



SCHNELLER,  
IMMER SCHNELLER

# Die unbewegten Beweger

Wie kleinste Teilchen fast so schnell werden wie das Licht

von Dirk Eidemüller

Teilchenbeschleuniger sind unverzichtbare Bestandteile der modernen Forschungslandschaft. Einige ihrer Herzstücke kommen aus Frankfurt.

Sie sind die unbewegten Beweger der modernen Wissenschaft: Festgemauert auf massiven Fundamenten ruhen Teilchenbeschleuniger in sich, schließlich sind sie Präzisionsinstrumente, deren Komponenten auf den Bruchteil eines Millimeters zueinander ausgerichtet sind. All die riesigen Magnetspulen und Beschleunigungsstrukturen, die das Herzstück einer solchen Teilchenkanone ausmachen, dürfen sich im Betrieb nicht vom Fleck rühren. Im Innern herrschen jedoch extreme Zustände. Ein beinahe perfektes Vakuum sorgt dafür, dass winzige Teilchen kollisionsfrei durch die Röhren sausen können. Riesige elektromagnetische Kräfte zerren dank ausgeklügelter Elektrotechnik an den Partikeln und beschleunigen sie bis an den Rand des naturgesetzlich Erlaubten – nämlich fast bis auf Lichtgeschwindigkeit.

»Kein Materieteilchen kann sich mit exakter Lichtgeschwindigkeit oder gar schneller bewegen«, sagt Ulrich Ratzinger, Professor für

Beschleunigerphysik an der Universität Frankfurt. »Das folgt aus Albert Einsteins Relativitätstheorie.« Man kann sich dieser Grenzgeschwindigkeit aber immer weiter annähern. Dabei kommt es zu einem interessanten Effekt: Wenn man schon nahe an der Lichtgeschwindigkeit ist und mithilfe der elektromagnetischen Felder immer weiter Energie in die beschleunigten Teilchen pumpt, dann steigt ihre Geschwindigkeit zwar kaum noch. Stattdessen nimmt aber ihre Masse immer weiter zu. Nach Einsteins berühmter Formel, dass Energie gleich Masse mal Lichtgeschwindigkeit im Quadrat ist, kann man in Teilchenbeschleunigern also Beschleunigungsenergie in Teilchenmasse umwandeln.

## Riesensterne und Urknallforschung

»Auf diese Weise lassen sich heutzutage leichte Teilchen wie Elektronen oder Protonen auf ein Vielfaches ihrer ursprünglichen Masse bringen, die sie im Ruhezustand besitzen«, erklärt

**Koloss aus Kupfer und Stahl:** Im Innern der Beschleuniger werden die Teilchen durch elektromagnetische Felder zwischen den Kupferringen beschleunigt. Während sie durch die Ringe fliegen, sind sie abgeschirmt. Das Feld kann jetzt seine Richtung wechseln und beim Austritt aus dem Ring den Teilchen weiteren Schub verleihen.

Ratzinger. Mit dieser zusätzlichen Masse bringen sie dann auch entsprechend mehr Impetus mit, wenn sie auf andere Teilchen oder einen Zielkörper knallen. In den Trümmern solcher Kollisionen suchen die Forscher dann nach neuartigen Teilchen oder physikalischen Effekten. Man kann die Strahlung, die in Teilchenbeschleunigern entsteht, aber auch nutzen, um Materialien zu durchleuchten.

Aus der heutigen Wissenschaft sind die unbewegten Bewegungsenergieumwandler jedenfalls nicht mehr wegzudenken. Wissenschaftler suchen mit ihnen nicht nur nach der rätselhaften Dunklen Materie und vermessen die Eigenschaften von Elementarteilchen. Man kann mithilfe rasanter Partikel auch die Prozesse im Innern von Riesensternen nachstellen oder das ultraheiße Plasma aus Atomkernmaterie erzeugen, das im Universum kurz nach dem Urknall vorherrschte. Aus Teilchenbeschleunigern lässt sich

extrem brillante Röntgenstrahlung mit Lasercharakteristik auskoppeln. Dazu eignet sich der European XFEL in Hamburg hervorragend. Diese Anlage liefert die schärfsten Röntgenpulse weltweit und hat Deutschland in dieser Forschungskategorie an die Weltspitze katapultiert. Mit dieser Maschine lassen sich neuartige Materialien, biologische Proben und chemische Prozesse auf kürzesten räumlichen und zeitlichen Skalen durchleuchten.

#### »Neutronen gibt es nicht von der Stange«

Aber auch in zwei anderen Bereichen entstehen derzeit hierzulande Teilchenbeschleuniger, die Arbeit an der vordersten Front der Wissenschaft ermöglichen. Bei Darmstadt befindet sich das Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Fertigstellung. Aufbauend auf der jahrzehntelangen Expertise der südhessischen Schwerionenforschung bei GSI wird hier in internationaler Kollaboration ein Teilchenbeschleunigerkomplex errichtet, der eine riesige Zahl von Fragen aus Grundlagen- und angewandter Forschung klären soll. Und in Frankfurt befindet sich FRANZ im Bau, die »Frankfurter Neutronenquelle am Stern-Gerlach-Zentrum«. Diese ist zwar klein im Vergleich zu FAIR, soll aber ebenfalls dank technologischer Innovationen bislang in dieser Form nicht durchführbare Messungen ermöglichen.

»Mit FRANZ wollen wir exakt definierte Neutronenstrahlen mit einzigartiger Strahlqualität erzeugen«, sagt Ratzinger. Neutronen eignen sich zwar hervorragend, um Materialien zu durchleuchten und ergänzen sich sehr gut mit Röntgenstrahlung. Aber während sich Röntgenstrahlung als elektromagnetische Strahlung aus Röntgenröhren oder Anlagen wie dem European XFEL einfach auskoppeln lässt, ist die Erzeugung von Neutronenstrahlung sehr viel

In Darmstadt entsteht beim GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung die neue Beschleunigeranlage FAIR. Die Technologie für eine der beiden ersten Beschleunigerstufen, ein Linearbeschleuniger für Protonen, kommt aus Frankfurt.



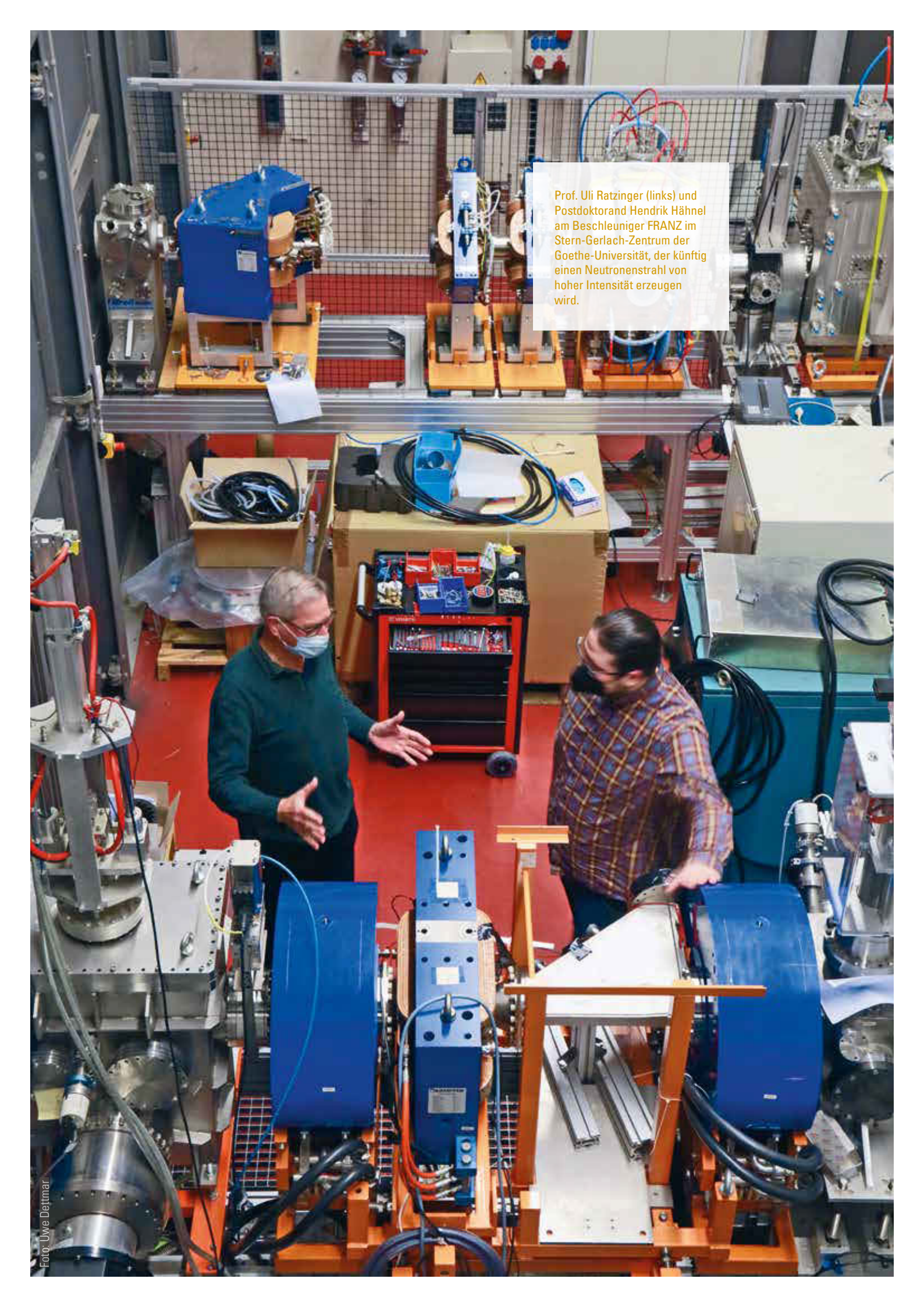
Foto: Dieter Fehrenz/GSI/FAIR

#### ZUR PERSON



**Uli Ratzinger**, Jahrgang 1956, studierte Physik an der TU München. Seine Doktorarbeit schrieb er über die Entwicklung von Teilchenbeschleuniger-Kavitäten. Seit 1987 ist er an der GSI Darmstadt tätig, wo er sich um Design und Realisierung neuartiger Linearbeschleunigertechnik für GSI und CERN kümmert. Außerdem war er an der Entwicklung eines speziellen Beschleunigertyps für die Tumorthherapie beteiligt, der am HIT Heidelberg und dann auch an anderen Therapiezentren zum Einsatz kam. Seit 1999 widmet er sich supraleitenden Beschleunigerkomponenten und insbesondere dem neuen Hochstrom-Protonenlinearbeschleuniger bei GSI/FAIR. Im Jahr 2000 wurde er Professor an der Universität Frankfurt. 2009 erhielt er die Gerald Kucera Laureatus Professorship für seine ausgezeichneten Beiträge zur Beschleunigertechnologie. Im Jahr 2003 hat er die Bevattech mitgegründet, die ebenfalls im Bereich der Linearbeschleuniger aktiv ist.

[u.ratzinger@iap.uni-frankfurt.de](mailto:u.ratzinger@iap.uni-frankfurt.de)



Prof. Uli Ratzinger (links) und Postdoktorand Hendrik Hänel am Beschleuniger FRANZ im Stern-Gerlach-Zentrum der Goethe-Universität, der künftig einen Neutronenstrahl von hoher Intensität erzeugen wird.

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Teilchenbeschleuniger bringen mithilfe elektromagnetischer Felder winzige Teilchen bis nahe an die Lichtgeschwindigkeit.
- An der Goethe-Universität werden Konzepte für Linearbeschleuniger entwickelt, zum Beispiel für den eigenen Neutronenbeschleuniger FRANZ und für den Ionenbeschleuniger FAIR in Darmstadt.
- Beschleuniger dienen hauptsächlich der Grundlagenforschung. Bei GSI in Darmstadt zum Beispiel wurde aber auch eine Krebstherapie mit Kohlenstoff-Ionenstrahlen entwickelt.

schwieriger. Neutronen gibt es nicht von der Stange: Sie befinden sich zusammen mit den Protonen in Atomkernen und müssen aus diesem »Käfig« erst einmal freigesetzt werden. Das geschieht bislang vor allem in Forschungsreaktoren. »Aber in Zukunft wird man diese Reaktoren durch spezielle Teilchenbeschleuniger wie FRANZ ersetzen, da Letztere sehr wohldefinierte und exakt kontrollierbare Neutronenstrahlen liefern können«, erklärt Ratzinger.

### Exotische Anforderungen

Bei FRANZ soll ein Linearbeschleuniger pro Sekunde 250 000 Protonenpulse liefern, die dann auf einen Zielkörper geschossen werden. Dabei werden bei jedem Puls Neutronen freigesetzt, die sich anhand ihrer Geschwindigkeit separieren lassen. Auf diese Weise erhält man Neutronen mit klar definierten Eigenschaften, mit denen sich einerseits astrophysikalische Fragen – etwa zur Umwandlung von Elementen in Riesensternen – beantworten lassen. Andererseits versprechen sich die Forscher davon auch neue Ansätze zur Krebstherapie, indem man die Neutronen mit einer borhaltigen Substanz reagieren lässt, die sich an Tumore anlagert.

»Die Spezifikationen, die FRANZ aufweisen soll, haben uns anfangs einiges an Kopfzerbrechen bereitet. Die Forschungsgemeinde hat hier ziemlich exotische Wünsche weitab der üblichen Beschleunigertechnologie geäußert«, sagt Ratzinger. So mussten die Frankfurter Spezialisten nicht nur ein Design für eine extrem schnelle Pulsfolge von 250 000 Pulsen pro Sekunde liefern – weit oberhalb anderer Teilchenbeschleuniger. Zugleich soll FRANZ einen sehr starken Strahl erzeugen, damit möglichst viele Neutronen entstehen. »Dazu mussten wir neuartige Komponenten entwickeln, wie einen kompak-

ten Hochfrequenzbeschleuniger für hohe Protonenströme und schnell schaltende, transversale elektrische Felder, die die aus der Quelle fliegenden Protonen in rasantem Takt von Mikrosekunden zu Pulsen formen.«

### Platzsparendes Design für FAIR-Beschleuniger

Während FRANZ ein regionales Verbundprojekt ist, wird FAIR das kommende internationale Schwerionen-Großforschungszentrum. Die technologischen Herzstücke sind einerseits die Beschleunigertechnik und andererseits die Teilchendetektoren. Bei großen Teilchenbeschleunigern hat es sich bewährt, zwei Typen von Beschleunigern miteinander zu koppeln: Anfangs bringt ein Linearbeschleuniger die Teilchen auf Trab, dahinter übernehmen Ringbeschleuniger – sogenannte Synchrotrons – die bereits rasanten Teilchenpakete und bringen sie dann zu höchsten Energien. FAIR besitzt gleich zwei Ringbeschleuniger, die beiden Schwerionensynchrotrone »SIS18« und »SIS100«. Die Technik für die »Einspeise-Linearbeschleuniger« kommt größtenteils aus Frankfurt.

»Wir haben bei dem neuen FAIR-Protonen-Linearbeschleuniger auf ein neuartiges, kompaktes Design gesetzt, mit dem wir die Dimension des Linearbeschleunigers rund um die Hälfte reduzieren konnten im Vergleich zu früheren Modellen«, sagt Ratzinger. Möglich wird dies durch eine geschickte Geometrie der Hohlräume und der elektromagnetischen Felder, die in diesen Kavitäten schwingen und dabei die Teilchenpakete beschleunigen. Dieses platz- und energieeffiziente Design spart nicht nur Strom im Betrieb, sondern auch eine Menge Beton: Denn ein so starker Teilchenbeschleuniger muss mit dicken Betonwänden abgeschirmt werden, damit keine gefährliche Teilchenstrahlung nach außen dringt.

### Krebstherapie und Neutronensternforschung

Wenn FAIR in einigen Jahren in Betrieb geht, wird man dort von leichten Protonen bis hin zu schweren Elementen Teilchen aller Größenordnung beschleunigen können – und sogar Antiprotonen, also Teilchen aus Antimaterie, erzeugen können. »Außerdem können die Experimentatoren seltene, kurzlebige und exotische Atomkerne, die bei Kollisionsexperimenten entstehen, aus dem Teilchenstrahl separieren und mit ihnen Präzisionsexperimente durchführen«, sagt Ratzinger.

Neuartige Krebstherapien testen, sich an den Urknall herantasten, Materie unter extremen astrophysikalischen Bedingungen untersuchen, den Ursprung der Elemente erforschen: All das wäre ohne Teilchenbeschleuniger nicht möglich. Die unbewegten Bewegungen offenbaren uns, was die Welt im Innersten bewegt. ●



### DER AUTOR

**Dirk Eidemüller,**

Jahrgang 1975, studierte Physik und als Nebenfach Philosophie in Darmstadt, Heidelberg, Rom und Berlin, schloss mit einem Diplom in Astroteilchenphysik ab und promovierte in Wissenschaftsphilosophie. Er wohnt in Berlin und arbeitet als freier Autor und Wissenschaftspublizist.

[dirk.eidemuller@gmx.de](mailto:dirk.eidemuller@gmx.de)