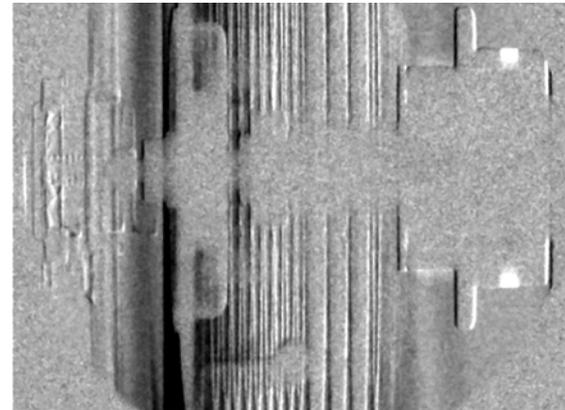
Motorradhersteller sind ständig bemüht, den Treibstoffverbrauch ihrer Maschinen zu senken. Eine Möglichkeit besteht darin, die Ölmenge zu reduzieren, mit der die Kupplung geschmiert und gekühlt wird. Denn die Ölpumpe ist ein großer Energieverbraucher; die meiste Energie wird dabei für die Kupplung aufgewendet.

Die Kupplung überträgt Kraft vom Motor auf die Räder. Üblicherweise besteht sie aus einer Reihe aneinandergespresster Scheiben, die immer dann auseinandergezogen werden, wenn der Gang gewechselt werden soll. Entwickler einer neuen ölgeschmierten Motorkupplung nutzten die beschleunigerbetriebene Neutronenquelle SINQ bei PSI, um ihr neues Design zu testen. Der Vorteil der Analyse mit Neutronen: Neutronen durchdringen Metall; außerdem konnte die Kupplung im Betrieb getestet werden. Zur Überraschung der Entwickler zeigte sich, dass beim neuen Design nur wenige der acht Kupplungsscheiben ordentlich von Öl benetzt wurden. Die Entwickler erarbeiteten daraufhin ein verbessertes Design, das trotz geringerem Ölfluss den anschließenden Test bestand.

### 4000 Jahre altes Beil durchleuchtet

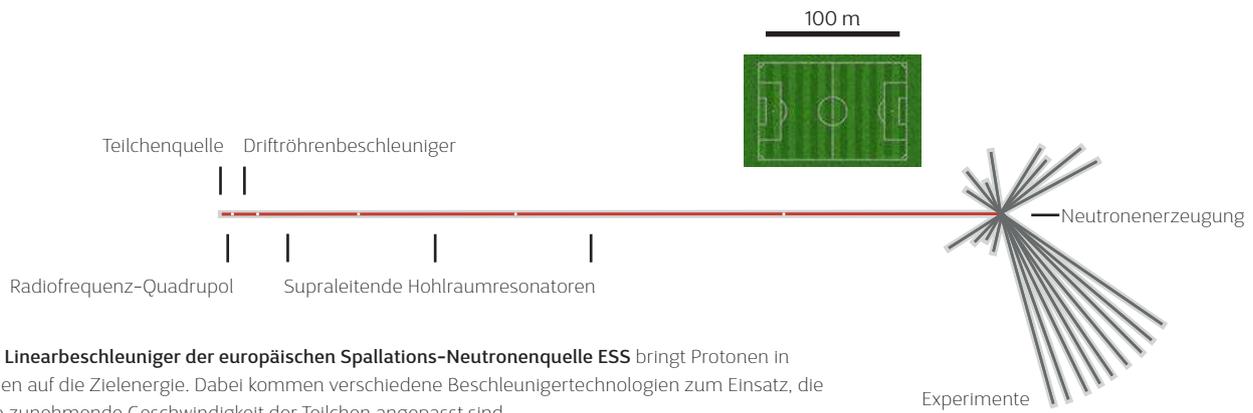
Auch die Archäologie und die Forschung zum kulturellen Erbe nutzen moderne beschleunigerbasierte Methoden für ihre Zwecke. Der große Vorteil: Die atomare und molekulare Zusammensetzung von Artefakten und ihre mechanische Struktur können genau untersucht werden, ohne die meist unersetzbaren Untersuchungsgegenstände zu beschädigen. An der Neutronenquelle SINQ bei PSI wurde beispielsweise ein fast viertausend Jahre altes Beil aus Bronze untersucht, das durch seine für die damalige Zeit ungewöhnliche Verzierung hervorsticht. Dabei konnte aus der Materialverteilung im Inneren darauf geschlossen werden, auf welche Weise das Beil gegossen wurde. Auch zeigte sich, wie die Goldverzierungen befestigt wurden – und das alles, ohne einen Kratzer zu hinterlassen.

- Ein Blick ins Innere einer **Motorradkupplung** offenbart, dass nur drei der acht Scheiben von Öl umgeben sind. (PSI)



- Fast viertausend Jahre alter **Bronzekeil** aus dem Bestand des Bernischen Historischen Museums, dessen Herstellungsweise mit Hilfe von beschleunigerzeugten Neutronen ergründet wurde. (Bernisches Historisches Museum, PSI)





- Der **Linearbeschleuniger der europäischen Spallations-Neutronenquelle ESS** bringt Protonen in Etappen auf die Zielenergie. Dabei kommen verschiedene Beschleunigertechnologien zum Einsatz, die an die zunehmende Geschwindigkeit der Teilchen angepasst sind.

## NEUTRONENQUELLEN

**Neutronen für die Forschung können in zwei Arten von Quellen bereitgestellt werden – in Kernreaktoren und in beschleunigerbetriebenen Anlagen.**

### Kernreaktoren als Neutronenquellen

Die ersten Experimente mit Neutronenstreuung fanden an Kernreaktoren statt, in denen die Teilchen in großer Zahl entstehen. Im Jahr 1967 wurde im französischen Grenoble das Institut Laue-Langevin ILL gegründet, das zum Flaggschiff der Forschung mit kernreaktorerzeugten Neutronen wurde.

### Beschleunigerbetriebene Neutronenquellen

In den 1960er Jahren begann die Entwicklung von beschleunigerbasierten Neutronenquellen. Hier werden energiereiche Teilchen auf ein Ziel gelenkt und erzeugen dort Neutronen. Zunächst wurden die Möglichkeiten von Elektronenbeschleunigern untersucht. Doch bei der Wechselwirkung energiereicher Elektronen mit Materie entsteht Gammastrahlung, die zu Problemen führte, die schwer in den Griff zu bekommen waren. Daher schwenkte man Ende der 1970er Jahre auf Protonenbeschleuniger um. An modernen Neutronenquellen werden Neutronen mit Hilfe der nuklearen Spallation erzeugt. Dazu werden Protonen auf hohe Energien beschleunigt und dann auf schwere Atomkerne – wie etwa die von Wolfram – geschossen. Die Kollision zerschmettert die Atomkerne in kleinere Bruchstücke – unter ihnen auch Neutronen. Diese Neutronen werden anschließend in flüssigem Wasserstoff oder Methan auf die gewünschten Energien abgebremst und über Neutronenstrahlführungen zu den Experimentierplätzen geleitet. Beschleunigerbasierte Quellen haben gegenüber reaktorbasierten viele Vorzüge. Unter anderem ist die Energiebilanz weit besser, da weniger Wärme pro nutzbarem Neutron erzeugt wird. Auch lassen sich weit höhere Spitzenintensitäten erreichen.

## ESS

**Im schwedischen Lund entsteht die European Spallation Source (ESS), die ab 2019 als weltweit stärkste zeitlich gepulste Neutronenquelle einzigartige Experimentiermöglichkeiten bieten wird.**

Der Spitzen-Neutronenfluss der ESS wird denjenigen bisheriger Neutronenquellen um das 30-fache übertreffen. Damit sichert die neue Spallationsquelle die führende Rolle Europas in der Forschung mit Neutronen.

### Linearbeschleuniger

Ausgangspunkt für die Neutronenerzeugung an der ESS ist ein gut 600 Meter langer Linearbeschleuniger, der Protonenpakete auf eine Energie von zwei Milliarden Elektronenvolt bringt – 14-mal pro Sekunde. Der Beschleuniger arbeitet dabei sowohl normal- als auch supraleitend: Nach einer ersten Vorbeschleunigung werden die Protonen zunächst in einem Driftröhrenbeschleuniger auf ausreichend hohe Geschwindigkeiten gebracht, um daraufhin in normalleitenden und supraleitenden Hohlraumresonatoren auf die Endenergie beschleunigt zu werden.

### Deutsche Beteiligung

Mit nahezu tausend aktiven Neutronenforscherinnen und -forschern stellt Deutschland die größte europäische Nutzergemeinde der ESS. Die deutschen Beiträge zu den Planungsarbeiten für die ESS koordiniert das Forschungszentrum Jülich. Es kann auf eine lange Geschichte in der Neutronenforschung und der Entwicklung von Instrumenten und Spallationsquellen zurückblicken. So profitieren die Planungsarbeiten für die ESS auch von der langjährigen Erfahrung am Forschungsreaktor FRM II in München, am Reaktor des ILL und an beschleunigerbetriebenen Neutronenquellen wie der *Spallation Neutron Source (SNS)* in den USA.

- **Architektur-Visualisierung** der im Bau befindlichen Neutronenquelle ESS (ESS/Team Henning Larsen Architects)

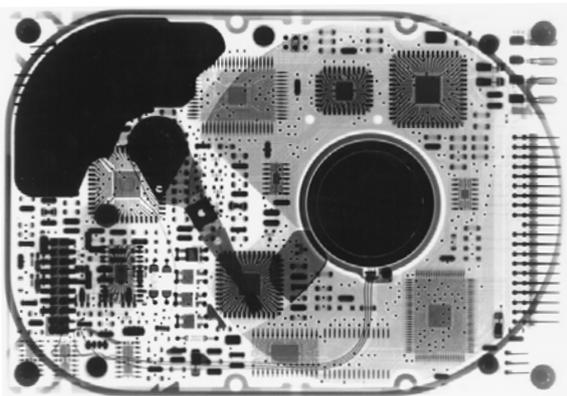


## NEUTRONEN ODER PHOTONEN?

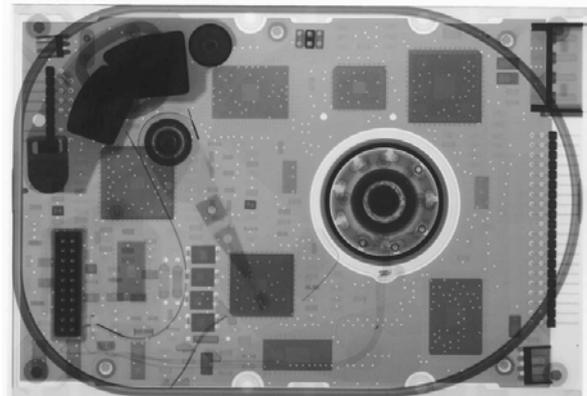
Der Forschung stehen unterschiedliche beschleunigerbetriebene Werkzeuge zur Erkundung von Materie zur Verfügung: Neutronen aus Spallationsquellen sowie Photonen aus Synchrotronstrahlungsquellen und Freie-Elektronen-Lasern. Welches Werkzeug geeigneter ist, hängt vom Untersuchungsgegenstand ab.

	Neutronen aus Spallationsquellen	Photonen aus Synchrotrons	Photonen aus Freie-Elektronen-Lasern
Anzahl verfügbarer Messplätze	mittel	hoch	gering
Stabilität der Strahlparameter	gut	exzellent	passabel
Durchlässigkeit in Materie (wie Metall)	hoch	gering	gering
Sind <b>leichte Elemente</b> sichtbar? (z.B. Wasserstoff)	ja	nein	nein
Sind <b>ultraschnelle Veränderungen</b> untersuchbar? (Femtosekunden)	nein	bedingt	ja
Sind <b>einzelne Moleküle</b> untersuchbar?	nein	nein	ja

• Eine **Festplatte im Röntgenbild**: Metalle erscheinen schwarz, da Röntgenlicht darin gestoppt wird. Kunststoff hingegen passiert Röntgenstrahlung größtenteils ungehindert. (PSI)



• Dieselbe **Festplatte im Neutronenbild**: Das Innere von metallischen Hohlräumen wird sichtbar. Dafür sind kleinere metallische Bauteile nicht mehr zu sehen. (PSI)



Beschleuniger für die

## **KERNPHYSIK**

Mit Beschleunigern werden Atomkerne und exotische Kernmaterie vermessen. Genaue Daten aus der Kernphysik helfen auch der Industrie und Medizin.

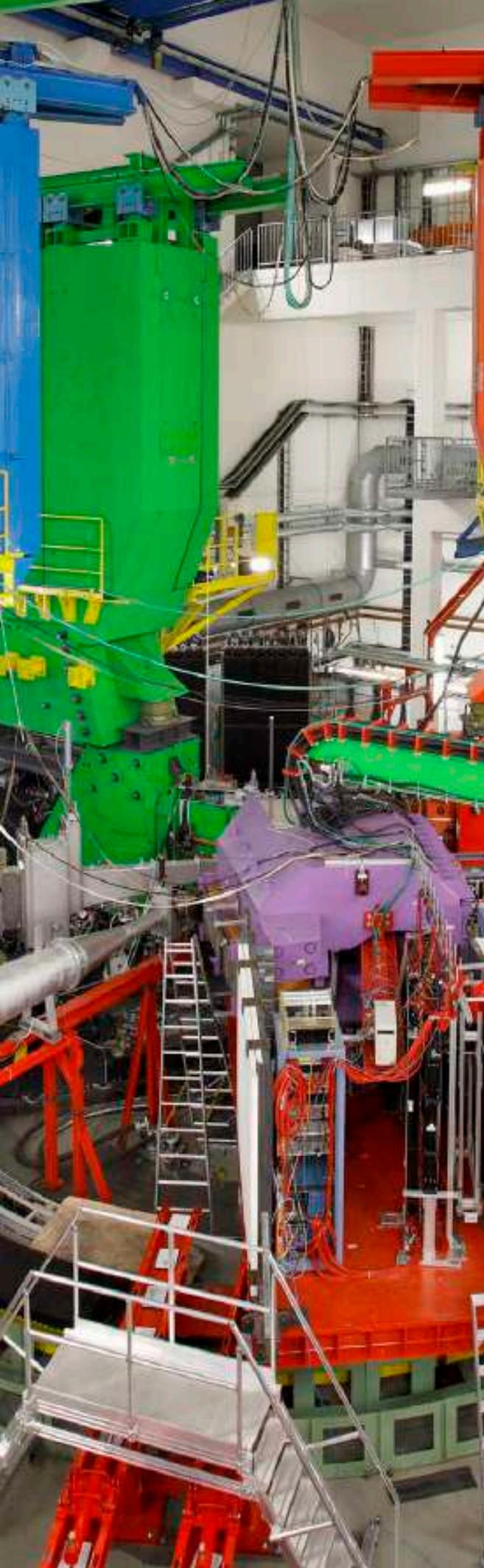
Im Jahr 1911 untersuchte Ernest Rutherford, wie sich Alphateilchen verhalten, wenn man sie auf eine dünne Goldfolie schießt. Obwohl er drei Jahre zuvor den Chemie-Nobelpreis erhalten hatte, war ihm zunächst nicht klar, was er da tat.

Rutherford wusste nicht, dass Alphateilchen die Kerne der Heliumatome sind. Damals waren Atomkerne noch unbekannt: Man ging davon aus, dass Atome aus gleichmäßig verteilter, positiv geladener Masse bestehen, in der sich – wie in einem Rosinenkuchen – negativ geladene Elektronen befinden. Erst Rutherfords clevere Analyse des Goldfolien-Experiments zeigte, dass in der Mitte eines jeden Atoms ein winziger schwerer Kern zu finden ist. Mittlerweile wissen wir: Die Kerne bestehen aus Protonen und Neutronen, die wiederum aus Quarks und Gluonen zusammengesetzt sind.

Rutherford nutzte Alphateilchen aus einer natürlichen Quelle. Diese Quellen reichten jedoch bald nicht mehr aus; künstlich beschleunigte Teilchen wurden für die Kernphysik immer wichtiger.

Das Wort »Kernphysik« mag bei einigen Gänsehaut hervorrufen. So sitzen in Friedrich Dürrenmatts *Physiker* Kernphysiker im Irrenhaus. Hiroshima und Nagasaki wurden durch Kernenergie (und menschlichen Willen) zerstört. Ebenso Unbehagen weckt der Gedanke an die Kernkraftanlagen Tschernobyl und Fukushima, auch wenn der ursprüngliche Zweck hier zivilisierter war.

Doch Kernphysik ist auch Kernspintomografie (MRT) und Positronen-Emissions-Tomographie (PET) für unerreicht detaillierte Aufnahmen aus dem menschlichen Körper; Kernphysik ist Ionen- und Protonentherapie zur Zerstörung von Krebstumoren; Kernphysik ist die Altersbestimmung mit der C-14-Methode für die Archäologie, Geologie und Umweltphysik; ohne Kernphysik wüssten wir auch nicht, wie komplexe chemische Reaktionen – etwa die Photosynthese – vonstatten gehen.



107 <b>Bh</b> Bohrium	108 <b>Hs</b> Hassium	109 <b>Mt</b> Meitnerium	110 <b>Ds</b> Darmstadtium	111 <b>Rg</b> Roentgenium	112 <b>Cn</b> Copernicium
-----------------------------	-----------------------------	--------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

## BEISPIELE AUS DER FORSCHUNG

**Ob extreme Zustände wie kurz nach dem Urknall oder die Entstehung der Elemente in Sternexplosionen – Kernphysik hat das Winzige und das Riesige im Blick.**

### Entdeckung neuer Elemente

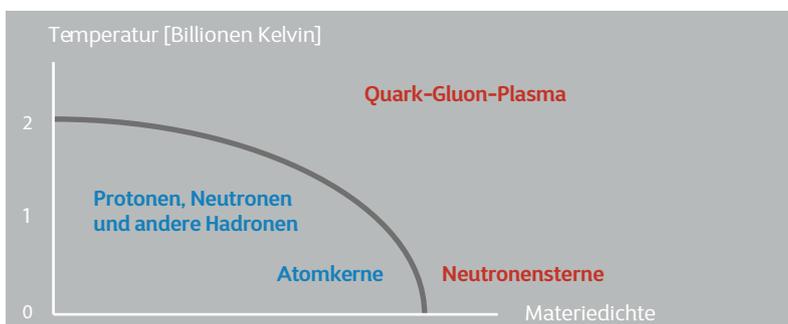
Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt forschen Weltmeister – Weltmeister der Erzeugung schwerer Atomkerne. Dazu werden natürlich vorkommende Atomkerne bei hohen Energien verschmolzen. So konnten bei GSI bereits sechs bis dato unbekannte schwere Elemente erzeugt und untersucht werden.

### Entstehung der Materie

Alle schweren Elemente, auch das Eisen im menschlichen Blut, sind vor langer Zeit in gewaltigen Sternexplosionen entstanden. Wer die kernphysikalischen Prozesse dahinter verstehen will, muss die Eigenschaften der vielen Zwischenprodukte kennen. Doch diese sind meist sehr kurzlebig und kommen nicht natürlich auf der Erde vor. Daher werden sie mit Beschleunigern erzeugt. Dies geschieht bei GSI in Darmstadt; auch die ISOLDE-Anlage bei CERN produziert kurzlebige Atomkerne. Einige der Kernprozesse, die auch in unserer Sonne ablaufen, können nur in einer Umgebung untersucht werden, die von der kosmischen Strahlung abgeschirmt ist. Dazu werden im Gran-Sasso-Bergmassiv in Italien mit deutscher Beteiligung Beschleuniger tief unter der Erde betrieben.

### Urknall und Neutronensterne

An der Grenze zwischen Kern- und Teilchenphysik werden Quark-Gluon-Plasmen erforscht. Aus dieser extrem heißen und dichten Form von Kernmaterie bestand das Universum in seinen ersten Sekundenbruchteilen. Heute findet man sie höchstens noch in Neutronensternen oder nach dem Zusammenstoß beschleunigter Atomkerne. Bei CERN werden am LHC-Beschleuniger Quark-Gluon-Plasmen wie nach dem Urknall produziert. Bei GSI wird die im Bau befindliche Beschleunigeranlage FAIR Plasmen mit hohen Dichten erzeugen, wie sie im Inneren von Neutronensternen vorkommen.

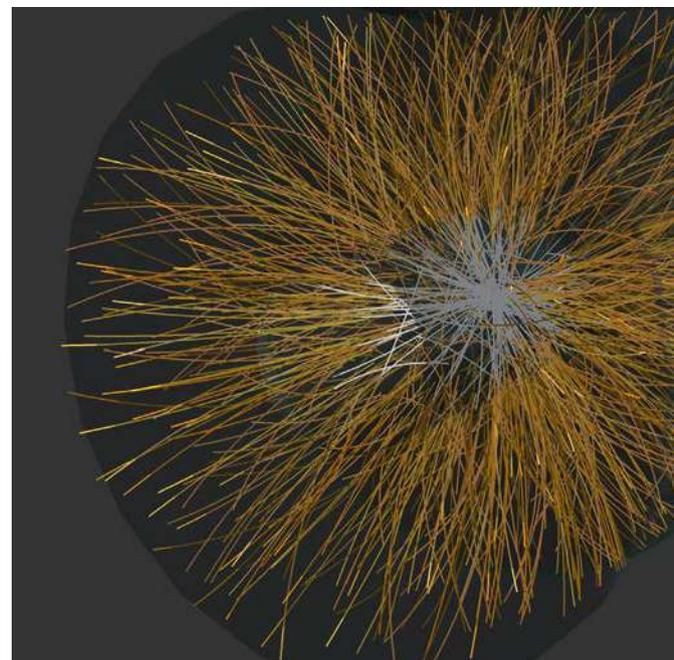


• In Experimenten an der GSI-Beschleunigeranlage wurden die sechs neuen **Elemente 107 bis 112** entdeckt.

• Im Jahr 2010 wurde das sechste bei GSI nachgewiesene Element auf den Namen **Copernicium** getauft. (GSI)



• **Kollision von Bleikernen,** aufgezeichnet vom LHC-Experiment ALICE (CERN)



## ANFORDERUNGEN DER KERNPHYSIK

Eine besondere Herausforderung der Kernphysik sind polarisierte Teilchen von möglichst einheitlicher Energie.

### Polarisierte Teilchen

Um das Zusammenspiel von Quarks und Gluonen zu verstehen, braucht man polarisierte Teilchen. Polarisation bedeutet, dass die Spins der Teilchen – eine Art Eigenrotation – gleich ausgerichtet sind. Polarisierte Teilchenstrahlen zu erzeugen und dafür zu sorgen, dass die Polarisation während der Beschleunigung nicht verloren geht, gehört zu den anspruchsvollsten Aufgaben moderner Beschleunigertechnik.

### Energetisch auf dem Punkt

Für viele kernphysikalische Untersuchungen ist es wichtig, dass die Energie der Teilchenpakete so einheitlich wie möglich ist. In einem Ringbeschleuniger müssen sich die Pakete dazu möglichst genau auf der Sollbahn befinden und möglichst wenig um sie herum schwingen. Dies lässt sich für Protonen und Ionen besonders gut mit der sogenannten stochastischen Kühlung erreichen. Dabei werden Abweichungen der Bewegung von der Sollbahn zunächst gemessen und anschließend korrigiert, indem die Teilchen durch hochfrequente Wechselfelder zur Sollbahn zurückgeführt werden.

## BESCHLEUNIGER FÜR DIE KERNPHYSIK

Zahlreiche Untersuchungen in der Kernphysik lassen sich an kleineren Beschleunigern durchführen. Für andere sind gewaltige Beschleunigeranlagen vonnöten.

### CSR, ELSA, MAMI, S-DALINAC und COSY

In Deutschland gibt es zahlreiche kleine bis mittelgroße Beschleunigeranlagen, an denen in der Kernphysik geforscht wird.

Das Max-Planck-Institut für Kernphysik MPIK in Heidelberg betreibt den kompakten Ionenspeicherring **CSR**. Experimente mit polarisierten Elektronen lassen sich an der Ringanlage **ELSA** (Universität Bonn), am Mikrotron **MAMI** (Universität Mainz) und am Linearbeschleuniger **S-DALINAC** (TU Darmstadt) durchführen.

Polarisierte Protonen hingegen kommen am Ringbeschleuniger **COSY** (Forschungszentrum Jülich) zum Einsatz. COSY zeichnet sich unter anderem durch eine besonders leistungsstarke stochastische Kühlrichtung aus.

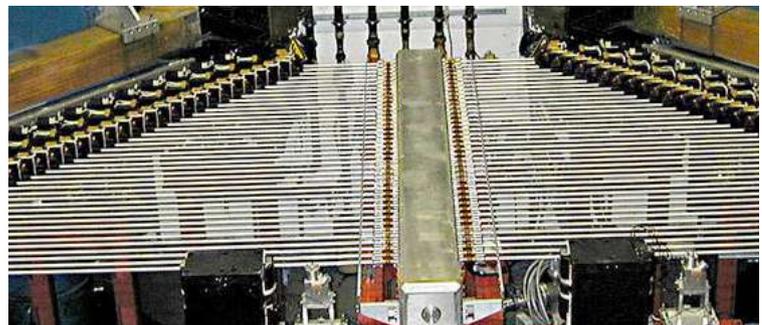
### FAIR

Mit dem Aufbau der **Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)** in Darmstadt soll die Erzeugungsrate kurzlebiger Isotope mehr als tausendfacht werden. Dazu wird der bei GSI bestehende Beschleunigerkomplex unter anderem um ein supraleitendes Synchrotron erweitert, das Ionenstrahlen mit bisher unerreichter Intensität liefern wird. Im Endausbau besteht FAIR aus acht Ringbeschleunigern mit bis zu 1100 Metern Umfang, zwei Linearbeschleunigern und rund 3,5 Kilometern Strahlführungsrohren. Besondere Herausforderungen der neuen Anlagen sind die Entwicklung von neuartigen, kompakten Beschleunigerkomponenten sowie die besonders komplizierte Strahldiagnostik zur Kontrolle der vielen verschiedenen Teilchensorten.



• Die **GSI-Beschleunigeranlage** besteht aus drei Abschnitten: Driftröhrenbeschleuniger UNILAC (links), Schwerionen-Synchrotron SIS18 (Mitte) und Ionenspeicherring ESR (rechts). Für FAIR werden diese Systeme als Vorbeschleuniger weiterverwendet. (GSI)

• Weltweit einmalig ist das **Mainzer Mikrotron**, eine Weiterentwicklung des Zyklotron-Prinzips für Elektronen, bei dem die Teilchen mit zunehmender Energie 48 Vakuumröhren durchlaufen. MAMI liefert im Gegensatz zu den Pulszügen an Linearbeschleunigern oder Synchrotrons eine gleichmäßige Folge von Teilchenpaketen. (MAMI)



**COSY**

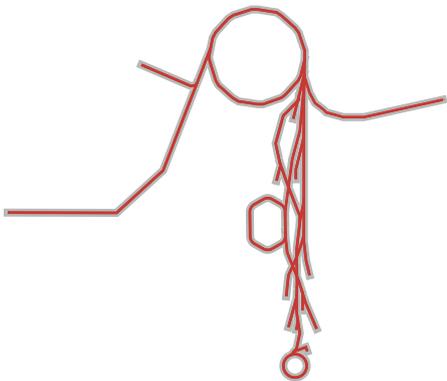
Ionen-Kühlersynchrotron  
Forschungszentrum Jülich  
Umfang: 183 m  
Protonenenergie: 2,88 GeV

**CSR**

Ionenspeicherring  
MPIK, Heidelberg  
Umfang: 35 m  
Protonenenergie: 300 keV

**ELSA**

Elektronenstretcher  
Universität Bonn  
Stretcherringumfang: 164 m  
Elektronenenergie: 3,5 GeV

**FAIR (im Bau)**

Ionenbeschleunigerkomplex  
FAIR, Darmstadt  
Umfang (SIS100): 1100 m  
Protonenenergie (SIS100): 30 GeV

**GSI-Beschleunigerkomplex**

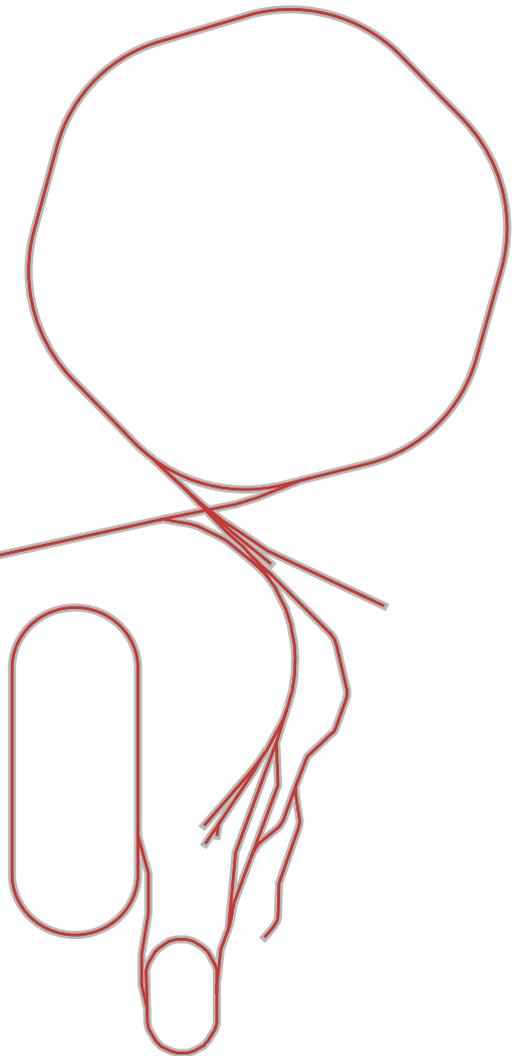
GSI, Darmstadt  
UNILAC (120 m), SIS18 (216 m)  
und ESR (108 m)  
Protonenenergie (SIS18): 4 GeV

**MAMI**

Mikrotron  
Universität Mainz  
Grundfläche (MAMI C): 30 m x 15 m  
Elektronenenergie: 1,6 GeV

**S-DALINAC**

Linearbeschleuniger  
TU Darmstadt  
Grundfläche: 25 m x 10 m  
Elektronenenergie: 130 MeV



100 m



Beschleuniger für die

## **TEILCHENPHYSIK**

Das Streben der Teilchenphysik nach immer höheren Energien und intensiveren Teilchenpaketen ist seit jeher wichtige Triebfeder für die Beschleunigerphysik.

Anfang des 20. Jahrhunderts zeigte sich, wie falsch die Physik in vielen Dingen lag: Einsteins Relativitätstheorie stellte die Vorstellung von Raum und Zeit auf neue theoretische Füße und die Quantentheorie besagte, dass sich die Welt im Kleinen nicht gleichförmig und bestimmt verhält, sondern sprunghaft und zufällig.

Als wäre das nicht genug, zeigten erste Experimente mit beschleunigten Teilchen, dass Atome nicht unteilbar sind, sondern aus noch kleineren Bausteinen bestehen. In Experimenten an Beschleunigern offenbarte sich im Laufe der Zeit ein ganzer Teilchenzoo, auf den man sich lange keinen Reim machen konnte. Erst in den 1960er und 1970er Jahren konnte ein Großteil der unerwarteten Erkenntnisse mit einem Satz von Theorien erklärt werden, der seither als Standardmodell der Teilchenphysik firmiert.

Dieses Standardmodell entpuppte sich als Meisterwerk, das allen bisherigen experimentellen Überprüfungen bestens gewachsen war. Doch theoretische Überlegungen zeigen, dass das Modell nicht der Weisheit letzter Schluss sein kann: Bei hohen Energien kommt es zu logischen Ungereimtheiten; das Modell beschreibt weder die Gravitation, noch kann es die drei anderen Grundkräfte (die starke, schwache und elektromagnetische Kraft) zu einer einzigen Theorie vereinen; auch sagt es nichts dazu aus, woraus der überwiegende Teil der Masse im Universum besteht (Dunkle Materie) und wieso sich das Universum ausdehnt (Dunkle Energie). Nichtsdestotrotz: Beschleuniger um Beschleuniger, Experiment um Experiment zeigten sich die beobachteten Daten in Übereinstimmung mit dem Modell. Diese Erfolgsgeschichte erreichte 2012 ihren Höhepunkt mit dem Nachweis des Higgs-Teilchens, das als zentraler Bestandteil des Standardmodells über 40 Jahre zuvor vorhergesagt worden war.

So paradox es klingt: In der Teilchenphysik würden die Forscherinnen und Forscher gerne mal wieder falsch liegen – so wie vor über hundert Jahren. Zusammen mit den Kolleginnen und Kollegen aus der Beschleunigerphysik arbeiten sie daran.

• Visualisierung einer am LHC-Experiment ATLAS aufgezeichneten Messung. Die beiden kurzen blauen Linien zeigen Elektronen; die beiden langen Linien gehören zu Myonen. Die vier Teilchen könnten durch den **Zerfall eines Higgs-Teilchens** entstanden sein. (CERN)



- Die Teilchen im **Standardmodell der Teilchenphysik**. Das Higgs-Teilchen gab sich als letztes zu erkennen.

## BEISPIELE AUS DER FORSCHUNG

**Ohne Beschleuniger gäbe es die heutige Teilchenphysik nicht. Viele Bausteine der Universums können nur untersucht werden, wenn man sie zuvor durch Zusammenstöße energie-reicher Teilchen erzeugt.**

### Entdeckung der Gluonen

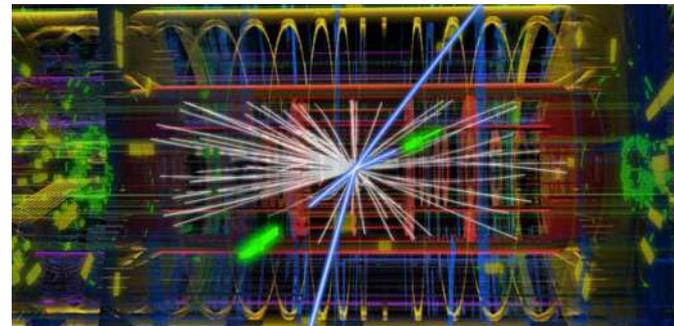
Im Frühjahr 1979 sorgten in Hamburg Teilchenspuren für große Aufregung – Teilchenspuren, die zu drei Bündeln angeordnet waren. Sie zeigten sich am Beschleuniger PETRA bei DESY. Hier wurden Elektronen und ihre Antiteilchen bei bis dato unerreichten Energien aufeinander geschossen. Die drei Bündel ließen sich bestens mit der Theorie der starken Kraft erklären, die die Wechselwirkung zwischen Quarks mit Hilfe des Austausches von Gluonen beschreibt. Das war der Durchbruch für die Theorie und ein riesiger Erfolg für die vier PETRA-Experimente JADE, MARK-J, PLUTO und TASSO.

### Bestätigung des Higgs-Modells

Über vierzig Jahre lang mussten Teilchenphysikerinnen und -physiker warten, bis sie den letzten Puzzlestein des Standardmodells dingfest machen konnten. In den 1960er Jahren entwickelten Peter Higgs und zwei weitere Forschergruppen unabhängig voneinander die Lösung für ein schwerwiegendes Problem der damaligen Teilchenphysik. Denn die Beschreibung der Kräfte gelang nur mit masselosen Teilchen. Doch wieso haben Elektronen, Neutrinos und Quarks nachweislich dennoch eine Masse? Die Antwort lieferte der Higgs-Mechanismus, der mit den Higgs-Bosonen weitere neue Teilchen voraussagte. Die Masse dieser Teilchen ist allerdings so groß, dass erst der 27 Kilometer lange Beschleuniger LHC bei CERN ausreichend Kollisionsenergie bereitstellte, um die Higgs-Bosonen nachzuweisen. Im Juli 2012 verkündeten die LHC-Experimente ATLAS und CMS – unter weltweiter Beachtung – den Nachweis des letzten fehlenden Bausteins des Standardmodells.



- Teilchenphysik 1979:** Nachweis der Gluonen am PETRA-Beschleuniger bei DESY. Zwei der drei Teilchenbündel stammen von Quarks. Ein drittes lässt sich auf ein Gluon zurückführen. (TASSO/DESY)
- Teilchenphysik 2012:** Nachweis der Higgs-Teilchen am LHC-Beschleuniger bei CERN. Bei der abgebildeten Teilchenreaktion zerfällt ein Higgs-Teilchen in zwei Myonen (lange blaue Linien) und zwei Elektronen (kurze blaue Linien). (CMS/CERN)



- Peter Higgs am LHC-Beschleuniger**, als die nach ihm benannten Teilchen noch nicht entdeckt waren. Für die theoretische Entwicklung des Higgs-Mechanismus erhielten er und François Englert 2013 den Nobelpreis für Physik. (CERN)



## HOHE ENERGIEN UND DICHTHE PAKETE

Die immensen Ansprüche der Teilchenphysik treiben die Beschleunigerphysik ständig voran.

### Energieheißhunger

Die Teilchenphysik untersucht Teilchen, die es kurz nach dem Urknall zahlreich gab, die jedoch heute – 15 Milliarden Jahre später – nur noch selten vorkommen. Diese Teilchen entstehen in Kollisionen von energiereichen Teilchen – entsprechend wird die Teilchenphysik auch »Hochenergiephysik« genannt. Seit Jahrzehnten werden die Beschleuniger mit den höchsten erreichbaren Energien für die Teilchenphysik gebaut.

### Dem Glück intensiv auf die Sprünge helfen

Teilchenphysik ist Glücksspiel. Denn Elektronen und Protonen sind derart klein, dass es längst nicht mit Sicherheit zu einer Wechselwirkung kommt, wenn sich die Wege beschleunigter Teilchenpakete kreuzen. Dem Glück kann mit besonders dichten Teilchenpaketen auf die Sprünge geholfen werden – denn je dichter die Teilchen gepackt sind, desto größer ist die Anzahl der Kollisionen und desto öfter lassen sich auch extrem seltene Wechselwirkungen beobachten. Dazu werden die Teilchenpakete durch ausgeklügelte Magnetanordnungen zusammengebracht und -gehalten.

Intensive Teilchenstrahlen sind auch für Experimente mit Neutrinos wichtig. Diese besonders scheuen Teilchen treten mit dem Rest der Welt extrem selten in Wechselwirkung. Dennoch verfügen sie über Eigenschaften, die so zentrale Fragen wie »Wieso gibt es überhaupt Materie?« klären könnten. Wer Neutrinos untersuchen will, braucht viel Zeit oder viele Neutrinos. Zur Erzeugung eines intensiven Neutrinostrahls werden beschleunigte Protonen auf einen Grafitblock gelenkt. Dabei entstehen leichtere Teilchen, die Pionen, die in Magnetfeldern zu hoch intensiven Teilchenstrahlen gebündelt werden, bevor sie unter anderem in Neutrinos zerfallen. Bei CERN wurden auf diese Weise Neutrinos erzeugt und nach einer 730 Kilometer langen Reise durch die Erde im italienischen Gran-Sasso-Laboratorium untersucht. Ähnliche Anlagen sind in Japan und den USA in Betrieb.

## GEMEINSAM ZU MEHR ENERGIE

Die weltweit größten Beschleunigeranlagen werden für die Teilchenphysik gebaut. Seit Jahrzehnten ist dies nur in internationaler Zusammenarbeit möglich.

### Gestern

In Deutschland ging der letzte große Beschleuniger für die Teilchenphysik 2007 in den Ruhestand. **HERA** bei DESY in Hamburg brachte Elektronen und Protonen zum Zusammenstoß – mit dem Ziel, unter anderem den Aufbau der Protonen besser zu verstehen. Dabei zeigte sich: Der Aufbau der Protonen ist weitaus komplexer, als man bis dahin annahm.

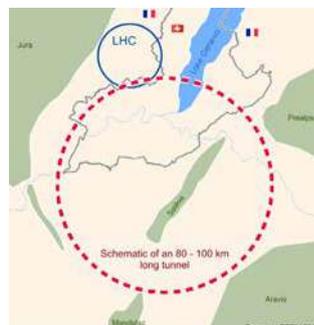
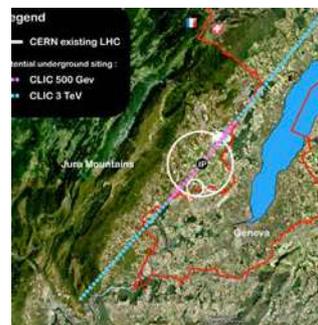
### Heute

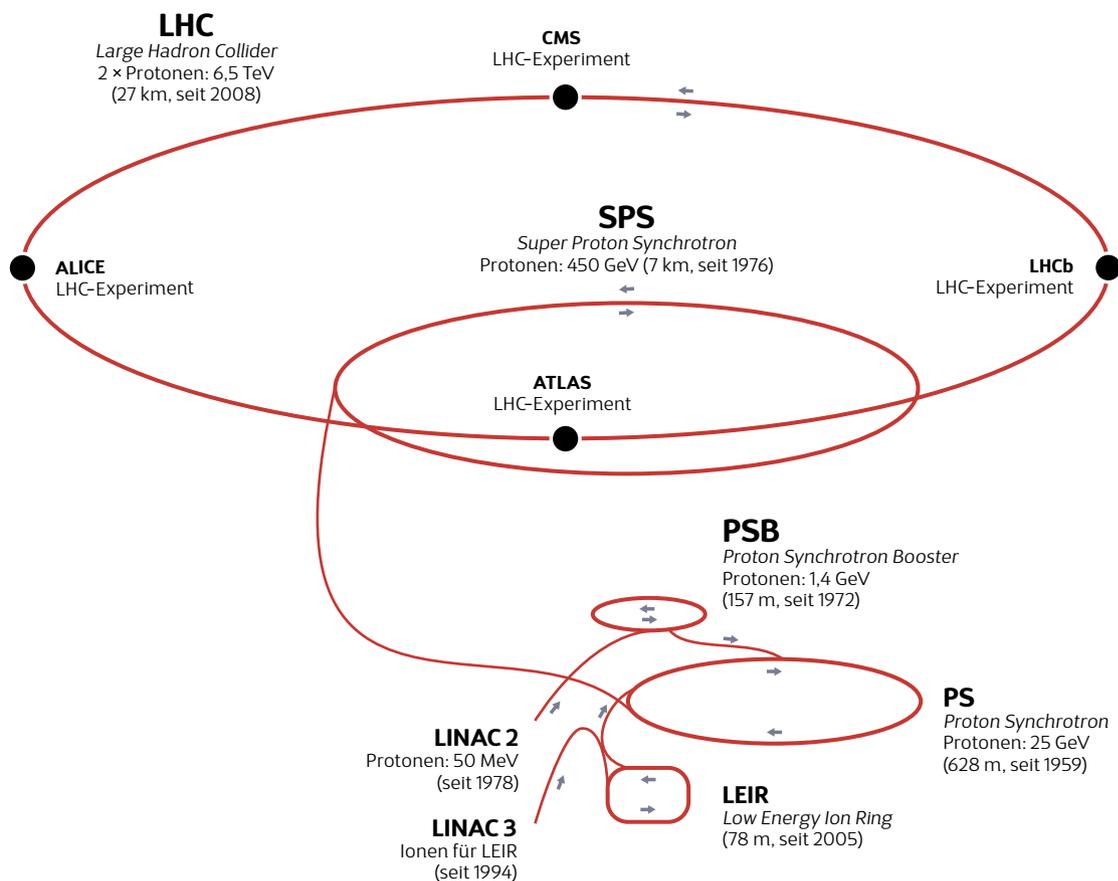
Der derzeit leistungsstärkste Beschleuniger ist der **Large Hadron Collider (LHC)** bei CERN. Hier werden Protonen bei bisher unerreichten Energien aufeinander geschossen. Auch wenn die erhoffte Entdeckung des Higgs-Teilchens schon Wirklichkeit geworden ist, wird die Forschung am LHC noch Jahre weiterlaufen. Ziel ist es, die Eigenschaften der Higgs-Teilchen besser zu verstehen und nach neuen Phänomenen zu suchen, die den Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik sprengen und Hinweise auf eine umfassendere Theorie der Teilchen und Kräfte geben könnten.

### Morgen und übermorgen

Für die genaue Vermessung der Higgs-Teilchen sind Zusammenstöße von Elektronen und deren Antiteilchen besser geeignet als die Protonenkollisionen am LHC. Solche Elektron-Positron-Kollisionen könnte der geplante **International Linear Collider (ILC)** liefern, ein supraleitender Linearbeschleuniger, zu dessen Entwicklung DESY wesentlich beigetragen hat. Noch ist nicht entschieden, ob und wo der ILC gebaut werden wird. Ein alternativer Ansatz wird bei CERN entwickelt: Der **Compact Linear Collider (CLIC)** wäre normaleitend, könnte aber höhere Energien erreichen. Für die Nachfolge des LHC wird am CERN die Machbarkeit eines 100 Kilometer langen Ringbeschleunigers untersucht: Im **Future Circular Collider (FCC)** würden Protonen mit Protonen bei fast zehnmal höheren Energien kollidieren als im LHC.

● **Mögliche Standorte der geplanten Beschleuniger CLIC, FCC und ILC:** Die beiden CERN-Projekte CLIC und FCC könnten in der Nähe des Genfer Sees realisiert werden, für den ILC kommt die Kitakami-Bergregion im Norden Japans in Betracht.





## LHC-Beschleunigerkomplex bei CERN

Wenn Protonen im *Large Hadron Collider* auf eine Strahlenergie von bis zu 6,5 Billionen Elektronenvolt (Teraelektronenvolt, Stand 2015) beschleunigt werden, starten die Teilchen nicht bei Null, sondern verfügen bereits über eine Anfangsenergie von 450 Milliarden Elektronenvolt (Gigaelektronenvolt). Dafür haben zahlreiche Vorbeschleuniger gesorgt: Zu Beginn werden Wasserstoffatome die Elektronen geraubt, so dass die Atomkerne des Wasserstoffs – Protonen – übrigbleiben. Diese

Protonen erhalten im Linearbeschleuniger **LINAC 2** eine Bewegungsenergie von 50 Millionen Elektronenvolt (Megaelektronenvolt). Das entspricht bereits einer Geschwindigkeit von 340 Millionen Kilometern pro Stunde oder 31,4 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Weiter geht es im ersten Ringbeschleuniger, dem **Proton Synchrotron Booster (PSB)**, der die Protonen auf 1,4 Milliarden Elektronenvolt bringt. Daran schließt sich CERNs ältester Beschleuniger an, das über 50 Jahre alte **Proton Synchrotron (PS)**. Hier erreichen die Teilchen 25 Milliarden Elektronenvolt (99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit). Weiter geht es im 7 Kilometer langen **Super Proton Synchrotron (SPS)**, der letzten Etappe vor dem LHC. Das SPS beschleunigt die Protonen auf 450 Milliarden Elektronenvolt.



Teilnehmende des CERN-Sommerstudierendenprogramms (CERN)

# RESSOURCEN SCHONEN, MENSCHEN VERBINDEN



Ressourcenschonend beschleunigen 48–49

Berufsfeld Beschleuniger 50–51

Globale Netzwerke 52–53

Beschleunigerphysik in Deutschland 54–55

## RESSOURCENSCHONEND BESCHLEUNIGEN

Energieeffizienz und Recycling sind wichtige Faktoren beim Bau und Betrieb

moderner Beschleuniger. Das schützt die Umwelt und senkt Investitions- und Betriebskosten.

### RECYCELTE ENERGIE

Ein herkömmlicher Beschleuniger verbraucht viel Energie; doch nur ein Bruchteil dieser Energie wird für Experimente verwendet. Der Teilchenstrahl und seine Energie werden nach dem Einsatz schlicht entsorgt.

Bei einem Beschleuniger mit Energierückgewinnung (*Energy Recovery Linac*, ERL) hingegen würde ein Prinzip beim Energiesparen helfen, das von Elektroautos bekannt ist. Wer hier auf die Bremse tritt, lädt die Batterie

auf. Anstatt als Wärme zu verpuffen, wird die Bewegungsenergie in elektrische Energie umgewandelt.

Bei einem ERL werden die bereits beschleunigten Elektronen erneut in die Beschleunigungselemente geleitet. Dabei treffen sie genau zu dem Zeitpunkt ein, zu dem das elektromagnetische Feld in den Elementen nicht beschleunigt, sondern in die entgegengesetzte Richtung zeigt. So werden die Elektronen abgebremst und geben ihre Energie an das elektromagnetische Feld zurück.

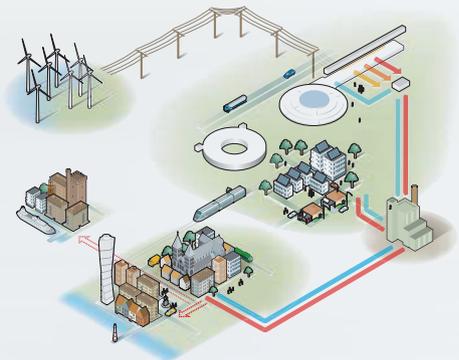
• Das Projekt **bERLinPro** am Helmholtz-Zentrum Berlin untersucht die Energierückgewinnung mit bisher unerreichten Teilchenströmen. (HZB)



### GRÜNE NEUTRONEN

Die Europäische Neutronenquelle ESS in Schweden wird die erste Beschleunigeranlage sein, die rein mit erneuerbarer Energie betrieben wird. ESS hat sich einem Nachhaltigkeitskonzept verpflichtet, das auf Verantwortung für die Zukunft, erneuerbarer Energie und Recycling baut. Die benötigte Energie soll so gering wie möglich sein und mit Windrädern erzeugt werden. Zudem sollen überschüssige Energie und Abwärme des Beschleunigers genutzt werden, um zum Beispiel Wohnbezirke im benachbarten Lund mit Wärme zu versorgen.

• Energiekonzept der ESS (ESS)



### SPARSAME SUPRALEITUNG

Supraleitende Beschleunigerkomponenten eröffnen nicht nur den Weg zu wesentlich höheren Teilchenenergien, sondern erlauben es gleichzeitig, Energieverbrauch und Betriebskosten drastisch zu senken.

Beim SPS-Beschleuniger bei CERN aus den 1970er Jahren wird zum Beispiel eine elektrische Leistung von 79 Megawatt verbraucht, um die normalleitenden Magnete mit Strom zu versorgen und mit Wasser zu kühlen. Im Vergleich dazu benötigt der LHC-Beschleuniger für eine 15-mal höhere Teilchenenergie nur 66 Megawatt.

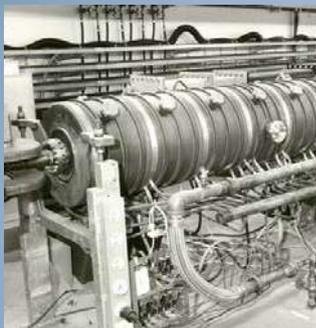
• Kälteanlage zur Herstellung flüssigen Heliums (DESY)



### RECYCELTE RINGE

Einmal gebaut, werden viele Beschleuniger über Jahrzehnte betrieben. So ging einer der Vorbeschleuniger des LHC – das Protonensynchrotron PS – bereits 1959 in Betrieb. PETRA bei DESY startete 1978 für die Teilchenphysik, war zwischenzeitlich Vorbeschleuniger und Röntgenquelle und ist mittlerweile – in der dritten Inkarnation – eine der brillantesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen der Welt. Zuweilen überwindet das Beschleuniger-Recycling sogar kontinentale Grenzen: Zahlreiche Komponenten des ehemaligen Berliner Beschleunigers BESSY I leisten mittlerweile in der Synchrotronstrahlungsquelle SESAME in Jordanien ihren Dienst.

1979–1989



**PETRA I:** Als die Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage PETRA bei DESY in Hamburg 1978 in Betrieb ging, war der 2,3 Kilometer lange Speicherring der größte seiner Art. Für die Erforschung der Elementarteilchen wurden Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, auf zuvor unerreichte Energien beschleunigt und zur Kollision gebracht. Der Einsatz lohnte sich: Mit Hilfe von PETRA konnte 1979 die Existenz des Gluons nachgewiesen werden, des Trägerteilchens der starken Kraft.

1990–2007



**PETRA II:** Die Anlage war noch gar nicht in Betrieb, als bereits Überlegungen für den Nachfolger von PETRA angestellt wurden: HERA, eine 2,5-mal so lange, weltweit einmalige Anlage, die ab 1990 Elektronen und Protonen zur Kollision brachte. Sie lieferte die für die Teilchenphysik notwendigen, immer größeren Energien. Doch für PETRA war der Lebensabend damit noch nicht gekommen. HERA benötigte vorbeschleunigte Teilchen, die nach einigen Umbauten PETRA II lieferte.

seit 2009



**PETRA III:** Die lichte Zukunft PETRAS zeichnete sich ab, als die Anlage 1995 um ein Magnetssystem zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung ergänzt wurde. Nach der Stilllegung HERAs wurde PETRA schließlich zu einer der weltbesten Röntgenstrahlungsquellen umgebaut und ging 2009 als PETRA III wieder in Betrieb. Aufgrund der großen Nachfrage wird PETRA III bis 2016 um neue Hallen und Strahlführungen erweitert. Die Geschichte PETRAS ist also noch lange nicht zu Ende.



Ausbildung

## BERUFSFELD BESCHLEUNIGER

Ob in Industrie, Medizin oder Forschung: Der Bedarf an Beschleunigern wächst weltweit.

Ein Grund von vielen, sich im Studium für die Beschleunigerphysik oder -technik zu entscheiden.

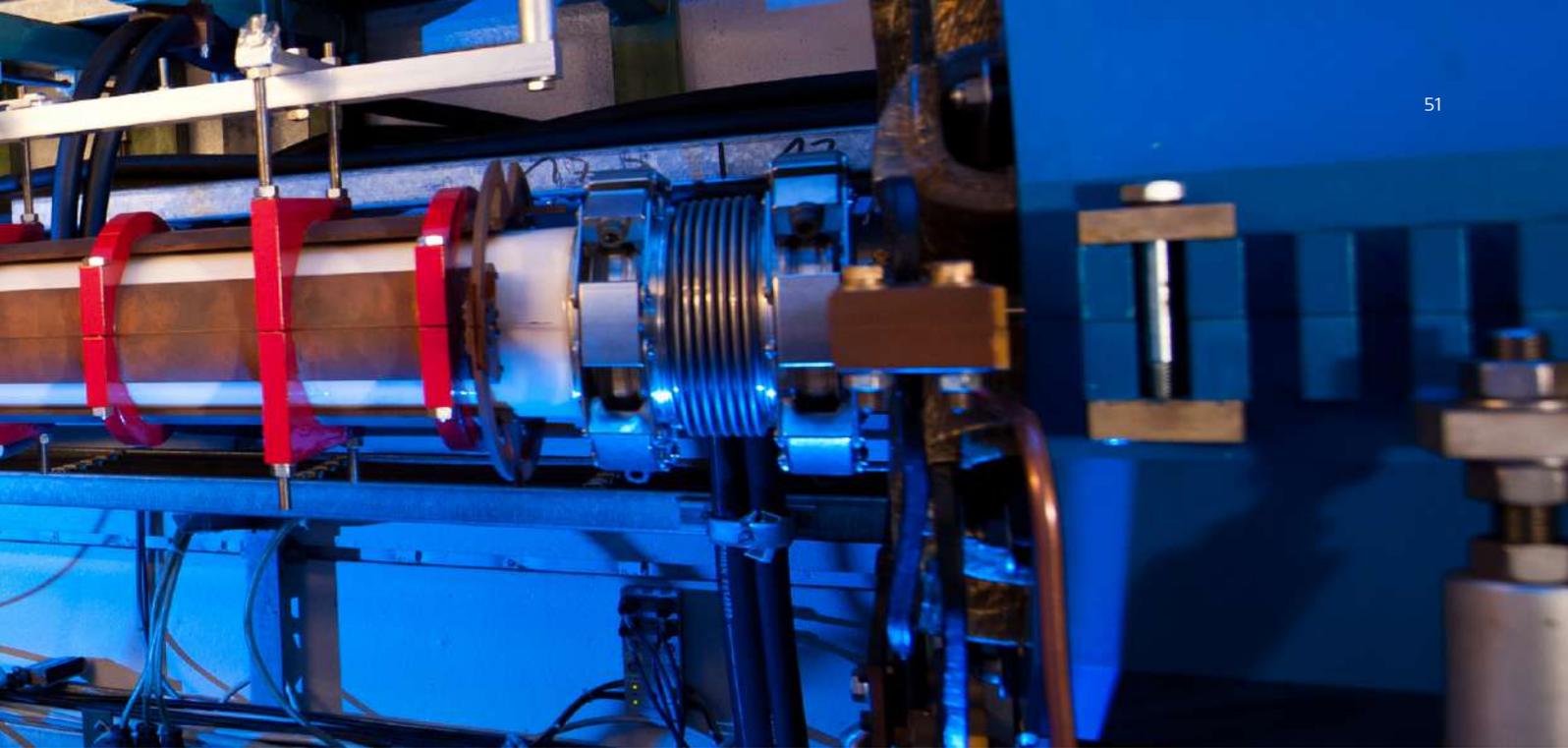
**Rund 1000 Physikerinnen, Physiker, Ingenieurinnen und Ingenieure sind in Deutschland täglich im Einsatz, um Beschleuniger zu betreiben und weiterzuentwickeln – darunter etwa 200 Studierende und 70 Doktorandinnen und Doktoranden. Europaweit befassen sich 3000 Personen mit Betrieb und Entwicklung von Beschleunigern.**

• Beim fünftägigen **WE-Heraeus-Seminar »Beschleunigerphysik für intensive Ionenstrahlen«** konnten sich die jungen Teilnehmenden über die Herausforderungen von Ionenbeschleunigern informieren. Das Seminar brachte den Nachwuchs mit internationalen Experten zusammen. (Elisabeth Nowotka/WE-Heraeus-Stiftung)

Für gut ausgebildete Nachwuchskräfte bieten Beschleunigerphysik und -technik ein vielseitiges Arbeitsfeld, das von der Physik der Beschleunigung bis hin zu Ingenieursdisziplinen wie Elektrotechnik, Vakuumtechnik, Hochfrequenztechnik und Maschinenbau reicht. Die Ausbildung ist geprägt von Interdisziplinarität und internationaler Zusammenarbeit.



• Der **Linearbeschleuniger der TU Darmstadt** wird unter studentischer Regie betrieben. Studierende entwerfen neue Bauteile – wie hier eine selbst geplante Quelle für polarisierte Elektronen –, simulieren die Eigenschaften der Komponenten, installieren sie und optimieren sie für den Betrieb. Auch bei den anderen universitären Beschleunigern können Studierende früh Verantwortung übernehmen. (TU Darmstadt)



### **PRAXISNAHE AUSBILDUNG**

Die universitäre Ausbildung findet oft zusammen mit den Forschungseinrichtungen in Berlin, Darmstadt, Hamburg, Jülich und Karlsruhe statt, so dass die Studierenden an großen Beschleunigeranlagen arbeiten können. Praxiserfahrungen bieten aber auch die kleineren Beschleuniger und Beschleunigerkomponenten der Universitäten in Bonn, Darmstadt, Dortmund, Frankfurt und Mainz.

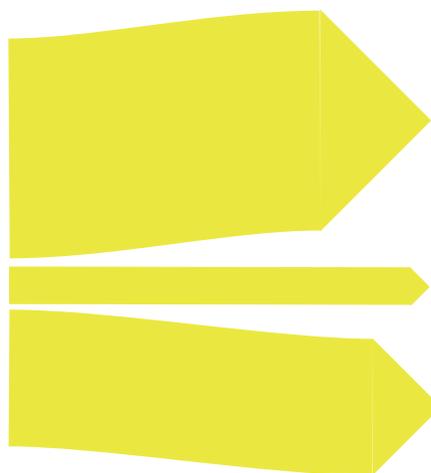
### **VIELFÄLTIGE JOBAUSSICHTEN**

Über die Hälfte der Studierenden entscheidet sich, nach Studienabschluss im Forschungsgebiet zu bleiben – um etwa von der Konzeption bis zur Inbetriebnahme an der Realisierung von Großprojekten mitzuarbeiten oder neue Beschleunigerkonzepte wie die Plasmabeschleunigung mitzuentwickeln. Aber auch die Industrie schätzt die Kenntnisse und Fähigkeiten der umfassend Ausgebildeten.

### **WELTWEITE VERNETZUNG**

Große Beschleunigeranlagen werden in internationaler Zusammenarbeit gebaut, betrieben und weiterentwickelt. Daher stehen die Studierenden fast täglich im Austausch mit Menschen aus anderen Ländern. Besonders international geht es auf Beschleunigerschulen zu – wie etwa der *CERN Accelerator School*, die abwechselnd in den CERN-Mitgliedsstaaten stattfindet.

*Wohin verschlägt es  
Absolventinnen und  
Absolventen der  
Beschleunigerphysik und  
Beschleunigertechnik?*



#### **Forschungseinrichtung**

56 Prozent

#### **Universität**

10 Prozent

#### **Industrie**

34 Prozent

## Globale Netzwerke

Beim Bau und Betrieb von Beschleunigern hat internationale Zusammenarbeit Tradition.

Kein Großprojekt wird mehr im nationalen Alleingang errichtet. Aber auch beim Bau und Betrieb

kleinerer Beschleuniger arbeiten fast immer Menschen aus vielen Ländern Hand in Hand.



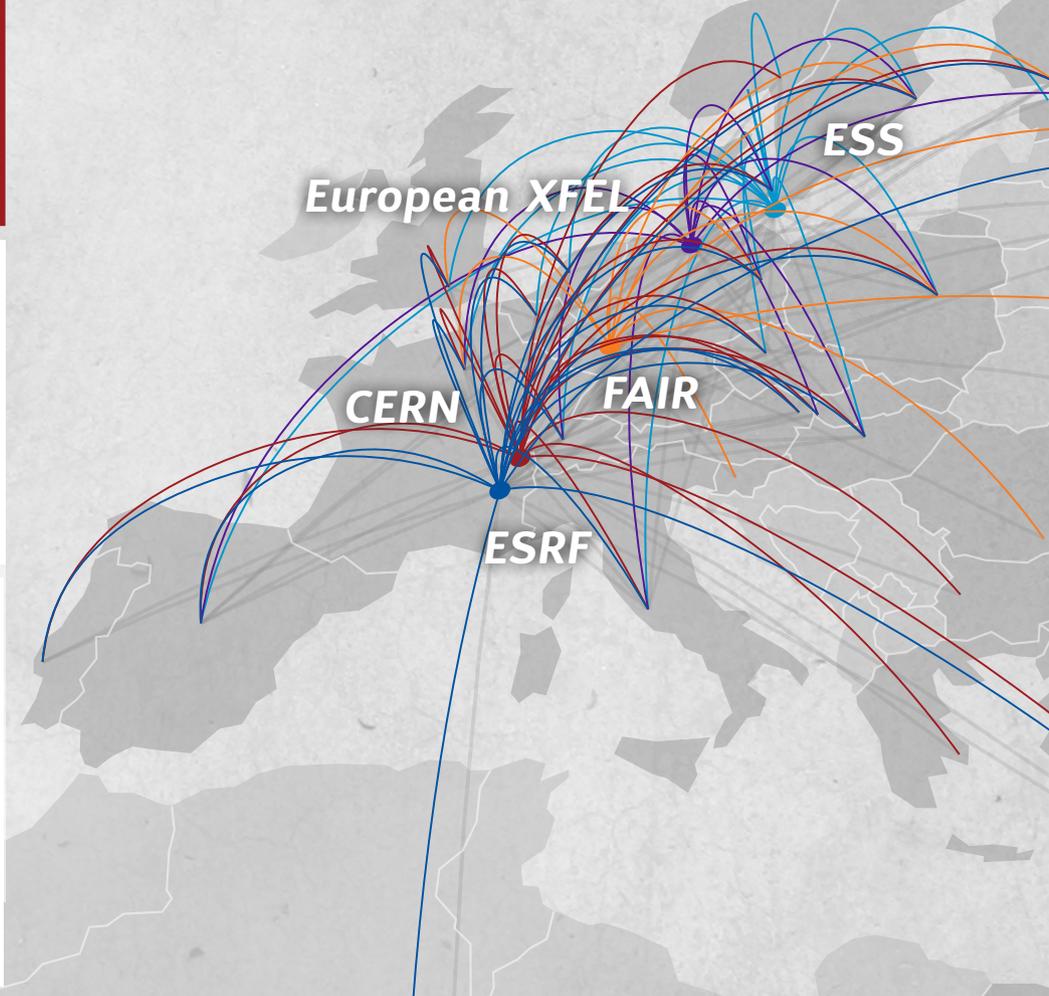
Zehn Jahre nach Ende des Zweiten Weltkriegs wurde an der schweizerisch-französischen Grenze in der Nähe von Genf der Grundstein für das größte Forschungszentrum auf dem Gebiet der Teilchenphysik gelegt. Mehr als 600 Institute und Universitäten aus aller Welt nutzen die Einrichtungen bei **CERN** – darunter den LHC (*Large Hadron Collider*), die weltweit leistungsstärkste Beschleunigeranlage.

Deutschland zählt zu den CERN-Gründungsstaaten und trägt heute etwa 20 Prozent des Budgets. Die Zahl der Mitgliedsländer ist im Laufe der Jahre von anfänglich 12 auf inzwischen 21 gestiegen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Israel, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, die Schweiz, Slowakei, Spanien, Tschechien, Ungarn und das Vereinigte Königreich. Als erstes nichteuropäisches Land trat Israel im Jahr 2010 bei.



Über 6000 Forscherinnen und Forscher im Jahr machen die *European Synchrotron Radiation Facility* **ESRF** in Grenoble zur meistbesuchten Synchrotronstrahlungsquelle der Welt. Die Brillanz der von ihnen genutzten Strahlung konnte in den letzten 30 Jahren mehr als ver Hundertfacht werden. Bis 2020 wird ein weiterer Faktor 100 hinzukommen, wenn raffinierte Magnetlinsen die horizontale Emittanz der Elektronen im Speicherring verkleinern.

Deutschland hält an der ESRF einen Anteil von 24 Prozent und gehört seit 1988 zu den heute 21 Partnerstaaten – darunter die 13 Mitglieder Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Italien, Niederlande, Norwegen, Russland, Schweden, die Schweiz, Spanien und das Vereinigte Königreich sowie die acht assoziierten Länder Israel, Österreich, Polen, Portugal, Slowakei, Südafrika, Tschechien und Ungarn.





Im südschwedischen Lund entsteht derzeit die europäische Neutronenquelle **ESS** (*European Spallation Source*). Hier wird ein 5-Megawatt-Protonenstrahl Neutronen erzeugen, die ab 2023 tausenden Forscherinnen und Forschern aus aller Welt für bisher unerreichte Experimentiermöglichkeiten in den Material- und Lebenswissenschaften zur Verfügung stehen werden.

Elf Staaten gehören zu den Gründungsändern der ESS (Dänemark, Deutschland, Estland, Frankreich, Italien, Norwegen, Polen, Schweden, die Schweiz, Tschechien und Ungarn), vier weitere planen beizutreten (Belgien, Niederlande, Spanien und das Vereinigte Königreich).



Mit den einzigartigen Röntgenblitzen des Freie-Elektronen-Lasers **European XFEL** werden sich unter anderem dreidimensionale Aufnahmen aus dem Nanokosmos machen und chemische Reaktionen filmen lassen. Angetrieben wird die Strahlungsquelle von einem rund 2 Kilometer langen supraleitendem Elektronenbeschleuniger, dem längsten seiner Art.

Der European XFEL wird in der Nähe von DESY in Hamburg und Schleswig-Holstein gebaut und betrieben. Am Projekt beteiligen sich zurzeit 11 Länder: Dänemark, Deutschland, Frankreich, Italien, Polen, Russland, Schweden, die Schweiz, die Slowakei, Spanien und Ungarn.



Für die Grundlagenforschung wird die Beschleunigeranlage **FAIR** (*Facility for Antiproton and Ion Research*) Antiprotonen- und Ionenstrahlen mit bisher unerreichter Intensität und Qualität liefern. Damit erhält die Wissenschaft in Europa ein herausragendes Instrument für die Erforschung der Materie im Bereich von Atomen, Atomkernen und aus Quarks und Gluonen zusammengesetzten Teilchen.

FAIR entsteht in Darmstadt in unmittelbarer Nachbarschaft zum GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. Am Projekt beteiligen sich zurzeit 10 Länder: Deutschland, Finnland, Frankreich, Indien, Polen, Rumänien, Russland, Schweden, Slowenien und das Vereinigte Königreich.

## SESAME



An der Synchrotronstrahlungsquelle **SESAME** (*Synchrotron-Light for Experimental Science Applications in the Middle East*) in Jordanien arbeiten Forscherinnen und Forscher aus dem Mittleren Osten und angrenzenden Regionen zusammen; ungeachtet politischer Differenzen zwischen einigen der Mitgliedsstaaten.

An SESAME beteiligt sind Ägypten, Bahrain, Iran, Israel, Jordanien, Pakistan, Palästina, die Türkei und Zypern. Auslöser für die Gründung des Labors war eine Schenkung Deutschlands: Elektronenquelle und Booster-Synchrotron gehen aus der außer Betrieb genommenen Synchrotronstrahlungsquelle BESSY I hervor. Diese Teile wurden im Laufe der Zeit um bei SESAME entwickelte Komponenten erweitert.

# BESCHLEUNIGERPHYSIK IN DEUTSCHLAND

## Beschleunigerphysik an Universitäten

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
 Humboldt-Universität zu Berlin  
 Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
 Technische Universität Darmstadt  
 Technische Universität Dortmund  
 Goethe-Universität Frankfurt am Main  
 Universität Hamburg  
 Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg  
 Friedrich-Schiller-Universität Jena  
 Karlsruher Institut für Technologie KIT  
 Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
 Ludwig-Maximilians-Universität München  
 Universität Rostock  
 Universität Siegen

## Außeruniversitäre Forschungseinrichtungen

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY  
 Hamburg und Zeuthen  
 European XFEL  
 Hamburg und Schenefeld  
 FAIR  
 Darmstadt  
 Forschungszentrum Jülich  
 GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung  
 Darmstadt  
 Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie HZB  
 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf HZDR  
 Max-Planck-Institut für Kernphysik MPIK  
 Heidelberg  
 Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB  
 Braunschweig und Berlin

## Beschleunigeranlagen

ANKA, Synchrotronstrahlungsquelle  
 KIT, Karlsruhe  
 BESSY II, Synchrotronstrahlungsquelle  
 HZB, Berlin  
 COSY, Kühlersynchrotron für Hadronen  
 Forschungszentrum Jülich  
 CSR, Ionenspeicherring  
 MPIK, Heidelberg  
 DELTA, Synchrotronstrahlungsquelle  
 TU Dortmund  
 ELBE, Linearbeschleuniger mit Freie-Elektronen-Laser  
 HZDR, Dresden  
 ELSA, Elektronenspeicherring  
 Universität Bonn  
 ESR, Ionenspeicherring  
 GSI, Darmstadt  
 European XFEL, Freie-Elektronen-Laser  
 European XFEL GmbH, Hamburg  
 FAIR, Antiprotonen- und Ionenbeschleuniger  
 FAIR GmbH, Darmstadt  
 FLASH, Freie-Elektronen-Laser  
 DESY, Hamburg  
 MAMI, Elektronenbeschleuniger  
 Universität Mainz  
 MLS, Synchrotronstrahlungsquelle  
 PTB, Berlin  
 PETRA III, Synchrotronstrahlungsquelle  
 DESY, Hamburg  
 S-DALINAC, Elektronenbeschleuniger  
 TU Darmstadt  
 SIS 18, Schwerionensynchrotron  
 GSI, Darmstadt  
 UNILAC, Linearbeschleuniger  
 GSI, Darmstadt

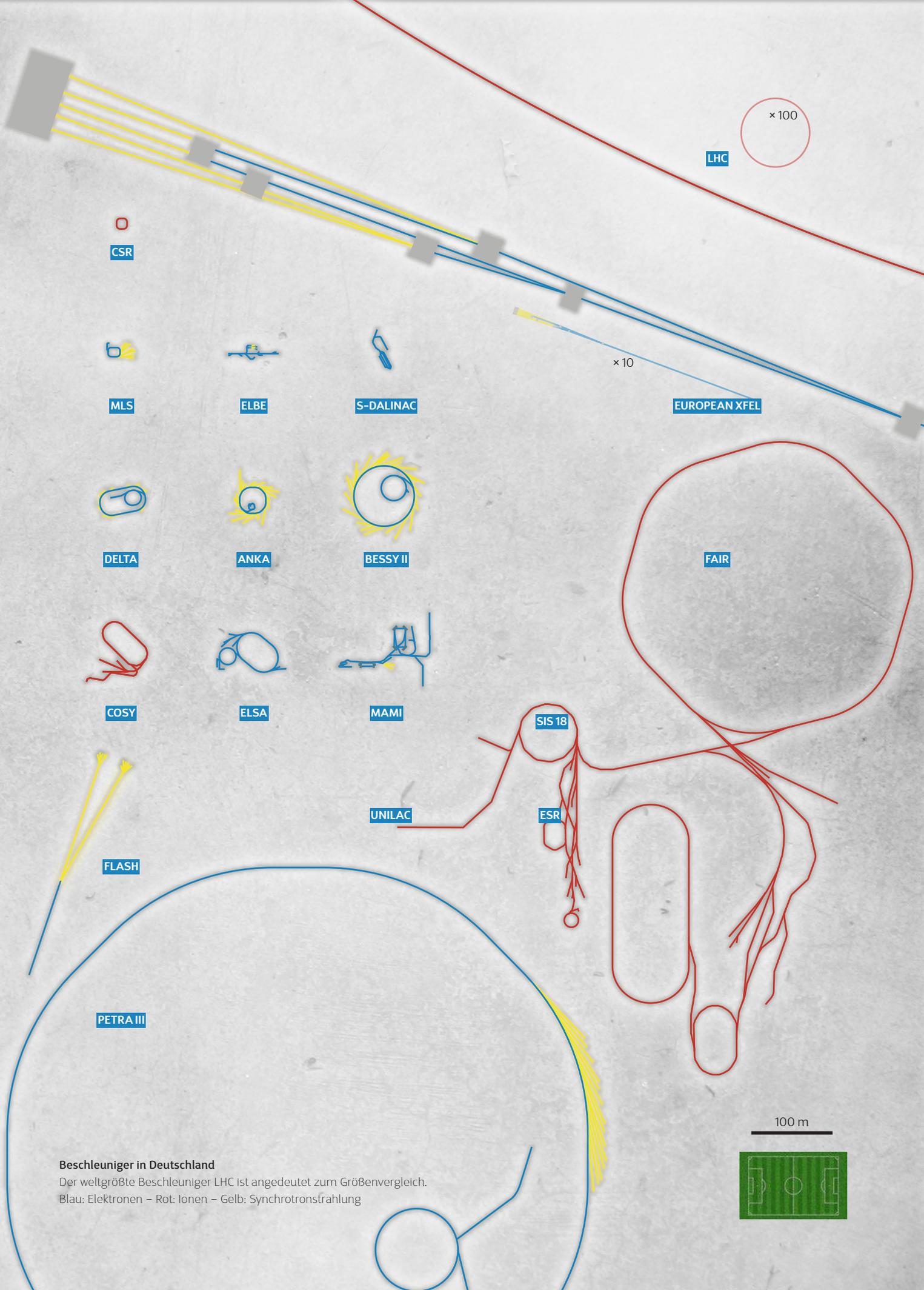


Anlagen im Ausland mit deutscher Beteiligung an der Grundfinanzierung:

ESRF, Synchrotronstrahlungsquelle  
 ESRF, Grenoble, Frankreich

ESS, Neutronenquelle  
 ESS, Lund, Schweden

CERN-Beschleunigeranlagen  
 CERN, Genf, Schweiz



**Beschleuniger in Deutschland**

Der weltgrößte Beschleuniger LHC ist angedeutet zum Größenvergleich.

Blau: Elektronen – Rot: Ionen – Gelb: Synchrotronstrahlung

100 m



**Herausgeber**

Komitee für Beschleunigerphysik KfB  
[www.beschleunigerphysik.de](http://www.beschleunigerphysik.de)

**Stand**

1. Juli 2016 (v 1.2.1)

**Redaktion**

Sabrina Appel (GSI), Oliver Boine-Frankenheim (GSI, TU Darmstadt), Jörg Roßbach (Universität Hamburg), Rüdiger Schmidt (CERN)

**Redaktionsleitung**

Jörg Roßbach

**Redaktionelle Bearbeitung**

Ilka Flegel, Kapellendorf  
Dirk Rathje, Hamburg

**Grafische Gestaltung und Produktion**

Dirk Rathje, Hamburg

**Druck**

ehs-media, Schenefeld  
auf metapaper touch

**Dank**

Das KfB dankt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie den Helmholtz-Zentren DESY, GSI und HZB für die großzügige Unterstützung bei der Erstellung dieser Broschüre.

**Nachdruck**

Für nicht-kommerzielle Nutzung ist der Nachdruck auch in Auszügen unter Nennung der Quelle gestattet.

